



**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

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

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 336, № 4, 2025

Издательство
Томского политехнического университета
2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Контарович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абутаипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Мостовщиков А.В., д-р техн. наук (Россия)
Хакимьянов М.И., д-р техн. наук (Россия)
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Мин Р.С., д-р хим. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2025

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY**

ISSN (print) – 2500_1019
ISSN (on_line) – 2413_1830

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

Volume 336, № 4, 2025

EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Belozarov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)
Mostovshchikov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Khakimyanov M.I., Dr. Sc. (Russia)
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)
Min R.S., Dr. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|---|---|---|
| <p>Shoreline fluctuation of Dong Tranh Estuary, Can Gio District, Ho Chi Minh City in the background of the climate variability
 Nguyen Tien Thanh</p> <p>Анализ тренда изменения плотности и характера распределения поровых каналов по размерам с использованием комплексного моделирования
 Михайлов М.О., Кулешова Л.С.,
 Ахметов Р.Т., Гилязетдинов Р.А.</p> <p>Повышение эффективности работы термостабилизатора за счёт распределения потоков хладагента внутри устройства и оребрения его поверхностей
 Гильманов А.Я., Ким А.С., Шевелёв А.П.</p> <p>Геология и минеральный состав флюидолитов мезо-кайнозойского этапа развития активизированных структур Полярного Урала
 Душин В.А., Суставов С.Г., Власов И.А., Прокопчук Д.И.</p> <p>Анализ и перспективы развития индикаторных (трассерных) методов исследования пластов-коллекторов нефтяных и газовых месторождений
 Вержбицкий В.В., Щекин А.И., Гунькина Т.А.,
 Хандзель А.В., Вержбицкая В.В.</p> <p>Оптимизация режимов синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины
 Островная Д.Ю., Дюрягина А.Н.,
 Островной К.А., Луценко А.А.</p> <p>Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–2020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле)
 Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В., Коломейцев А.А.</p> <p>Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника
 Шалимов А.В., Кормщииков Д.С., Попов М.Д.</p> <p>Возможности лигносульфонатов для извлечения минералов из природных руд методом флотации
 Тептерева Г.А., Волошин А.И.</p> <p>Обоснование конструкции опоры надземных магистральных трубопроводов, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи
 Батыров А.М., Королев М.И., Красников А.А.</p> <p>Исследование особенностей процессов фильтрации осадкогелеобразующих составов через пористые среды
 Хабибуллин М.Я.</p> <p>Влияние акустических характеристик горных пород на ёмкостные параметры коллектора
 Коровин М.О., Алеева А.О.</p> <p>Программное регулирование производительности нефтяной скважины с электроцентробежным насосом при интервальной неопределённости параметров притока
 Лапик О.И., Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Лапик Н.В.</p> <p>Энергоэффективное управление группой штанговых глубинных насосных установок
 Накатаев А.А., Зиуев А.М., Нестеров К.Е.</p> | <p>7</p> <p>16</p> <p>25</p> <p>36</p> <p>47</p> <p>66</p> <p>75</p> <p>89</p> <p>98</p> <p>107</p> <p>117</p> <p>127</p> <p>136</p> <p>146</p> | <p>Колебания береговой линии реки Донг Чан, Район Кан Гио, Хошимин, на фоне изменчивости климата
 Нгуен Тьен Тхань</p> <p>Analysis of the trend of changes in density and the nature of the distribution of pore channels by size using complex modeling
 Mikhailov M.O., Kuleshova L.S.,
 Akhmetov R.T., Gilyazetdinov R.A.</p> <p>Improving the efficiency of the heat stabilizer operation by distributing refrigerant flows inside the device and finning its surfaces
 Gilmanov A.Ya., Kim A.S., Shevelev A.P.</p> <p>Geology and mineral composition of fluidolites of the Meso-Cenozoic stage of development of activated structures of the Polar Urals
 Dushin V.A., Sustavov S.G., Vlasov I.A., Prokopchuk D.I.</p> <p>Analysis and prospects for the development of indicator (tracer) methods for studying oil and gas reservoirs
 Verzhbitsky V.V., Shchekin A.I., Gunkina T.A.,
 Handzel A.V., Verzhbitskaya V.V.</p> <p>Optimization of the synthesis modes of water-soluble sulfonic derivatives of lignin from wood waste
 Ostrovnaya D.Yu., Dyuryagina A.N.,
 Ostrovnoy K.A., Lutsenko A.A.</p> <p>Changes in hydrological characteristics of the Ob River caused by climate change in 1922–2020 (according to the observations in Barnaul)
 Samoilova S.Yu., Mardasova E.V., Kolomeytsev A.A.</p> <p>Determination of air convective stability index in shafts at zero ventilation mode of a mine
 Shalimov A.V., Kormshchikov D.S., Popov M.D.</p> <p>Possibilities of lignosulfonates for extraction of minerals from natural ores by flotation
 Teptereva G.A., Voloshin A.I.</p> <p>Substantiation of design of the aboveground main pipeline support reducing frost heaving effect on piles
 Batyrov A.M., Korolev M.I., Krasnikov A.A.</p> <p>Features of filtration of sediment-gelling compositions through porous media
 Khabibullin M.Ya.</p> <p>Rock acoustic properties impact on reservoir capacity
 Korovin M.O., Aleeva A.O.</p> <p>Program regulation of performance of the oil well with an electric submersible pump under interval uncertainty of inflow parameters
 Lapik O.I., Solovyev I.G., Govorkov D.A., Lapik N.V.</p> <p>Sucker rod pumping unit energy-efficient control
 Nakataev A.A., Ziuzev A.M., Nesterov K.E.</p> |
|---|---|---|

- | | |
|--|---|
| <p>Особенности эксплуатации инфильтрационных водозаборов (на примере Моховского месторождения подземных вод в Республике Хакасия)
 Никитенкова А.В., Никитенков А.Н.,
 Дутова Е.М., Кузеванов К.И.</p> <p>Совершенствование метода инвентаризации земель рекреационных зон на примере парка Сосновка города Санкт-Петербург
 Ковязин В.Ф., Пасько О.А., Борисова А.О., Нгуен Ч.А.</p> <p>Определение поверхностного натяжения на основе термокапиллярного движения
 Филипас А.А., Кучман А.В., Зарницын А.Ю., Исаев Ю.Н.</p> <p>Выявление зон разломов земной коры, оказывающих воздействие на южный участок трубопровода проекта «Сахалин-2», по данным космических съемок
 Купцова О.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А.</p> <p>Структурные и геофизические критерии золотого оруденения Таборнинского золоторудного поля (юго-западная Якутия)
 Ярчук А.В., Ананьев Ю.С.</p> <p>Изотопный состав подземных вод территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья
 Папина Т.С., Эйрих А.Н., Орлова Е.С., Рыбкина И.Д.</p> | <p>154 Features of infiltration water intakes operation (on example of the Mokhovsky groundwater deposit in the Republic of Khakassia)
 Nikitenkova A.V., Nikitenkov A.N.,
 Dutova E.M., Kuzevanov K.I.</p> <p>169 Improving the method of inventory of lands of recreational zones on the example of Sosnovka Park in St. Petersburg
 Kovyazin V.F., Pasko O.A., Borisova A.O., Nguyen Ch.A.</p> <p>179 Determination of surface tension based on thermocapillary motion
 Filipas A.A., Kuchman A.V., Zarnitsyn A.Yu., Isaev Yu.N.</p> <p>189 Identification of crustal fault zones, affecting the southern section of the Sakhalin-2 pipeline, according to satellite surveys
 Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A.</p> <p>202 Structural and geophysical criteria of gold minerality of the Taborninsky gold field (Southwestern Yakutia)
 Yarchuk A.V., Ananyev Yu.S.</p> <p>212 Isotopic composition of groundwater in the drainless area of the Ob-Irtysh interfluve
 Papina T.S., Eirikh A.N., Orlova E.S., Rybkina I.D.</p> |
|--|---|

UDC 556.537(597)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4677

Shoreline fluctuation of Dong Tranh Estuary, Can Gio District, Ho Chi Minh City in the background of the climate variability

Nguyen Tien Thanh^{1,2}✉

¹ University of Science, HCM City, Viet Nam

² Viet Nam National University, HCM City, Viet Nam

✉ ntthanh@hcmus.edu.vn

Abstract. Relevance. Mangrove forests, especially thriving in the Mekong Delta and Ca Mau, play an important role in the ecosystem of southern Vietnam. A typical example is Can Gio mangrove forest in Ho Chi Minh City with an area of 35000 hectares, known as the "green lung" of the city. However, recently, the effects of climate change have made erosion worse due to changes in hydrodynamics and extreme weather events, leading to the shrinking forest areas. This affects not only the tourism industry but also aquaculture activities in the area. **Aim.** This study focuses on providing updated information on erosion and deposition at Dong Tranh Estuary, Can Gio District. Through this analysis, management agencies will have more basis to propose effective measures to protect and develop this area, especially in the increasingly complex climate change situation. **Methods.** Shoreline extraction method in combination with GIS to calculate the coastline change and combines with field surveys to check and analyze results, helping to clarify the causes of erosion and deposition. **Results.** Within the framework of the study, areas 2 and 3 were identified as places strongly affected by waves and tides, with serious erosion levels, especially in the Nang Hai area with erosion rates reaching – 3.9 m/year. In contrast, area 1, mainly affected by Dong Tranh Estuary, recorded a significant deposition rate, reaching 7.05 m/year. The results of this study are valuable as an important reference source, supporting the management and consolidation of coastlines, and proposing effective protection measures to limit erosion.

Keywords: shoreline extraction, GIS, erosion, deposition, Can Gio, Dong Tranh Estuary, NDVI

Acknowledgements: This research is funded by University of Science, VNU-HCM under grant number T2024-11.

For citation: Nguyen Tien Thanh. Shoreline fluctuation of Dong Tranh Estuary, Can Gio District, Ho Chi Minh City in the background of the climate variability. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4677

УДК 556.537(597)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4677

Колебания береговой линии реки Донг Чан, Район Кан Гио, Хошимин, на фоне изменчивости климата

Нгуен Тьен Тхань^{1,2}✉

¹ Университет науки, Вьетнам, г. Хошимин

² Национальный университет Вьетнама, Вьетнам, г. Хошимин

✉ ntthanh@hcmus.edu.vn

Аннотация. Актуальность. Мангровые леса, особенно процветающие в дельте Меконга и Камау, играют важную роль в экосистеме южного Вьетнама. Типичным примером является мангровый лес Кан Гио в Хошимине площадью 35000 гектаров, известный как «зеленые легкие» города. Однако в последнее время последствия изменения климата усугубили эрозию из-за изменений в гидродинамике и экстремальных погодных явлений, что привело к сокращению лесных площадей. Это влияет не только на индустрию туризма, но и на деятельность в области аквакультуры в этом районе. **Цель.** Настоящее исследование направлено на предоставление обновленной информации об эрозии и отложениях в устье реки Донг Трань в районе Кан Гио. Благодаря этому анализу у органов управления будет больше оснований предлагать эффективные меры по защите и развитию этой области, особенно во все более слож-

ной ситуации с изменением климата. **Методы.** Метод извлечения береговой линии в сочетании с ГИС для расчета изменения береговой линии и в сочетании с полевыми исследованиями для проверки и анализа результатов для уточнения причин эрозии и седиментации. **Результаты.** В рамках исследования районы 2 и 3 были определены как места, сильно подверженные воздействию волн и приливов, с серьезным уровнем эрозии, особенно в районе Нангхай, где скорость эрозии достигает $-3,9$ м/год. Напротив, в районе 1, находящемся главным образом под влиянием реки Донг Чан, была зафиксирована значительная скорость седиментации, достигающая $7,05$ м/год. Результаты этого исследования – важный справочный источник, поддерживающий управление береговыми линиями и их консолидацию, а также предлагающий эффективные меры защиты для ограничения эрозии.

Ключевые слова: извлечение береговой линии, ГИС, эрозия, отложения, Кан Гио, устье Донг Чан, NDVI

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Университета науки, Вьетнам, грант № T2024-11.

Для цитирования: Нгуен Тьен Тхань. Колебания береговой линии реки Донг Чан, Район Кан Гио, Хошимин, на фоне изменчивости климата // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 326. – № 4. – С. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4677

Introduction

Forests are considered as the "green lung" of the earth, they play a very important role in maintaining ecological balance and biodiversity on the planet. Therefore, protecting forests and forest resources has always become a task that cannot be postponed for all countries in the world, including Vietnam [1]. Vietnam has 29 provinces and cities with forests and coastal mangrove lands stretching from Mong Cai to Ha Tien. Mangrove forests have a large distribution area and thrive in the south, especially in the Ca Mau region – the Mekong Delta. In which, Can Gio mangrove forest with an area of 35000 hectares is considered as the "green lung" of Ho Chi Minh City. In addition, mangrove forests make an important contribution to preventing erosion caused by impacts from the sea such as storms, waves, currents, etc., creating shoreline stability for the area [2–4]. Under the impact of climate change in recent years, shoreline erosion has become more serious, causing the mangrove forest area to shrink and affecting not only the tourism industry but also aquaculture activities, seafood in the area [5]. Shoreline changes are not only the result of natural factors (river morphology, geological structures, currents, etc.), but also human interventions such as sand mining, navigation and build reservoir dams upstream [6]. Therefore, monitoring the evolution of shoreline changes in the Ho Chi Minh City area and predicting changing trends is necessary for the protection and sustainable management of the shoreline.

Around the world, many studies have used remote sensing data to classify water surfaces using multi-temporal satellite images, which are then overlaid to identify and evaluate shoreline changes.

Chettiyam Thodi et al. investigated the shoreline change at Vypin, Vallarpadam and Bolgatty islands using remote sensing images combined with GIS for the period from 1973 to 2019. The results show that that under the impact of human activities, these islands have been subjected to accretion on both sides of the coast, leading to the formation of new land areas. This is

determined through the analysis of statistical indicators such as Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), and Linear Regression Rate Calculate (Linear Regression Rate – LRR) in the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) [7]. Mondal et al. studied the Ghoramara island area in the Hugli estuary, West Bengal in India from 1972 to 2022 using remote sensing images. The results show that the average, minimum, and maximum EPR are -10.59 , -4.13 , and -35.93 , with greatest erosion in the north, southeast, and west regions [8]. Muhammad Yasir et al. used Landsat images and GIS technology to calculate shoreline changes in the Qingdao coastal area from 2000 to 2019. Using the parameters of NSM, EPR, and LRR in DSAS to analyze shoreline changes in the study area shows that the maximum deposition and maximum erosion achieved corresponding to the above three parameters are 266.07, 2391.85, 124.47 m/yr, and -142.55 , -1234.59 , -63.22 m/yr [9]. Ke Mu et al. has adjusted the position of the eastern coastline of Lai Chau Bay, China, using the Otsu algorithm and adjusted the tides in the period from 1984 to 2022 from remote sensing images of Landsat 5 (TM), Landsat 8 (OLI) and Sentinel-2 (MSI). They show that based on EPR and LRR methods more than 70% of sandy beaches are eroded for 79.54 and 85.58% [10].

Besides, there have been many studies on shoreline changes conducted in Vietnam in recent years. Phan Vo Tieu Phuong et al. calculated shoreline changes in the Tien Giang to Soc Trang area using remote sensing images combined with GIS, showing that in 2021–2023, the coastline length eroded by 63.71% and decreased to 59.03% for 2022–2023. In addition, we can see slight erosion in Tien Giang, Ben Tre and Soc Trang areas, while erosion increases rapidly in Tra Vinh area for 2021–2023 [11]. Le Van Tuan et al. applied Alesheikh's method on Landsat image data from 1990 to 2020 to study the level of riverbank fluctuations at Phu Da island. They used the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), an extension of

GIS, to calculate the extent of erosion and deposition during this time. The results show that this process occurs alternately, with erosion dominating. During the 30-year period from 1990 to 2020, the erosion area in Phu Da island area reached about 125.46 hectares. The smallest erosion range is 10 m, appearing on both sides and tail of the dune. The largest riverbank fluctuation measured is 723.83 m at the southern tip of the dune. This fluctuation, in which erosion predominates, plays an important role in the serious landslide phenomenon that has occurred in recent times [12]. Vuong Trong Kha et al. used Sentinel-2A satellite images taken on December 1, 2015 and March 9, 2020 to determine the water-land boundary on the basis of the automatic water separation index (AWEI), which is overlaid to detect river bank line changes. The results showed that, in the period from 2015 to 2020, the Chu River shoreline had very complex fluctuations, which recorded both erosion and deposition. The largest erosion rate is up to 37 m/yr in the center of the study area, where sand and gravel dredgers are concentrated [13].

Research area and methods

Research area

Can Gio district is located between East longitude from $106^{\circ}46'12''$ to $107^{\circ}00'50''$ and North latitude from $10^{\circ}22'14''$ to $10^{\circ}40'00''$. This area is famous for large estuaries such as Long Tau, Cai Mep, Go Gia, Thi Vai, Soai Rap, and Dong Tranh (Fig. 1). Can Gio has a sub-equatorial tropical monsoon climate, divided into two distinct seasons: the rainy season lasts from June to October and the dry season from November to May of the following year. In this area, average temperatures range from 25 to 29°C , and average humidity ranges from 73 to 85%. The average annual rainfall ranges from 1,300 to 1,400 mm, with the highest monthly rainfall (300–400 mm) in September. The prevailing

wind direction during the rainy season is southwest, with the strongest wind speeds occurring in July and August. In the dry season, the dominant wind direction shifts to northeast, with strong winds in February and March [14].

Data and methods

Data

Landsat 8 images were collected from the website of the US Geological Survey with a resolution of 30 m, less affected by clouds and very good image quality (Table 1). The study also used high-resolution Google Earth images to process and compare shoreline extraction results. In addition, this study conducted a shoreline survey in the Nang Hai area of Dong Tranh Estuary, Can Gio, Ho Chi Minh City to compare and contrast trends with the results of shoreline extraction.

The actual shoreline data series was measured with a GPS device (GPS map 76CSx) over the years 2013, 2015, 2017, 2024. Proceed along the edge of the forest for more than 200 m. The shoreline convention here is the boundary between the forest and the mudflats.

Shoreline data were collected in four surveys by the Departments of Oceanology, Meteorology and Hydrology.

- 1) Phase 1 on April 20, 2013
- 2) Phase 2 on February 4, 2015
- 3) Phase 3 on May 25, 2017
- 4) Phase 4 on March 24, 2024

Then, Mapsource software was used to retrieve the shoreline data from the GPS locator. Then the shoreline data were processed, eliminating unnecessary data (disturbed, overlapping and inconsistent with the actual shoreline). After processing, the shoreline data were imported into ArcGIS 10.5 software to calculate shoreline changes using the DSAS tool. Garmin GPS Map 76CSx handheld navigation device.

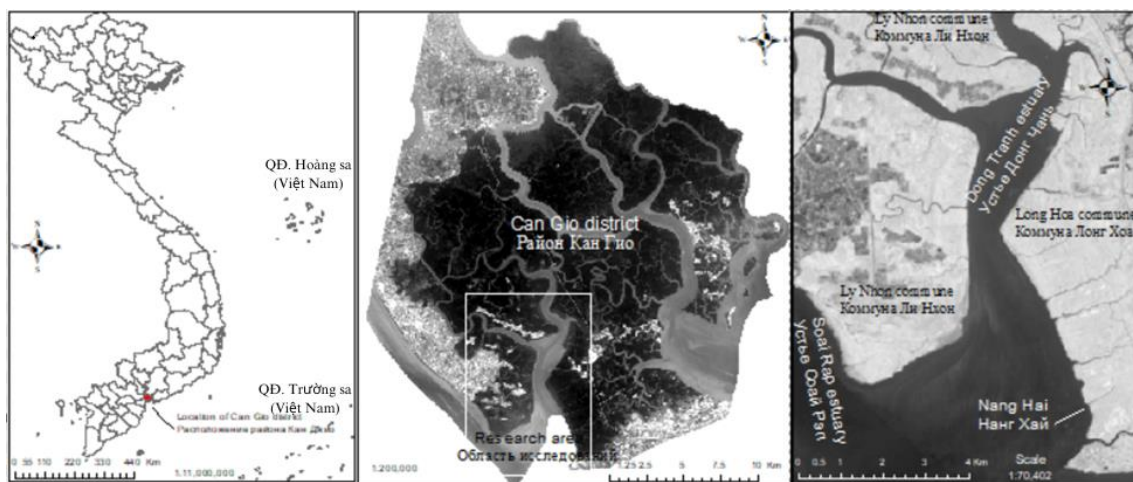


Fig. 1. Location of Can Gio District and research area

Рис. 1. Расположение района Кангио и территории исследования

Table 1. Collecting remote sensing images

Таблица 1. Сбор изображений дистанционного зондирования

Area Область	Collecting satellite images Сбор спутнико- вых снимков	Spatial resolution, m Пространствен- ное разрешение, м	Landsat images Изображения Landsat
Can Gio Кан Джо	26/10/2013	30	LC08
	18/02/2015		
	06/01/2017		
	17/03/2019		
	22/03/2021		
	22/03/2024		

Methods

The ENVI 5.1 tool is used in the research to process remote sensing images through the following steps:

1. *Geometric correction*: to correct errors that arise during image capture and standardize image coordinates to match other data sources, geometric correction is performed. The process is based on carefully selected geographical control points on the ground, such as forks and intersections of streets, or where rivers and streams meet. These points are evenly distributed throughout the area that needs correction to ensure the effectiveness of this process [15].
2. *Digital conversion to spectral reflectance value*: for reducing the discrepancy in spectral reflectance values of objects across various sensor types and images.
3. *Calculation of NDVI* (Normalized difference vegetation index) (Fig. 2).

For Landsat 8 OLI/TIRS images:

$$NDVI = \frac{B_5 - B_4}{B_5 + B_4}$$

In which, B5 is the near-infrared (NIR) channel and B4 is the red light channel (Red) [16].

The main goal of this step is to enhance the display of plant objects on the ground, in order to evaluate their development status. This is done through the NDVI index, which reflects the chlorophyll content in plants. A high NDVI index indicates that the vegetation in that area is growing well, while a low NDVI index indicates that the area has no vegetation or that the vegetation is growing poorly [17]. Then, the shoreline analysis results of each time period are placed on the corresponding Google Earth map to check and confirm the accuracy of the classification.

The research team conducted four field surveys in April 2013, February 2015, May 2017 and March 2024 in the Nang Hai area. During these surveys, the team collected important data such as the location of the shoreline, erosion sites, and encroached areas for clam flat farming. The results of this survey are intended to test and validate analyzes of shoreline fluctuations and help explain the causes of these fluctuations.

4. *Shoreline change analysis by applying DSAS*: to be able to assess shoreline changes quantitatively, we need to use the DSAS tool to help users calculate the extent of shoreline changes over time based on the complex position of the shoreline (Fig. 2) [18–20].

In DSAS, there are many statistical methods for calculating shoreline changes such as Net Shoreline Movement (NSM), EPR, LRR. The EPR method is considered as one of the best one to assess shoreline change because it is easy to calculate and it requires minimal shoreline data [21]. EPR value is calculated according to the formula:

$$EPR = \frac{\text{Distance between oldest and newest shorelines}}{\text{Time-lapse between shorelines}} \text{ (m/yr)}.$$

The calculation and analysis of the shoreline is carried out as follows:

- determination of baseline and shorelines;
- creation of horizontal secant lines perpendicular to the shore (transect);
- calculation of the shoreline change rate.

In this study, to determine the EPR value, I set the Baseline as the line outside the Dong Tranh Estuary, creating transects evenly spaced 20 m apart, a total of 1431 transects.

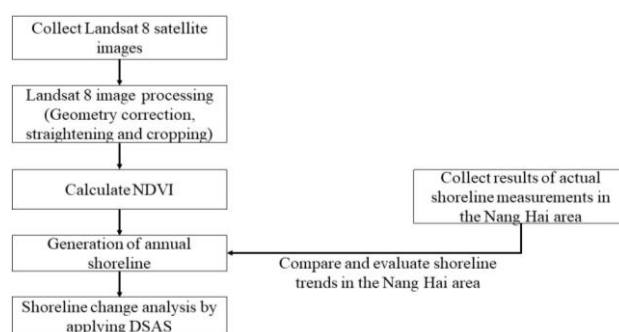


Fig. 2. Flowchart of the overall methodology adopted to conduct this study

Рис. 2. Блок-схема общей методологии, принятой для проведения данного исследования

Results and discussion

This study focuses on assessing shoreline changes in the Dong Tranh Estuary area, Can Gio, Ho Chi Minh City. The research area is divided into two main parts: area 1 is mainly affected by the Dong Tranh Estuary and is less affected by ocean waves; areas 2 and 3 are places directly affected by ocean waves (Fig. 3).

Analysis results show that during the period from 2013 to 2024 (Fig. 3), the shoreline of Dong Tranh Estuary area will have alternating erosion and deposition. The deposition mainly occurs in areas influenced by Dong Tranh Estuary and is less affected by ocean waves, while the erosion is concentrated in areas strongly affected by ocean waves

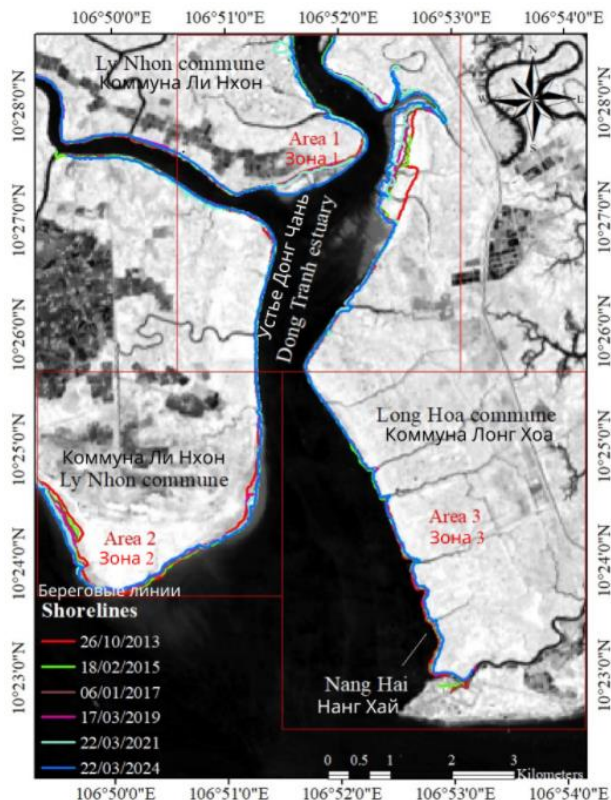


Fig. 3. Shoreline changes in Dong Tranh Estuary, Can Gio District from 2013 to 2024

Рис. 3. Изменения береговой линии в устьевых районах Донг Чан и Кан Гио в 2013–2024 гг.

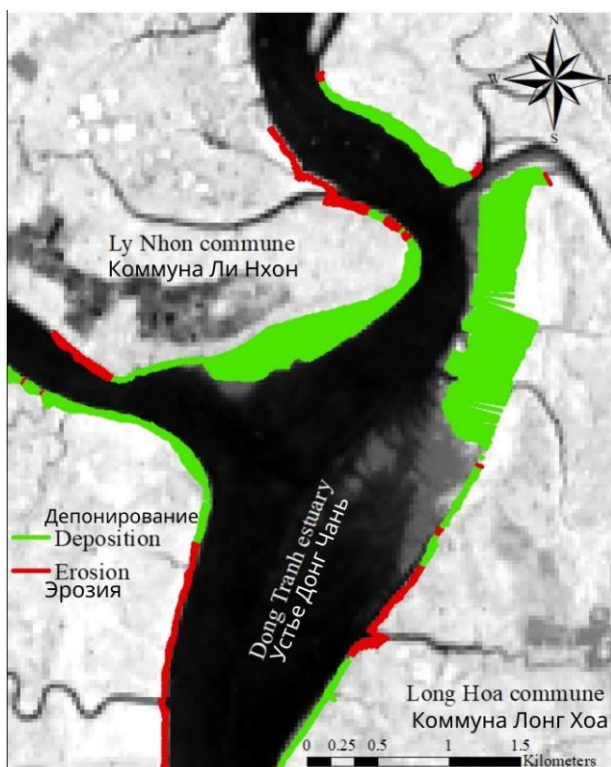


Fig. 4. Shoreline changes in area 1

Рис. 4. Изменения береговой линии на участке 1

Area 1 has a total of 770 transects, of which erosional transects are 231 and 30%, accretionary transects are 536 and 69.6% (Table 2). This area is mainly affected by the Dong Tranh Estuary, which tends to accumulate about 7.05 m/yr, forming mudflats hundreds of meters wide (Fig. 4). The cause of this phenomenon is due to the silt source from the Saigon and Dong Nai rivers during the flood season and the amount of sand and mud brought in during the southwest monsoon season. In addition, this area is not directly affected by waves created by Northeast and Southwest winds. The deposition phenomenon in Dong Tranh Estuary has made waterway transportation very difficult, only small boats can enter and exit, so mangrove forests are gradually encroaching on the river mouth, contributing to increasing the area of deposition capacitor for this area. This result is also quite consistent with previous studies. For example, Thu et al. calculated an accretion rate of about 4.75 m/yr [6], while Duong et al. estimated an accretion rate of about 35 and 29% in this area [22]. The erosion occurs relatively low in this area, only about -0.43 m/yr.

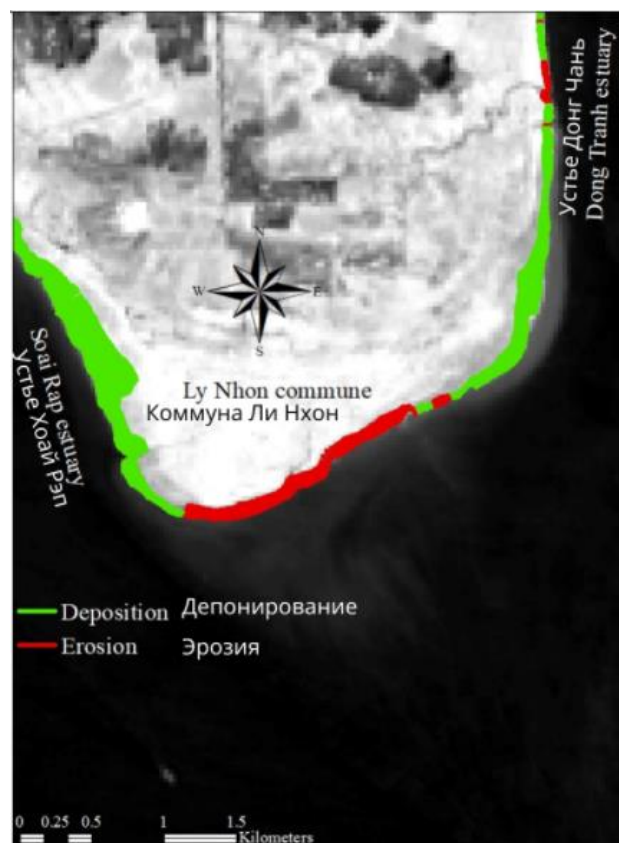


Fig. 5. Shoreline changes in area 2

Рис. 5. Изменения береговой линии на участке 2

Area 2 has a total of 391 transects, of which erosional transects are 124 and 31.7%, accretionary transects are 267 and 68.3% (Table 2). Area 2 belongs to the estuary of Soai Rap and Dong Tranh Estuary (Fig. 5), where the river bed is wide and shallow, the coast has a protruding nose and this area is directly affected by waves, so the coastline has many strong fluctuations, with alternating erosion and deposition phenomena [23]. Moreover, this area is concentrated with large shrimp ponds, the vegetation cover is lost, leading to reduced wave blocking ability [6]. In general, deposition is still more dominant than erosion, specifically deposition reaches 5.60 m/yr and erosion reaches -1.62 m/yr. The research results of Nam and his colleagues also show that erosion and deposition took place alternately for 1953–2010, with deposition being more dominant. Specifically, in the periods 1965–1973, 1989–1997 and 1997–2010, the accretion area was 136, 38.6 and 697 hectares respectively [24].

Area 3 has a total of 270 transects, of which erosion transects are 169 and 62.6%, accretion transects are 101 and 37.4% (Table 2). This area, like area 2, is directly affected by waves. In addition, this area has a straight coastline, a terrain type that is often affected by waves, so erosion occurs at high intensity, strength, especially in Nang Hai area (Fig. 6). Specifically, erosion reached -2.55 m/yr, deposition reached 0.31 m/yr, and in Nang Hai area, erosion reached -5.5 m/yr. GENESIS model results by Thanh et al. also shown that waves are the main cause of erosion in the Nang Hai area during the Northeast monsoon season [25]. According to the research by Yoshihiro Mazda et al., the erosion rate in Nang Hai is about 50 m/yr [26]. Calculation results of Hong Phuoc and Massel also confirmed that wave fields are the main cause of erosion in this area [27].

Actual survey results in the Nang Hai area show that the coastline is seriously eroded, especially the area near the creek (Fig. 7). Through the calculation results of 4 surveys of the Nang Hai coastline from April 20, 2013 to March 24, 2024, in general, the coastline only has erosion occurring at about -3.9 m/yr (Fig. 8). The survey results are consistent with the results of remote sensing image analysis. However, the actual survey erosion speed -3.9 m/yr is lower than the remote sensing image result -5.5 m/yr, possibly due to the resolution of the remote sensing image being 30 m lower than the remote sensing images resolution. GPS locator resolution is 3–15 m. In particular, in recent years, a lot of spontaneous oyster farming projects in the Nang Hai area have appeared (Fig. 9), which may be the cause of tidal and coastal current disturbances and the transmissions. These impacts can cause changes in erosion and deposition patterns, changes in turbidity, and local deposition. In addition, the Nang

Hai area is also partly affected by ship waves passing through the oyster farming area.

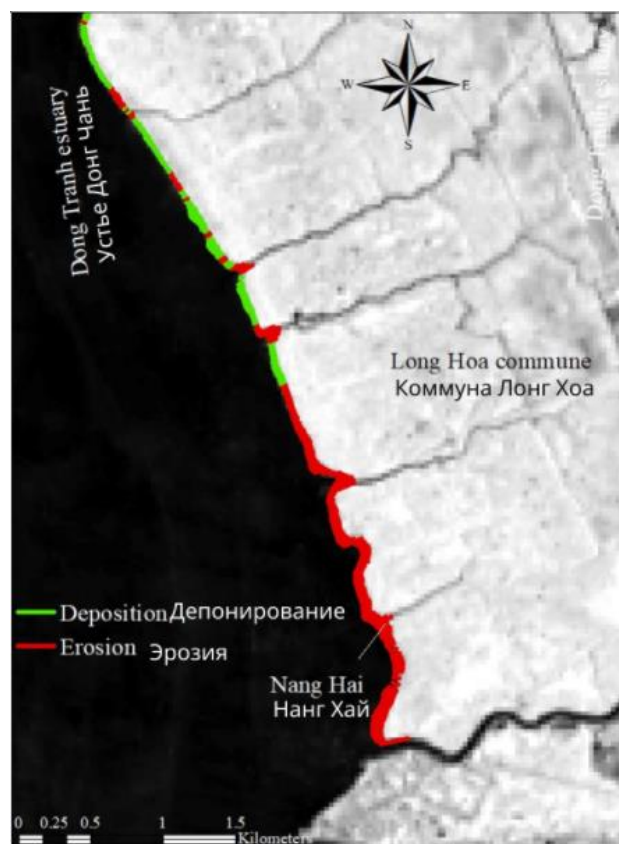


Fig. 6. Shoreline changes in area 3
Рис. 6. Изменения береговой линии на участке 3



Fig. 7. Field survey of Nang Hai area March 24, 2024
Рис. 7. Полевые исследования района Нангхай, 24 марта 2024 г.

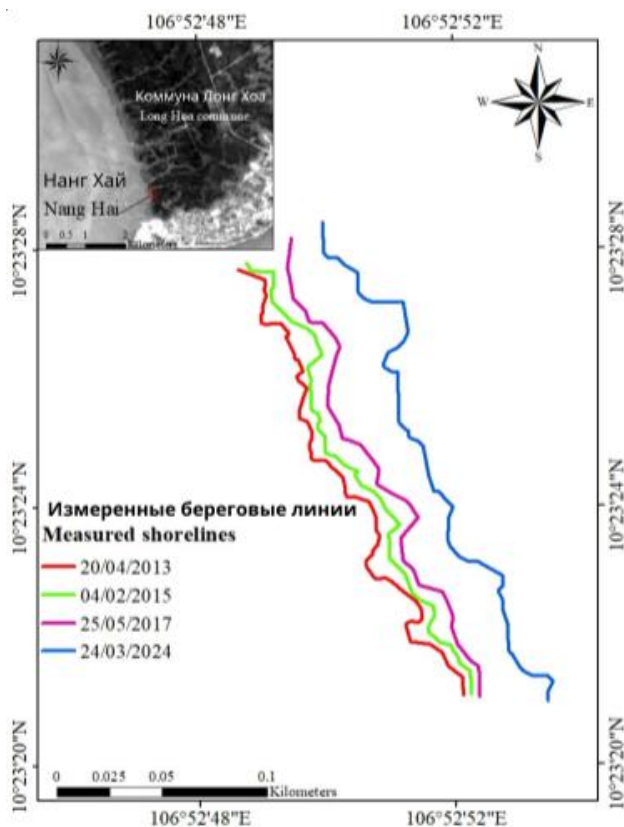


Fig. 8. Measured shoreline changes from 2013 to 2024

Рис. 8. Измеренные изменения береговой линии с 2013 по 2024 гг.

Conclusions

In this study, Landsat 8 remote sensing images were used to assess shoreline changes in the Dong Tranh Estuary area for 2013–2024. The results show that the shoreline is directly affected by waves and tides. As for Ly Nhon cape (area 2) and the southern area of Long Hoa (area 3), here erosion and deposition are concentrated mainly in the area affected by Dong Tranh Estuary (area 1).

The results of the shoreline survey in the Nang Hai area show that erosion has occurred at -3.9 m/yr. Under the effect of climate change and sea level rise in the near future, the erosion trend will continue in the future.

Overall, the results of this study can be used as a target reference for shoreline consolidation management and the introduction of limited protection measures. From there, it helps coastal authorities come up with appropriate strategic policies for economic development and shoreline protection.

Despite making the most of image sources and research methods, the quality of remote sensing images with limited spatial resolution can still affect the accuracy of research results. Therefore, it is necessary to use images with higher resolution to increase the accuracy of the results. In particular, more field survey points need to be carried out to compare and contrast with remote sensing data, ensuring the reliability and comprehensiveness of the research.

Table 2. Descriptive statistics of the research area

Таблица 2. Описательная статистика области исследований

Descriptive Statistics/Описательная статистика	Area 1/Зона 1	Area 2/Зона 2	Area 3/Зона 3	Total/Общий
Transect ID range Диапазон идентификаторов трансектов	271–1040	1041–1431	1–270	1–1431
Total number of transects/Общее количество трансектов	770	391	270	1431
Transects exhibiting erosion/Трансекты с эрозией	231	124	169	524
Transects exhibiting deposition Трансекты, демонстрирующие отложения	536	267	101	904
Stable transects/Стабильные трансекты	3	0	0	3
Percentage of transects exhibiting erosion (%) Процент трансектов с эрозией (%)	30	31.71	62.59	36.62
Percentage of transects exhibiting deposition (%) Процент трансектов, на которых наблюдаются отложения (%)	69.61	68.29	37.41	63.17
Percentage of stable transects Процент стабильных трансектов	0.39	0	0	0.21
Mean shoreline change (m/yr) Среднее изменение береговой линии (м/год)	6.62	3.98	-2.24	4.23
Maximum shoreline change (m/yr) Максимальное изменение береговой линии (м/год)	46.11	27.59	3.02	46.11
Minimum shoreline change (m/yr) Минимальное изменение береговой линии (м/год)	-13.39	-10.6	-15.23	-15.23
Mean erosion rate (m/yr) Средняя скорость эрозии (м/год)	-0.43	-1.62	-2.55	-1.16
Standard deviation for erosion rate (m/yr) Стандартное отклонение скорости эрозии (м/год)	1.13	2.82	2.98	2.29
Mean deposition rate (m/yr) Средняя скорость осаднения (м/год)	7.05	5.60	0.31	5.38
Standard deviation for deposition rate (m/yr) Стандартное отклонение скорости осаднения (м/год)	11.30	6.73	0.55	9.35



Fig. 9. Oyster farming in Nang Hai area, March 24, 2024

Рис. 9. Разведение устриц в районе Нангхай, 24 марта 2024 г.

REFERENCES

1. Vo M.H., Nguyen T.H., Tran Q.B. Using Landsat8 satellite image to establish mangrove forest map at Can Gio, Ho Chi Minh City. *Journal of Forestry Science and Technology (JFST)*, 2017, vol. 6, pp. 108–116.
2. Khushbu M., Seema M., Nilima C. Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangrove. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, vol. 7, pp. 2797–2818.
3. Ahmad Z., Luqman M., Suharni M., Noor S., Taib A., Shaheed M. Impact of coastal development on mangrove distribution in Cherating Estuary, Pahang, Malaysia. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 456–461.
4. Asner G.P. Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and air borne mapping approaches. *Environmental Research Letters*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 1–11.
5. Bui T.V., Huynh T.T., Le N.D.T., Ly M.H., Le T.P., Tran L.T.D. Monitoring and predicting the shoreline change in Can Gio area in condition of the sea level rise. *Science and Technology Development Journal*, 2014, vol. 17 (3), pp. 45–53.
6. Hoang T.T., Dao N.K., Pham T.L., Nguyen V.H. Analysis of riverbank changes in Ho Chi Minh city in the period 1989–2015. *Science of The Earth & Environment*, 2018, vol. 2, pp. 80–88.
7. Chettiyam Thodi M.F., Gopinath G., Surendran U.P., Prem P., Al-Ansari N., Mattar M.A. Using RS and GIS techniques to assess and monitor coastal changes of coastal islands in the marine environment of a humid tropical region. *Water*, 2023, vol. 15, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15213819>
8. Mondal B.K., Mahata S., Das R., Patra R., Basu T., Abdelrahman K., Fnais M.S., Praharaj S. Analysis of the shoreline changes using geoinformatics in Ghoramara Island of Hugli Estuary, West Bengal in India. *Journal of King Saud University – Science*, 2024, vol. 36, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.103014>
9. Yasir M., Sheng H., Fan H., Nazir S., Niang A.J., Salaududdin M.D., Khan S. Automatic coastline extraction and changes analysis using remote sensing and GIS technology. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 180156–180170. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3034707](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034707)
10. Mu K., Tang C., Tosi L., Li Y., Zheng X., Donnici S., Sun J., Liu J., Gao X. Coastline monitoring and prediction based on long-term remote sensing data—a case study of the eastern coast of Laizhou Bay, China. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16 (1):185. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16010185>
11. Phan V.T.P., Phạm T.H.H., Bùi T.L. Application of remote sensing, GIS to assess the rate and range of coastal erosion in the Mekong River Delta, from Tien Giang to Soc Trang Province. *Journal of Hydro Meteorology*, 2023, vol. 10, pp. 9–25.
12. Lê V.T., Nguyễn D.Q.H. Application of remote sensing and GIS to evaluate coastline variations in Phu Da isle area, Cho Lach district, Ben Tre province. *Journal Science and Technology Water Resources*, 2021, vol. 68, pp. 1–9.
13. Vuong T.K., Trinh L.H., Hoang N.H. Research for the impact of sand and gravel mining on Chu river bank change (in the intersection at Tho Xuan district, Thanh Hoa province) using remote sensing data. *Journal of surveying and mapping science*, 2020, vol. 44, pp. 5–10.
14. Nam V. N., Sinh L.V., Miyagi T., Baba S., Chan H.T. An overview of Can Gio District and Mangrove Biosphere Reserve. *ISME Mangrove Ecosystems Technical Reports*, 2014, vol. 6, pp. 1–8.
15. Nguyễn H.H., Nguyễn T.T.H., Lương T.T.T. Applications of GIS and multi-temporal Landsat images to quantify changes in extents of forest land in Xuan Dai and Kim Thuong buffer zones, Xuan Son National Park. *Vietnam Journal of Forest Science*, 2016, vol. 3, pp. 4524–4537.
16. Das S.K., Sajan B., Ojha C., Soren S. Shoreline change behavior study of Jambudwip island of Indian Sundarban using DSAS model. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*, 2021, vol. 24, pp. 961–970.
17. Zhao Q., Qu Y. The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote Sensing Observations. *Remote Sens.*, 2024, vol. 16, pp 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16071212>
18. Obiene E.A., Rowland E.D., Michael I.T.I. Analysis of shoreline changes in Ikoli River in Niger Delta region Yenagoa, Bayelsa State using Digital Shoreline Analysis System (DSAS). *Journal of Marine Science*, 2022, vol. 04, pp. 34–42.
19. Hossen M.F., Sultana N. Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2023, vol. 30, pp. 1–30.

20. Thieler E., Danforth W. Historical shoreline mapping (II): application of the digital shoreline mapping and analysis systems (dsms/dsas) to shoreline change mapping Puerto Rico. *J. Coast. Res.*, 1994, vol. 10 (3), pp. 600–620.
21. Gopinath G., Thodi M.F.C., Surendran U.P., Prem P., Parambil J.N., Alataway A., Al-Othman A.A., Dewidar A.Z., Mattar M.A. Long-term shoreline and islands change detection with digital shoreline analysis using RS Data and GIS. *Water*, 2023, vol. 15, pp. 1–18.
22. Duong P.T., Van T.T. Shoreline fluctuation of Can Gio district in the period 1998–2019. *Science & Technology Development Journal – Natural Sciences*, 2021, vol. 5, pp. 1555–1565.
23. Hai H.Q., Tuyen N.N. Coastal erosion in Can Gio, Ho Chi Minh city under the condition of global climate change. *Science & Technology Development*, 2011, vol. 14, pp. 1–28.
24. Nam V.N., Tri L.Q. Erosion and Accretion in the Can Gio Mangroves (1953 to 2010). *Tech. Rep.*, 2014, vol. 6, pp. 31–35.
25. Thanh N.T., Phuoc V.L.H. Analysis and evaluation of erosion and deposition processes in Dong Tranh estuary (Can Gio district, Ho Chi Minh city). *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 2019, vol. 19, pp. 221–231.
26. Mazda Y., Magi M., Nanao H., Kogo M., Miyagi T., Kanazawa N., Kobashi D. Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. *Wetlands Ecology and Management*, 2002, vol. 10, pp. 1–9.
27. Phuoc V.L.H., Massel S.R. Experiments on wave motion and suspended sediment concentration at Nang Hai, Can Gio mangrove forest, Southern Vietnam. *Oceanologia*, 2006, vol. 48, pp. 23–40.

Information about the author

Nguyen Tien Thanh, Lecturer, University of Science, 227 Nguyen Van Cu Street, Ward 4, District 5, HCM City, Viet Nam; Vietnam National University, Linh Trung Ward, Thu Duc City, HCM City, Viet Nam. ntthanh@hcmus.edu.vn; <https://orcid.org/0009-0001-8340-8444>

Received: 03.05.2024

Revised: 31.05.2024

Accepted: 31.01.2025

Информация об авторах

Нгуен Тьен Тхань, преподаватель, Университет науки, Вьетнам, г. Хошимин, Тху Дык, Линь Чунг Уорд; преподаватель, Национальный университет Вьетнама, Вьетнам, г. Хошимин, ул. Нгуен Ван Ку, 227, район 5; ntthanh@hcmus.edu.vn; <https://orcid.org/0009-0001-8340-8444>

Поступила в редакцию: 03.05.2024

Поступила после рецензирования: 31.05.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

УДК 622.276:553.98:550.832
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4696
Шифр специальности ВАК: 2.8.3, 2.8.4

Анализ тренда изменения плотности и характера распределения поровых каналов по размерам с использованием комплексного моделирования

М.О. Михайлов, Л.С. Кулешова, Р.Т. Ахметов, Р.А. Гилязетдинов✉

*Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском),
Россия, г. Октябрьский*

✉ gilyazetdinov_2023@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Представление о степени и характере распределения поровых каналов относительно их размеров на основе данных капилляриметрических исследований позволяет использовать кривые относительных фазовых проницаемостей для решения различных задач. В практике разработки месторождений известно значительное количество способов построения кривой распределения поровых каналов по размерам, в том числе с помощью обобщенной математической модели, как для всех образцов керна, так и для отдельных образцов породы. В условиях необходимости оперативного освоения трудноизвлекаемых запасов вопрос определения тренда изменения плотности и характера распределения поровых каналов по размерам является актуальным и требует решения, основанного на комплексировании известных научно-методических подходов и разработке принципиально новых аспектов интерпретации различных зависимостей. **Цель:** идентификация степени и характера изменения плотности распределения поровых каналов для снижения рисков при оптимизации процессов разработки месторождений и освоении трудноизвлекаемых запасов в условиях ограниченного объема внутрискважинных (промысловых) и керновых (лабораторных) исследований. **Объекты:** образцы керна пласта АВ_{1/3} алымской свиты месторождения N Западной Сибири, характеризующиеся неоднородным переслаиванием песчано-алевролитовых и глинистых пород с прослоями и линзами карбонатных отложений. **Методы:** комплексное использование известных научно-методических подходов к изучению тренда распределения поровых каналов по размерам в совокупности с построением различных математических моделей по результатам обобщения данных лабораторных исследований. **Результаты.** Построены кривые обобщенных и обратных обобщенных моделей для наиболее представительных образцов коллекторов Западной Сибири. Установлен вид и характер корреляционных связей, необходимых для расчета начального капиллярного давления и максимального радиуса поровых каналов. На основе обратной обобщенной модели капиллярной кривой с использованием лабораторных капилляриметрических исследований получена формула зависимости долевого относительного количества поровых каналов относительно их размеров (поперечных радиусов). Даны обоснованные рекомендации по использованию полученных зависимостей для решения как различных профильных задач разработки месторождений, так и фундаментальных, связанных с оптимизацией длительно эксплуатирующихся залежей и вводом трудноизвлекаемых запасов в промышленную эксплуатацию с учетом ограниченного числа разведочных скважин и, следовательно, минимального объема лабораторных исследований.

Ключевые слова: отдельная обобщенная модель, общая обобщенная модель, капилляриметрия, распределение поровых каналов по размерам, начальное капиллярное давление, разработка месторождений, компьютерное моделирование

Для цитирования: Анализ тренда изменения плотности и характера распределения поровых каналов по размерам с использованием комплексного моделирования / М.О. Михайлов, Л.С. Кулешова, Р.Т. Ахметов, Р.А. Гилязетдинов // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 16–24. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4696

UDC 622.276:553.98:550.832
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4696

Analysis of the trend of changes in density and the nature of the distribution of pore channels by size using complex modeling

M.O. Mikhailov, L.S. Kuleshova, R.T. Akhmetov, R.A. Gilyazetdinov✉

Ufa State Petroleum Technical University (branch in Oktyabrsky),
Oktyabrsky, Russian Federation

✉ gilyazetdinov_2023@mail.ru

Abstract. Relevance. The understanding of the degree and nature of the distribution of pore channels relative to their sizes based on capillarimetric studies allows us to use curves of relative phase permeability to solve various problems. In the practice of field development, a significant number of methods are known for constructing a pore channel size distribution curve, including using a generalized mathematical model for both all core samples and individual rock samples. In conditions of the need for the rapid development of hard-to-recover reserves, the issue of determining the trend of changes in density and the nature of the distribution of pore channels by size is relevant and requires a solution based on the integration of well-known scientific and methodological approaches and the development of fundamentally new aspects of the interpretation of various dependencies. **Aim.** Identification of the degree and nature of changes in the density of the distribution of pore channels to reduce risks when optimizing the processes of field development and development of hard-to-recover reserves in conditions of limited volume of downhole (field) and core (laboratory) studies. **Objects.** Core samples of the AB_{1/3} layer of the Aym formation of the deposit N of Western Siberia, characterized by an inhomogeneous interlayer of sandy-siltstone and clay rocks with interlayers and lenses of carbonate deposits. **Methods.** The integrated use of well-known scientific and methodological approaches to the study of the trend in the distribution of pore channels by size in conjunction with the construction of various mathematical models based on the results of generalization of laboratory research data. **Results.** Curves of generalized and inverse generalized models are constructed for the most representative samples of reservoirs in Western Siberia. The authors have established the type and nature of the correlations necessary for calculating the initial capillary pressure and the maximum radius of the pore channels. Based on the inverse generalized model of the capillary curve using laboratory capillarimetric studies, the authors obtained the formula for the dependence of the fractional relative number of pore channels relative to their sizes (transverse radii). Reasonable recommendations are given on the use of the obtained dependencies to solve both various profile tasks of field development and fundamental ones related to the optimization of long-term deposits and the commissioning of hard-to-recover reserves into commercial operation, taking into account the limited number of exploration wells and, consequently, the minimum amount of laboratory research.

Keywords: separate generalized model, general generalized model, capillarimetry, pore channel size distribution, initial capillary pressure, field development, computer modeling

For citation: Mikhailov M.O., Kuleshova L.S., Akhmetov R.T., Gilyazetdinov R.A. Analysis of the trend of changes in density and the nature of the distribution of pore channels by size using complex modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 16–24. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4696

Введение

Геометрию пустотного пространства пласта-коллектора в большинстве случаев представляют в виде пучка параллельных капилляров с постоянным поперечным сечением. Данная модель имеет допущения в связи с тем, что поровый объем коллектора имеет сложную и непостоянную форму, которая на протяжении всего этапа разработки залежи подвергается различным деформациям. Представление реального пустотного пространства породы-коллектора в виде приближенной имитационной модели значительно осложнено различными обстоятельствами, о чем свидетельствуют многочисленные работы [1–6] и значительное количе-

ство проводимых разнонаправленных лабораторных исследований на образцах-кернх. Одним из важнейших критериев, определяющих форму и тип пустотного пространства в коллекторах, является размер поровых каналов и их процентное соотношение в относительном количестве [7, 8]. Радиус каждого отдельного порового канала и его количественное соотношение в долях единиц в пустотном пространстве горных пород определяют ряд ключевых фильтрационно-емкостных и коллекторских параметров, таких как: эффективная пористость, относительные фазовые проницаемости, остаточная водонасыщенность, нефтенасыщенность и др. [9, 10]. Надежное их определение на различной

стадии разработки является шагом к оптимизации процесса нефтеизвлечения и подбора, например, наиболее подходящих составов для обработки призабойной зоны пласта или реализации потокоотклоняющих технологий в связи с необходимостью повышения технико-экономических показателей деятельности нефтегазодобывающих предприятий [11, 12]. На основе известных значений радиусов поровых каналов можно на достаточном высоком уровне спрогнозировать характер фильтрации жидкости в пористой среде с целью совершенствования научно-методических аспектов повышения эффективности эксплуатации месторождений на заключительной стадии. Исходя из вышепредставленного, задача мониторинга динамики изменения распределения поровых каналов по размерам является актуальной и требует комплексного подхода [13–16].

Методы и материалы

Известно, что плотность распределения поровых каналов $g(r)$ по поперечным радиусам есть отношение бесконечно малого приращения водонасыщенности к бесконечно малому приращению радиусов [17–20] (1):

$$g(r) = \frac{dK_B}{dr}. \quad (1)$$

В качестве базовых исходных данных используем результаты лабораторных капилляриметрических исследований пласта АВ_{1/3} одного из месторождений Западной Сибири (табл. 1). Для вычисления производной необходимо найти зависимость текущей водонасыщенности от радиуса поровых каналов, поэтому воспользуемся обобщенной моделью капиллярных кривых [21–23] (2):

$$\ln(pr_0) = a + b \ln K_B^* + c \ln^2 K_B^*, \quad (2)$$

где p – капиллярное давление, атм.; $r_0 = \sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}}$ – характерный радиус, мкм.; $K_B^* = \frac{K_B - K_{Bo}}{1 - K_{Bo}}$ – нормированная водонасыщенность, доли ед.; K_{Bo} – остаточная водонасыщенность, доли ед.; a, b и c – фиксированные параметры, определенные путем статистической обработки данных капиллярных исследований.

Таблица 1. Результаты лабораторных капилляриметрических исследований керновых образцов пласта АВ_{1/3}

Table 1. Results of laboratory capillarimetric studies of core samples of the formation АВ_{1/3}

№/No.	K_{no}	K_{np}	K_B						
			0,14	0,28	0,56	1,05	2,45	3,5	4,9
4	22,7	5,9	97,5	97,4	89,8	78,8	68,7	65,7	63,8
1	25,4	28,5	91,4	87,9	70,2	57,8	48,3	47,9	44,1
3	24,1	55,6	81,9	70,3	59,2	51,8	43,7	42,7	41,8
12	23,5	132,6	70,5	60,3	52,6	45,6	36,8	34,9	34,5
15	24,3	460	54,2	43,1	36,1	31,1	24,4	24,2	23,2

Построение обобщенной модели по данным лабораторных исследований произведем отдельно по трем наиболее представительным образцам, охватывающим целый спектр варьирования значений K_B , и в целом по всем исходным образцам. На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов по формуле (2) и интерпретаций исходя из данных табл. 1.

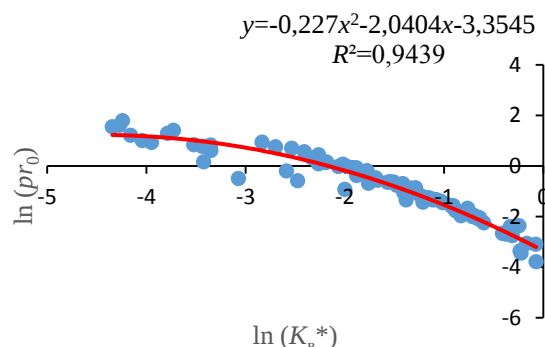


Рис. 1. Общая зависимость $\ln(pr_0)$ от $\ln(K_B^*)$ для всех образцов

Fig. 1. General dependence of $\ln(pr_0)$ on $\ln(K_B^*)$ for all samples

Для наиболее точного построения кривых распределения поровых каналов с минимальным значением погрешности необходимо определить начальное капиллярное давление. Рассчитаем искомый параметр при следующих условиях согласно [15] и исходя из этого определим, что точка пересечения обобщенной модели с осью ординат характеризует начальное капиллярное давление (3):

$$K_B = 1 \Rightarrow K_B^* = \frac{1 - K_{Bo}}{1 - K_{Bo}} = 1 \Rightarrow \ln 1 = 0; p_0 = \frac{e^a}{r_0}. \quad (3)$$

По данным формулы (3) определим максимальный радиус поровых каналов (формула Лапласа [19]) и сведем результаты расчетов в табл. 2 (4):

$$r_{max} = \frac{2\sigma \cos \theta}{p_0}. \quad (4)$$

Таблица 2. Результаты расчетов начального капиллярного давления и максимального радиуса для различных образцов

Table 2. Results of calculations of the initial capillary pressure and the maximum radius for different samples

№/No.	K_{no}	K_{np}	p_0	r_{max}
4	22,7	5,9	0,18	8,38
1	25,4	28,5	0,13	11,07
3	24,1	55,6	0,07	21,24
12	23,5	132,6	0,03	47,00
15	24,3	460	0,02	78,39

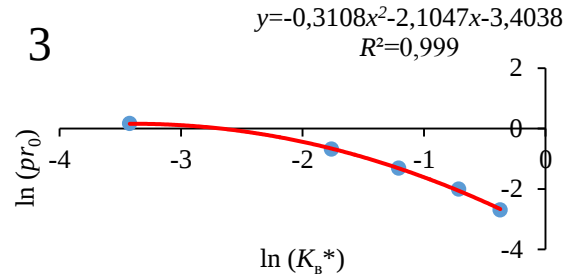
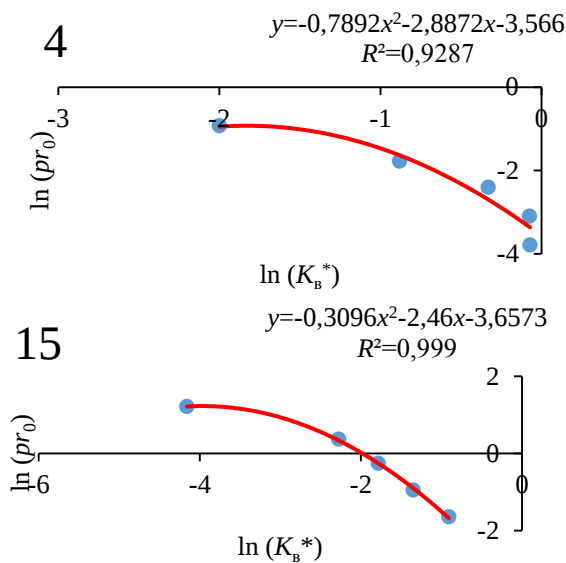


Рис. 2. Зависимость $\ln(pr_0)$ от $\ln(K_e^*)$ для наиболее представительных образцов

Fig. 2. Dependence of $\ln(pr_0)$ on $\ln(K_e^*)$ for the most representative samples

Результаты и обсуждения

Обобщенная математическая модель представляет собой зависимость произведения капиллярного давления на характерный радиус от нормированной водонасыщенности. Отразим зеркально оси координат ($K_e^* = f(p)$) и по аналогии определим вид и характер наиболее представительных математических моделей (рис. 3, 4).

Обобщенная модель на основе результатов исследований по всем образцам горных пород имеет следующий вид:

$$K_e^* = e^{-0,1171x^2 - 1,0242x - 2,2735}. \quad (5)$$

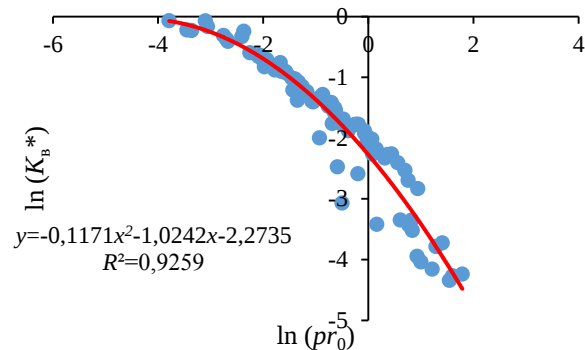


Рис. 3. Общая зависимость $\ln(K_e^*)$ от $\ln(pr_0)$ для всех образцов

Fig. 3. General dependence of $\ln(K_e^*)$ on $\ln(pr_0)$ for all samples

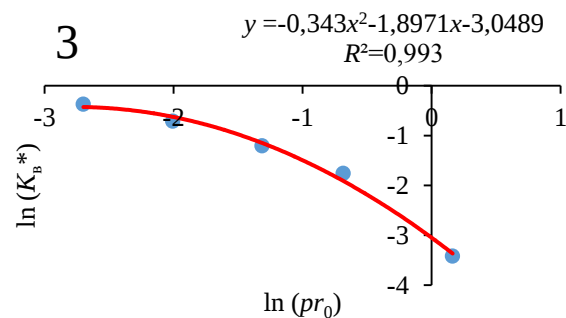
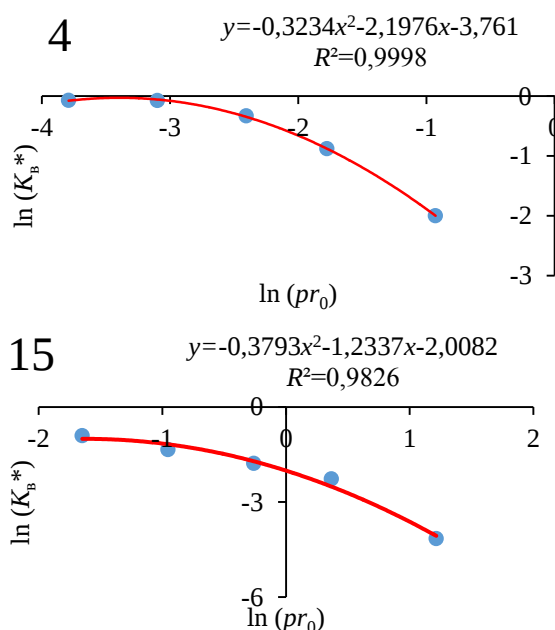


Рис. 4. Зависимость $\ln(K_e^*)$ от $\ln(pr_0)$ для наиболее представительных образцов

Fig. 4. Dependence of $\ln(K_e^*)$ on $\ln(pr_0)$ for the most representative samples

Таблица 3. Модели для определения плотности распределения поровых каналов дифференцированно по образцам и по всем образцам в целом

Table 3. Models for determining the density of the distribution of pore channels differentially across samples and across all samples as a whole

№/No.	Зависимость/Dependence
4	$g(r) = e^{-0.3234 \ln^2\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 2.1976 \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 3.761 \cdot \frac{0.6468 \cdot \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) + 2.1976}{r}}$
1	$g(r) = e^{-0.2897 \ln^2\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 1.8037 \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 2.9482 \cdot \frac{0.5794 \cdot \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) + 1.8037}{r}}$
3	$g(r) = e^{-0.343 \ln^2\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 1.8971 \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 3.0489 \cdot \frac{0.686 \cdot \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) + 1.8971}{r}}$
12	$g(r) = e^{-0.3364 \ln^2\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 1.4659 \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 2.2661 \cdot \frac{0.6728 \cdot \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) + 1.4659}{r}}$
15	$g(r) = e^{-0.3793 \ln^2\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 1.2337 \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 2.0082 \cdot \frac{0.7586 \cdot \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) + 1.2337}{r}}$
Общая General	$g(r) = e^{-0.1171 \ln^2\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 1.0242 \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) - 2.2735 \cdot \frac{0.2342 \cdot \ln\left(\frac{A \cdot r_0}{r}\right) + 1.0242}{r}}$

Преобразуем (5) до (6) и с использованием формулы Лапласа (7) получим полную зависимость текущей водонасыщенности от радиуса порового канала:

$$K_B = e^{-0.1171x^2 - 1.0242x - 2.2735} \cdot (1 - K_{B0}) + K_{B0}, \quad (6)$$

$$x = \ln(pr_0) = \ln\left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r} r_0\right) = \ln\left(\frac{Ar_0}{r}\right), \quad (7)$$

$$K_B = e^{-0.1171 \ln^2 \frac{Ar_0}{r} - 1.0242 \ln \frac{Ar_0}{r} - 2.2735} \cdot (1 - K_{B0}) + K_{B0}; A = 2\sigma \cos \theta \approx 1.44.$$

Для вывода зависимости плотности распределения поровых каналов от радиуса введем производную сложной функции и, трансформируя базовую модель (1), получим ряд уравнений (табл. 3). Распределения поровых каналов по размерам (относительное количество поровых каналов) по моделям общей обобщенной и отдельных обобщенных моделей представлены на рис. 5.

Тренд распределения поровых каналов с общей обобщенной моделью монотонно убывает по сравнению с аналогичными кривыми для отдельных обобщенных моделей, которые имеют экстремум в пределах значений 1–2 мкм, но при этом в области высоких значений поровых каналов составляет в среднем от 4–8, соответственно, что подтверждается результатами схожих работ [24–26].

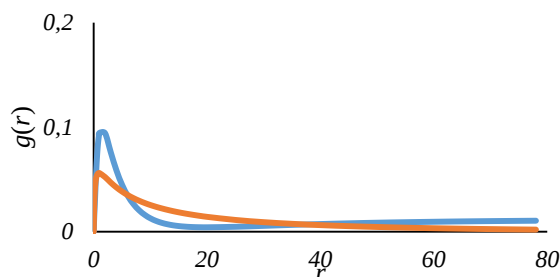
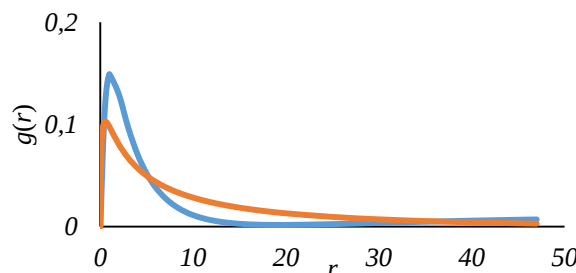
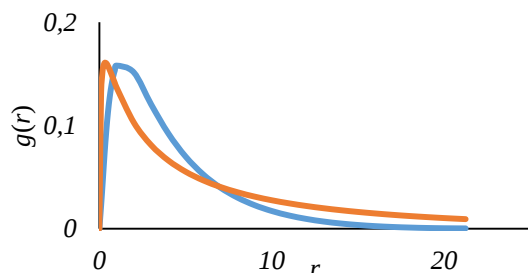
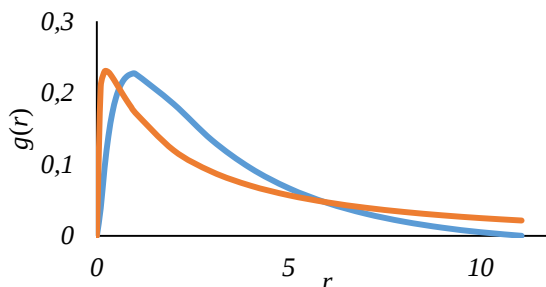
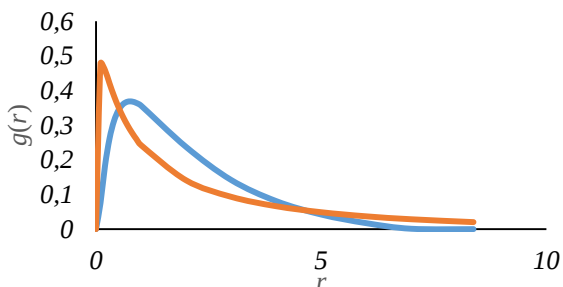


Рис. 5. Сравнительные графики распределения поровых каналов исследуемого объекта на основе отдельных (синие линии) и общей (красные линии) обобщенных метаматематических моделей

Fig. 5. Comparative graphs of the distribution of pore channels of the studied object based on separate (blue lines) and general (red lines) generalized metamathematical models

В зависимости от номера образца, предпочтительным для решения различных задач разработки месторождений является кривая распределения для общей обобщенной модели. Отдельная обобщенная модель может быть рекомендована для прикладных исследований при малых значениях поперечных радиусов (до 4–8 мкм), характерных, например, для некоторых продуктивных пластов тюменской свиты или в условиях начального этапа разбуривания залежи при ограниченном числе разведочных скважин и, следовательно, керновых исследований.

Выводы

1. На основании данных лабораторных капилляриметрических исследований пласта АВ_{1/3} месторождения N построены обобщенные и обратные обобщенные модели как дифференцированно по каждому из образцов, так и в целом по всем образцам. Обосновано установлены корреляционные связи, необходимые для расчета
2. При помощи обратной обобщенной модели и формулы Лапласа выведены эмпирические зависимости текущей водонасыщенности от размера поровых каналов, которые послужили фундаментом для описания плотности распределения поровых каналов относительно радиусов поперечных сечений по размерам.
3. Построены кривые распределения поровых каналов по размеру для наиболее представительных образцов керна при различных фильтрационно-емкостных показателях на основании отдельных и общей обобщенных моделей.
4. Отдельная обобщенная модель может быть использована на образцах кернов с малыми значениями радиусов поровых каналов (до 4–8 мкм). Для области больших значений радиусов поперечных сечений рекомендуется использовать зависимость, полученную при помощи общей обобщенной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование аналитической модели гидравлической извилистости поровых каналов коллекторов Западной Сибири по данным капиллярных исследований / Р.Т. Ахметов, Л.С. Кулешова, Э.Ф. Велиев, В.В. Мухаметшин, А.Р. Сафиуллина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 7. – С. 86–95. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3587.
2. Михайлов Н.Н., Сечина Л.С., Моторова К.А. Роль глинистых минералов в образовании адсорбционно-связанной нефти в породах-коллекторах углеводородного сырья // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2012. – № 1 (5). – С. 51.
3. Китаев А.П., Синева И.С. Применение методов машинного обучения для анализа изображений в задачах нефтегазовой литологии // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2022. – Т. 9. – № 1. – С. 116–126.
4. Ким О.О., Немова В.Д. Методика трехмерного геологического моделирования сложно построенных верхнеюрских отложений на примере Средне-Назымского месторождения нефти // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 12 (360). – С. 54–58. DOI: 10.33285/2413-5011-2021-12(360)-54-58.
5. Varkouhi Sh., Cartwright J.A., Tosca N.J. Anomalous compaction due to silica diagenesis - textural and mineralogical evidence from hemipelagic deep-sea sediments of the Japan Sea // Marine Geology. – 2020. – Vol. 426. – P. 106204. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106204.
6. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation / X. Du, Zh. Lu, D. Li, Y. Xu, P. Li, D. Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – № 173. – P. 447–461. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.077.
7. Обоснование модели абсолютной проницаемости с учетом фактора извилистости поровых каналов по данным капилляриметрических исследований / Р.Т. Ахметов, Л.С. Кулешова, В.В. Мухаметшин, П.М. Малышев, А.Р. Сафиуллина // SOCAR Proceedings. – 2022. – Special Iss. 1. – С. 1–8. DOI: 10.5510/OGP2022SI100639.
8. Ахметов Р.Т., Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Использование гантельной модели для определения абсолютной проницаемости коллекторов по кривым капиллярного давления // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 4. – С. 52–56. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-4(328)-52-56.
9. Повжик П.П., Демяненко Н.А. Разработка алгоритма исследований рабочих жидкостей для вскрытия и воздействия на низкопроницаемые и нетрадиционные коллектора // Инженер-нефтяник. – 2019. – № 4. – С. 16–22.
10. Зубков М.Ю. Возможности оценки емкостных свойств пород баженовской свиты // Каротажник. – 2024. – № 1 (327). – С. 90–113.
11. Results of capillary studies digital processing and interpretation with the aim of a pore channel size distribution function constructing / R.T. Akhmetov, L.S. Kuleshova, R.V. Vafin, V.V. Mukhametshin, Z.A. Garifullina, L.B. Akhmetianova // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 3. – P. 68–74. DOI: 10.5510/ogp20230300888.
12. Группирование эксплуатационных объектов на основе параметров обобщенной модели кривых капиллярного давления на примере ряда нефтяных месторождений Западной Сибири / Р.Т. Ахметов, В.В. Мухаметшин, Л.С. Кулешова, О.А. Грезина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3084.
13. Mason H.E., Smith M.M., Carroll S.A. Calibration of NMR porosity to estimate permeability in carbonate reservoirs // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2019. – Vol. 87. – P. 19–26. DOI: 10.1016/j.ijggc.2019.05.008.
14. Isotope diffusive exchange experiments for deriving porewater isotope composition in low-permeability rocks – improvements in experimental procedure and data processing / L. Aschwanden, H.N. Waber, F. Eichinger, T. Gimmi // Applied Geochemistry. – 2024. – Vol. 160. – P. 105844. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2023.105844.

15. A new nuclear magnetic resonance-based permeability model based on two pore structure characterization methods for complex pore structure rocks: permeability assessment in Nanpu Sag, China / W. Xie, Q. Yin, L. Wu, F. Yang, J. Zhao, G. Wang // *Geophysics*. – 2024. – Vol. 89 (1). DOI: 10.1190/geo2023-0026.1.
16. Evaluation of tieback developments for marginal oil fields with timing flexibility / S. Fedorov, V. Hagspiel, R.W. Rogstad, S. Haseldonckx, J.H. Haugsgjerd, A. Rønning // *Energy Economics*. – 2024. – Vol. 131. – P.107344. DOI: 10.1016/j.eneco.2024.107344.
17. Ding X., Li H., Ou S. A review of intelligent research dynamics in oil and gas exploration and development // *Academic Journal of Science and Technology*. – 2024. – Vol. 10. – № 1. – P. 100–104.
18. 3D petroleum reservoir modelling using seismic and well-log data to assess hydrocarbon potential in Abu Roash (G) Member, Karama Oil Field, North-Western Desert, Egypt / M. Mamdouh, M. Reda, M.Z.E. Din, T.H. Abdelhafeez // *Geological Journal*. – 2024. – № 59 (1). – P. 313–324. DOI: 10.1002/gj.4865.
19. A unified algorithm for the Young–Laplace method applied to porous media / A.M. Zabot, M.A. Camargo, F.G. Wolf, D.N. Siebert, R. Surmas, L.O.E. dos Santos, L.F. Pires // *Brazilian Journal of Physics*. – 2024. – Vol. 54 (3). – № 63. DOI: 10.1007/s13538-024-01442-w.
20. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China / H.E. Dengfa, J.I.A. Chengzao, Z.H.A.O. Wenzhi, X.U. Fengyin, L.U.O. Xiaorong, L.I.U. Wenhui, N. Zheng // *Petroleum Exploration and Development*. – 2023. – Vol. 50. – № 6. – P. 1333–1344. DOI: 10.1016/S1876-3804(24)60470-2.
21. Пятибратов П.В. О физическом смысле и определении коэффициента охвата в двучленной формуле расчета коэффициента извлечения нефти // *Нефтяное хозяйство*. – 2024. – № 4. – С. 80–83. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-4-80-83.
22. Мухидинов Ш.В., Шпар А.С. Возможности моделирования петрофизических свойств терригенных пород на основе их литологической характеристики // *Нефтяное хозяйство*. – 2024. – № 3. – С. 26–29. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-26-29.
23. Migration and accumulation mechanisms and main controlling factors of tight oil enrichment in a continental lake basin / H.U. Suyun, T.A.O. Shizhen, W.A.N.G. Min, P.A. Zhenglian, N.G. Bin, B.A.I. Yanyan, W.U. Yinye // *Petroleum Exploration and Development*. – 2023. – Vol. 50. – № 3. – P. 547–557. DOI: 10.1016/S1876-3804(23)60409-4.
24. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н., Туманова Е.С. Модели нелинейной фильтрации и влияние параметров нелинейности на дебит скважин в низкопроницаемых коллекторах // *Георесурсы*. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 44–50. DOI: 10.18599/grs.2021.4.5.
25. Азаров Е.С., Михайлов Н.Н., Фризен О.А. Определение потенциальных зон наличия капиллярно-защемленных запасов нефти // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2021. – № 11 (359). – С. 24–27. DOI: 10.33285/2413-5011-2021-11(359)-24-27.
26. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. К теории фильтрации в среде с двойной пористостью // *Доклады Академии наук*. – 2019. – Т. 484. – № 3. – С. 348–351. DOI: 10.31857/S0869-56524843348-351.

Информация об авторах

Максим Олегович Михайлов, ассистент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а. maximum.ing@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8929-8177>

Любовь Сергеевна Кулешова, кандидат технических наук, доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а. markl212@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2975-3666>

Расуль Тухбатуллович Ахметов, кандидат технических наук, профессор кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а. rasulofugntu@mail.ru

Руслан Альбертович Гилязетдинов, научный сотрудник кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, Институт нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьском), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а. gilyazetdinov_2023@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1931-7035>

Поступила в редакцию: 14.05.2024

Поступила после рецензирования: 11.07.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Veliyev E.F., Mukhametshin V.V., Safiullina A.R. Substantiation of the analytical model of hydraulic tortuosity of the pore channels of reservoirs in Western Siberia according to capillary studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 86–95. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3587.
2. Mikhailov N.N., Sechina L.S., Motorova K.A. The role of clay minerals in the formation of adsorption-bound oil in reservoir rocks of hydrocarbon raw materials. *Geo-resources, geo-energy, geopolitics*, 2012, no. 1 (5), p. 51. (In Russ.).

3. Kitaev A.P., Sineva I.S. Application of machine learning methods for image analysis in problems of oil and gas lithology. *Telecommunications and information technology*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 116–126. (In Russ.).
4. Kim O.O., Nemova V.D. Methodology of three-dimensional geological modeling of complex Upper Jurassic deposits on the example of the Sredne-Nazym oil field. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2021, no. 12 (360), pp. 54–58. (In Russ.) DOI: 10.33285/2413-5011-2021-12(360)-54-58.
5. Varkouhi Sh., Cartwright J.A., Tosca N.J. Anomalous compaction due to silica diagenesis - textural and mineralogical evidence from hemipelagic deep-sea sediments of the Japan Sea. *Marine Geology*, 2020, vol. 426, pp. 106204. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106204.
6. Du X., Lu Zh., Li D., Xu Y., Li P., Lu D. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 20196 no. 173, pp. 447–461. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.09.077.
7. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Malyshev P.M., Safiullina A.R. Substantiation of the absolute permeability model taking into account the tortuosity factor of pore channels according to capillarimetric studies. *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Iss. 1, pp. 1–8. DOI: 10.5510/OGP2022SI100639.
8. Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S. Using a dumbbell model to determine the absolute permeability of reservoirs from capillary pressure curves. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2019, no. 4, pp. 52–56. (In Russ.) DOI: 10.30713/2413-5011-2019-4(328)-52-56.
9. Povzhik P.P., Demyanenko N.A. Development of an algorithm for research of working fluids for opening and exposure to low-permeability and non-traditional collectors. *Inzhener-neftyanik*, 2019, no. 4, pp. 16–22. (In Russ.)
10. Zubkov M.Yu. Possibilities of assessing the capacitive properties of rocks of the Bazhenov formation. *Karotazhnik*, 2024, no. 1 (327), pp. 90–113. (In Russ.)
11. Akhmetov R.T., Kuleshova L.S., Vafin R.V., Mukhametshin V.V., Garifullina Z.A., Akhmetianova L.B. Results of capillary studies digital processing and interpretation with the aim of a pore channel size distribution function constructing. *SOCAR Proceedings*, 2023, no. 3, pp. 68–74. DOI: 10.5510/ogp20230300888.
12. Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Grezina O.A. Grouping of operational facilities based on the parameters of a generalized model of capillary pressure curves on the example of a number of oil fields in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 89–97. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3084.
13. Mason H.E., Smith M.M., Carroll S.A. Calibration of NMR porosity to estimate permeability in carbonate reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, vol. 87, pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.ijggc.2019.05.008.
14. Aschwanden L., Waber H.N., Eichinger F., Gimmi T. Isotope diffusive exchange experiments for deriving porewater isotope composition in low-permeability rocks – improvements in experimental procedure and data processing. *Applied Geochemistry*, 2024, vol. 160, pp. 105844. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2023.105844.
15. Xie W., Yin Q., Wu L., Yang F., Zhao J., Wang G. A new nuclear magnetic resonance-based permeability model based on two pore structure characterization methods for complex pore structure rocks: Permeability assessment in Nanpu Sag, China. *Geophysics*, 2024, vol. 89 (1). DOI: 10.1190/geo2023-0026.1.
16. Fedorov S., Hagspiel V., Rogstad R.W., Haseldonckx S., Haugsgjerd J.H., Rønning A. Evaluation of tieback developments for marginal oil fields with timing flexibility. *Energy Economics*, 2024, vol. 131, pp. 107344. DOI: 10.1016/j.eneco.2024.107344.
17. Ding X., Li H., Ou S. A review of intelligent research dynamics in oil and gas exploration and development. *Academic Journal of Science and Technology*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 100–104.
18. Mamdouh M., Reda M., Din M.Z.E., Abdelhafeez T.H. 3D petroleum reservoir modelling using seismic and well-log data to assess hydrocarbon potential in Abu Roash (G) Member, Karama Oil Field, North-Western Desert, Egypt. *Geological Journal*, 2024, no. 59 (1), pp. 313–324. DOI: 10.1002/gj.4865.
19. Zabet A.M., Camargo M.A., Wolf F.G., Siebert D.N., Surmas R., Dos Santos L.O.E., Pires L.F. Unified algorithm for the Young–Laplace method applied to porous media. *Brazilian Journal of Physics*, 2024, vol. 54 (3), no. 63. DOI: 10.1007/s13538-024-01442-w.
20. Dengfa H.E., Chengzao J.I.A., Wenzhi Z.H.A.O., Fengyin X.U., Xiaorong L.U.O., Wenhui L.I.U., Zheng N. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, vol. 50, no. 6, pp. 1333–1344. DOI: 10.1016/S1876-3804(24)60470-2.
21. Pyatibratov P.V. On the physical meaning and definition of the coverage coefficient in the binomial formula for calculating the oil recovery coefficient. *Oil industry*, 2024, no. 4, pp. 80–83. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-4-80-83.
22. Mukhidinov Sh.V., Shpar A.S. Possibilities of modeling the petrophysical properties of terrigenous rocks based on their lithological characteristics. *Oil industry*, 2024, no. 3, pp. 26–29. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2024-3-26-29.
23. Suyun H.U., Shizhen T.A.O., Min W.A.N.G., Zhenglian P.A., Bin N.G., Yanyan B.A.I., Yinye W.U. Migration and accumulation mechanisms and main controlling factors of tight oil enrichment in a continental lake basin. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, vol. 50, no. 3, pp. 547–557. DOI: 10.1016/S1876-3804(23)60409-4.
24. Zaitsev M. V., Mikhailov N. N., Tumanova E. S. Models of nonlinear filtration and the influence of nonlinearity parameters on the flow rate of wells in low-permeability reservoirs. *Geo resources*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 44–50. (In Russ.) DOI: 10.18599/grs.2021.4.5.
25. Azarov E.S., Mikhailov N.N., Friesen O.A. Identification of potential zones of capillary-trapped oil reserves. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2021, no. 11 (359), pp. 24–27. (In Russ.) DOI: 10.33285/2413-5011-2021-11(359)-24-27.
26. Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M. On the theory of filtration in a medium with double porosity. *Reports of the Academy of Sciences*, 2019, vol. 4846 no. 3, pp. 348–351. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869-56524843348-351.

Information about the authors

Maxim O. Mikhailov, Assistant, Ufa State Petroleum Technical University (branch in Oktyabrsky), 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russian Federation; maximum.ing@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8929-8177>

Lyubov S. Kuleshova, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technical University (branch in Oktyabrsky), 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russian Federation; markl212@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2975-3666>

Rasul T. Akhmetov, Cand. Sc., Professor, Ufa State Petroleum Technical University (branch in Oktyabrsky), 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russian Federation. rasulofugntu@mail.ru

Ruslan A. Gilyazetdinov, Researcher, Ufa State Petroleum Technical University (branch in Oktyabrsky), 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russian Federation; gilyazetdinov_2023@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1931-7035>

Received: 14.05.2024

Revised: 11.07.2024

Accepted: 31.01.2025

УДК 536.24

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4639

Шифр специальности ВАК: 1.3.14, 2.8.5

Повышение эффективности работы термостабилизатора за счёт распределения потоков хладагента внутри устройства и оребрения его поверхностей

А.Я. Гильманов^{1✉}, А.С. Ким², А.П. Шевелёв¹

¹ Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

² ООО «Альянс», Россия, г. Тюмень

✉ a.y.gilmanov@utmn.ru

Аннотация. Актуальность. Строительство протяжённых магистральных трубопроводов в условиях криолитозоны сопряжено с проблемой протаивания грунта под ними. Эффективным решением этой проблемы является использование двухфазных термостабилизаторов, расположенных рядом со сваями, на которых находится трубопровод. Для повышения эффективности работы устройства впервые предлагается проводить оребрение внутренней поверхности надземной части термосифона. **Цель:** определение оптимальных параметров оребрения поверхностей термосифона и количества сегментов разделяющего потоки хладагента устройства. **Объекты:** термостабилизатор, хладагент, тепло-массообмен, мерзлый грунт. **Методы.** Для определения оптимальных параметров конструкции устройства проводится физико-математическое моделирование процессов тепло-массообмена в системе окружающая среда–термостабилизатор–грунт. Разработанная модель использует законы неизотермической многофазной механики и включает выделение характерных подзадач с учётом симметрии протекающих процессов. Выделяется пять связанных подзадач: обдув надземной части термостабилизатора; конденсация теплоносителя внутри надземной части устройства; движение хладагента внутри разделяющего потоки устройства; восходящий поток теплоносителя в зазоре между корпусом термосифона и сегментами разделителя потоков; теплообмен термостабилизатора с мерзлым грунтом. **Результаты и выводы.** Проведена валидация предложенной модели путём сопоставления расчётных данных с замерами температурного профиля с использованием термокожуха для здания Государственного архива Салехарда. В работе показано, что увеличение размеров оребрения внешней поверхности подземной части термостабилизатора и сегментирование разделяющего потоки хладагента устройства позволяют равномерно охладить грунт в области, не подверженной сезонным протаиваниям. Установлено, что увеличение площади контакта хладагента с внутренней поверхностью надземной части термосифона за счёт оребрения этой поверхности позволяет повысить среднее значение предельной температуры окружающей среды, при которой работа устройства является эффективной.

Ключевые слова: криолитозона, термостабилизатор, физико-математическое моделирование, магистральные трубопроводы, оребрение, вертикальный температурный профиль, тепло-массообмен, хладагент

Для цитирования: Гильманов А.Я., Ким А.С., Шевелёв А.П. Повышение эффективности работы термостабилизатора за счёт распределения потоков хладагента внутри устройства и оребрения его поверхностей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 25–35. DOI: DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4639

UDC 536.24

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4639

Improving the efficiency of the heat stabilizer operation by distributing refrigerant flows inside the device and finning its surfaces

A.Ya. Gilmanov^{1✉}, A.S. Kim², A.P. Shevelev¹

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

² «Альянс» LLC, Tyumen, Russian Federation

✉ a.y.gilmanov@utmn.ru

Abstract. Relevance. The construction of long pipelines in the conditions of the cryolithozone is associated with the problem of soil thawing under them. An effective solution to this problem is the use of two-phase heat stabilizers located next to the piles. To increase the efficiency of the device, it is proposed to fin the inner surface of the aboveground part of the thermosyphon. **Aim.** To determine the optimal parameters of the finning of the thermosyphon surfaces and the number of segments of the device separating the refrigerant flows. **Objects.** Heat stabilizer, refrigerant, heat and mass transfer, frozen soil. **Methods.** The developed model uses the laws of non-isothermal multiphase mechanics. There are five related subtasks: blowing of the above-ground part of the heat stabilizer; condensation of the refrigerant inside the above-ground part of the device; movement of the refrigerant inside the flow-separating device; upward flow of the refrigerant; heat exchange of the heat stabilizer with frozen soil. **Results and conclusions.** The validation of the proposed model was carried out by comparing the calculated data with measurements of the temperature profile for the Salekhard State Archive building. The work shows that increasing the size of the fins of the outer surface of the underground part of the heat stabilizer and segmenting the device separating the refrigerant flows makes it possible to evenly cool the soil in an area not subject to seasonal thawing. It was found that increasing the contact area of the refrigerant with the inner surface of the aboveground part of the thermosyphon due to the finning of this surface makes it possible to increase the average value of the ambient temperature limit at which the device is effective.

Keywords: cryolithozone, heat stabilizer, physical and mathematical modeling, main pipelines, finning, vertical temperature profile, heat and mass transfer, refrigerant

For citation: Gilmanov A.Ya., Kim A.S., Shevelev A.P. Improving the efficiency of the heat stabilizer operation by distributing refrigerant flows inside the device and finning its surfaces. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 25–35. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4639

Введение

Значительная часть магистральных нефте- и газопроводов пролегает в высоких широтах, характеризующихся наличием криолитозоны. Тепловой поток от прокачиваемых углеводородов и окружающей среды приводит к деградации вечномёрзлого грунта, что вызывает деформации трубы, которые могут приводить к её прорыву и утечке нефтепродуктов [1, 2]. Такое явление имеет негативный экономический и экологический эффект. Чтобы это предотвратить, трубопроводы располагают на сваях над земной поверхностью. Однако и в этом случае тепловой поток в грунт за счёт теплопроводности через сваю негативно воздействует на криолитозону. Поэтому наиболее эффективным способом компенсации такого воздействия является использование термостабилизирующих устройств [3–5]. В силу большой протяжённости трубопроводов технические устройства, поддерживающие грунт в замороженном состоянии, должны отличаться высокой степенью автономности работы [6]. К таким устройствам относятся сезонные естественнoдействующие термосифоны [7]. Среди них можно выделить двухфазные устройства, в которых за счёт фазового перехода жидкость–пар количество теплоты, отбираемое у грунта в зимний период, существенно выше, чем у однофазных [8–10].

Вследствие значительной протяжённости трубопроводов климатические условия и свойства вечномёрзлого грунта существенно различаются между собой, что диктует необходимость подбора термостабилизаторов с индивидуальными характеристиками в каждом конкретном случае [11–13]. Такой подбор характеристик возможен только с использованием физико-математического моделирования тепловых и гидродинамических потоков

хладагента с учётом особенностей внешней среды [14, 15]. Стандартной инженерной практикой является использование лицензионного программного обеспечения, подробно описывающего теплообмен термостабилизатора с грунтом в трёхмерной постановке задачи [16]. Однако большое количество термосифонов с различными техническими характеристиками и различающимися условиями внешней среды делает такие расчёты трудоёмким и длительным процессом. В качестве замены такого подхода предлагаются упрощённые подходы к моделированию тепломассообмена в системе окружающая среда–термостабилизатор–грунт, которые могут быть использованы для экспресс-оценок эффективности работы этих устройств и определения их оптимальных параметров [17, 18].

Применимость установки во многом определяется соотношением температур хладагента и окружающей среды. Для эффективной работы устройства необходимо, чтобы характерное время циркуляции хладагента в термосифоне было больше, чем время его конденсации в надземной части устройства, поскольку в восходящем потоке происходит фазовый переход жидкость–пар [19–21]. В силу существенных колебаний температуры окружающей среды в условиях резко-континентального климата в арктических и субарктических районах России в зимний период времени температура воздуха может подниматься до значений, при которых интенсивность конденсации падает и в нисходящем потоке присутствует большое количество паровой фазы хладагента. В качестве технического решения такой проблемы впервые предлагается увеличение площади контакта теплоносителя с охлаждённой поверхностью термосифона за счёт оребрения внутренней поверхности его надземной части.

Для интенсификации тепловых потоков, поглощаемых термостабилизатором из грунта, предлагается увеличивать площадь их контакта за счёт оребрения внешней поверхности корпуса устройства.

При необходимости охлаждения грунта на глубинах до 20 м и больше для транспортировки теплоносителя до основания термосифона в жидком состоянии применяется разделяющая нисходящий и восходящий потоки хладагента труба с низким коэффициентом теплопроводности материала стенок, помещаемая внутрь устройства. Однако в таком случае возникает проблема падения эффективности охлаждения верхних слоёв грунта. Для более равномерного охлаждения авторами статьи предлагается выполнять разделяющее потоки устройство в виде одинаковых сегментов с небольшими зазорами h_c между ними, распределяющими подвод жидкого хладагента к стенкам корпуса термосифона.

Расчёт оптимальных параметров описанных конструкций термостабилизаторов требует разработки физико-математической модели на основе уравнений механики многофазных сред. Целью работы является определение оптимальных параметров оребрения поверхностей термосифона и количества сегментов разделяющего потоки хладагента устройства.

Материалы и методы

Для поддержания грунта в замороженном состоянии предлагается использовать сезонный двухфазный естественнодействующий термостабилизатор. В традиционной конструкции термосифона для интенсификации охлаждения теплоносителя используется оребрение внешней поверхности его надземной части (рис. 1) [22]. В работе для повышения эффективности конденсации теплоносителя предлагается использовать оребрение внутренней поверхности надземной части термосифона, выполненное в виде диаметрально расположенных пластин под одинаковым углом друг относительно друга (рис. 1). Кроме того, для интенсификации теплообмена в системе грунт–термостабилизатор предлагается выполнять оребрение внешней поверхности подземной части термосифона (рис. 1). Более равномерное распределение жидкого хладагента вблизи поверхности корпуса термостабилизатора осуществляется за счёт сегментирования разделяющего восходящий и нисходящий потоки теплоносителя устройства (рис. 1).

Для упрощения моделирования процессов теплопереноса в системе окружающая среда–термостабилизатор–грунт выделяется пять связанных подзадач: обдув надземной части термостабилизатора (первая); конденсация теплоносителя внутри надземной части устройства (вторая); движение хладагента внутри разделяющего потоки устройства

(третья); восходящий поток теплоносителя в зазоре между корпусом термосифона и сегментами разделителя потоков (четвёртая); теплообмен термостабилизатора с мёрзлым грунтом (пятая).

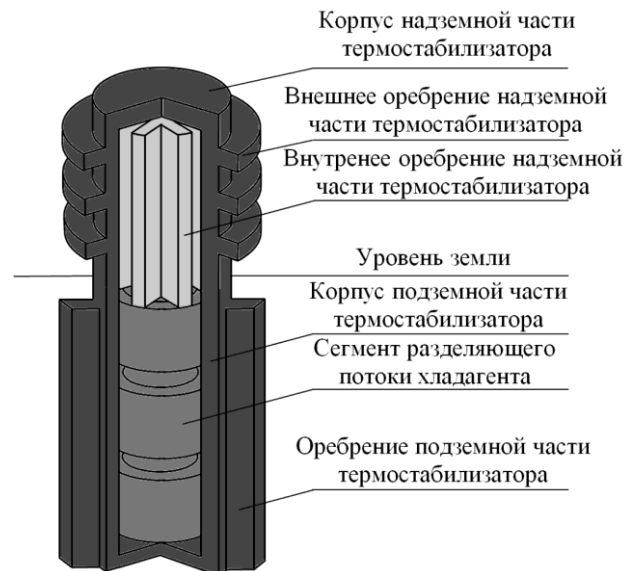


Рис. 1. Конструкция термостабилизатора с оребрением внутренней поверхности его надземной части и внешней поверхности подземной и сегментированием разделяющего потоки хладагента устройства

Fig. 1. Design of the heat stabilizer with finning of the inner surface of its above-ground part and the outer surface of the underground and segmentation of the device separating the refrigerant flows

При решении первой подзадачи принимается, что скорость ветра и температура окружающего воздуха задаются как средняя величина за весь зимний период в силу длительности этого периода, что в рамках интегрального подхода позволяет пренебречь суточными колебаниями этих величин. Кроме того, воздух считается идеальным газом. Решение этой подзадачи осуществляется с использованием эмпирического критериального уравнения [23]:

$$Nu = 0,763 Re^{0,5} Pr^{0,4} \left(\frac{T_a}{T_w} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта, безразмерная величина,

$$Nu = \frac{2\alpha r_{go}}{\lambda_a}, \quad (2)$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); r_{go} – латеральные размеры надземной части термосифона с учётом оребрения, м; λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); Re – число Рейнольдса, безразмерная величина,

$$Re = \frac{2P_a M_a v_a r_{go}}{\mu_a R T_a}, \quad (3)$$

μ_a , M_a , T_a – динамическая вязкость (Па·с); молярная масса (кг/моль) и температура воздуха (К) соответственно; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); P_a – атмосферное давление, Па; v_a – скорость ветра, м/с; Pr – число Прандтля, безразмерная величина,

$$Pr = \frac{\mu_a c_a}{\lambda_a}, \quad (4)$$

c_a – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); T_w – температура стенки надземной части термосифона, К, выражающаяся как:

$$T_w = T_a + \frac{\gamma - 1}{2} T_a \left(\frac{v_a}{v_{sa}} \right)^2, \quad (5)$$

γ – показатель адиабаты, безразмерная величина; v_{sa} – скорость звука в воздушной среде, м/с.

Из аналитического решения первой подзадачи (1)–(5) определяется температура оребрённой внутренней поверхности надземной части термосифона. Этот параметр связывает первую и вторую подзадачи.

В рамках второй подзадачи используются следующие допущения: теплообмен происходит практически мгновенно в силу высокого коэффициента теплопроводности материала корпуса термосифона, отсутствуют тепловые потери в системе корпус–хладагент. С учётом баланса тепла, выделяемого при конденсации теплоносителя в надземной части устройства, и тепла, поглощаемого окружающей средой, можно найти отношение времён конденсации и циркуляции в термосифоне хладагента – критерий полноты конденсации:

$$K_t = \frac{l \rho_f \pi r_{si}^2 (h_u + h_g)}{S_{gi} \alpha (T_s - T_w) t_h}, \quad (6)$$

где l , T_s и ρ_f – удельная теплота конденсации (Дж/кг); температура фазового перехода (К) и плотность жидкой фазы теплоносителя (кг/м³) соответственно; r_{si} – внутренний радиус разделяющего потока устройства, м; h_u и h_g – длина подземной и надземной частей термосифона, м; S_{gi} – площадь внутренней поверхности надземной части термостабилизатора с учётом оребрения, м²; t_h – характерное время циркуляции хладагента в термосифоне, с. В результате оребрения площадь внутренней поверхности надземной части устройства увеличивается на величину суммарной площади поверхности рёбер, которые имеют форму прямоугольного параллелепипеда.

Плотность жидкой фазы хладагента рассчитывается по уравнению состояния Редлиха–Квонга:

$$P = \frac{\rho_f R T P_c}{M_h P_c - 0,0866 \rho_f R T_c} - P_1, \quad (7)$$

$$P_1 = \frac{0,427 \rho_f^2 R^2 T_c^{2,5}}{\sqrt{T} M_h (M_h P_c + 0,0866 \rho_f R T_c)}, \quad (8)$$

где P – давление, Па, в надземной части термостабилизатора имеющее значение P_g , Па; T – температура, К; M_h – молярная масса хладагента, кг/моль; P_c и T_c – критические давление (Па) и температура теплоносителя (К); P_1 – слагаемое с размерностью давления в уравнении Редлиха–Квонга для жидкой фазы хладагента, Па.

Решение второй подзадачи (6)–(8) осуществляется аналитически, где кубическое уравнение решается методом Кардано, причём в качестве плотности жидкой фазы берётся наибольший корень уравнения.

Третья подзадача подразумевает, что за время конденсации хладагент полностью конденсируется и стекает под действием гравитационных сил вниз внутри разделяющего потоки устройства в таком состоянии за счёт низкого коэффициента теплопроводности материала этого устройства. Трением хладагента о стенки сегментов и потерями давления в зазорах между сегментами пренебрегается. Эта подзадача, как и все последующие, решается в стационарном приближении в силу длительности зимнего периода. С учётом симметрии задачи вводится вертикальная ось координат z , направленная вдоль длины подземной части термосифона. В рамках такой постановки распределение давления ищется из закона сохранения импульса вида

$$\frac{dP}{dz} = \rho_f g, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с², с граничным условием

$$P(z = 0) = P_g. \quad (10)$$

Решение третьей подзадачи (8)–(10) проводится аналитически и позволяет рассчитать давление вблизи нижнего основания термосифона, которое используется как граничное условие при решении четвёртой подзадачи.

В четвёртой подзадаче описывается одномерное движение восходящего потока двухфазного (жидкость, пар) хладагента в рамках односкоростного приближения с учётом притока жидкой фазы из зазоров между сегментами, причём нисходящими потоками пренебрегается. Система уравнений механики многофазных систем в данной постановке принимает следующий вид [23, 24]:

$$\frac{d(\rho_f \alpha_f v)}{dz} = -J, \quad (11)$$

$$\frac{d(\rho_g \alpha_g v)}{dz} = J, \quad (12)$$

$$\frac{1}{\rho_f \alpha_f + \rho_g \alpha_g} \frac{dP}{dz} + \frac{v^2}{2h_u} = g, \quad (13)$$

$$\frac{d((\rho_f \alpha_f c_f + \rho_g \alpha_g c_g) v T)}{dz} = q, \quad (14)$$

$$\alpha_f + \alpha_g = 1, \quad (15)$$

$$J = \frac{q v t_v}{l h_u}, \quad (16)$$

где ρ_g – плотность паров хладагента, кг/м³; α_f , α_g , c_f и c_g – массовое содержание (безразмерная величина) и удельные теплоёмкости (Дж/(кг·К)) жидкой и паровой фаз хладагента соответственно; v – скорость смеси фаз, м/с; q – объёмная интенсивность поглощения тепла термостабилизатором из грунта, Вт/м³; t_v – характерное время испарения хладагента, с; J – интенсивность массообмена жидкость–пар, кг/(м³·с).

Плотность паров хладагента определяется из уравнения состояния Редлиха–Квонга как наименьший корень этого уравнения:

$$P = \frac{\rho_g R T P_c}{M_h P_c - 0,0866 \rho_g R T_c} - P_2, \quad (17)$$

$$P_2 = \frac{0,427 \rho_g^2 R^2 T_c^{2,5}}{\sqrt{T} M_h (M_h P_c + 0,0866 \rho_g R T_c)}, \quad (18)$$

где P_2 – слагаемое с размерностью давления (Па) в уравнении Редлиха–Квонга для паров хладагента.

При решении четвертой подзадачи (8), (11)–(18) у нижнего основания термосифона задаются граничные условия:

$$P(z = h_u) = \rho_f g h_u + P_g, \quad (19)$$

$$T(z = h_u) = T_s, \quad (20)$$

$$\alpha_f(z = h_u) = 1, \quad (21)$$

$$v(z = h_u) = \sqrt{2gh_u}. \quad (22)$$

Разделяющее потоки имеет N_s одинаковых сегментов с номером $i=1, 2, \dots, N_s$, отсчитываемых сверху вниз; z_{ui} и z_{di} – вертикальные координаты (м) верхнего и нижнего основания сегмента с номером i . Тогда с учётом баланса массы и тепла можно записать граничные условия в зазоре между сегментами:

$$P(z = z_{di}) = P(z = z_{u,i+1}), \quad (23)$$

$$T(z = z_{di}) = \frac{C_{mb} T_b S_g v_b + S_c \rho_{fb} v_b c_f T_s}{C_{mb} S_g v_b + S_c \rho_{fb} v_b c_f}, \quad (24)$$

$$\alpha_f(z = z_{di}) = \frac{v_b \rho_{fb} \alpha_{fb} S_g + S_c \rho_{fb} v_b}{v_b \rho_{mb} S_g + S_c \rho_{fb} v_b}, \quad (25)$$

$$v(z = z_{di}) = \sqrt{2gz_{di}}, \quad (26)$$

$$C_{mb} = \rho_{fb} \alpha_{fb} c_{fb} + \rho_{gb} \alpha_{gb} c_{gb}, \quad (27)$$

$$\rho_{mb} = \rho_{fb} \alpha_{fb} + \rho_{gb} \alpha_{gb}, \quad (28)$$

где индекс b соответствует значению переменных при $z=z_{u,i+1}$; S_g – площадь сечения зазора между внешней трубой термосифона и разделяющим потоки устройством, м²; S_c – площадь боковой поверхности зазора между сегментами, м²; C_{mb} – объёмная теплоёмкость парожидкостной смеси при $z=z_{u,i+1}$, Дж/(м³·К); ρ_{mb} – плотность парожидкостной смеси при $z=z_{u,i+1}$, кг/м³.

Для решения четвертой подзадачи (8), (11)–(18) с учётом граничных условий (19)–(28) необходимо определять тепловой поток, поглощаемый термостабилизатором из грунта, из решения пятой подзадачи. В рамках такой подзадачи считается, что в грунте на эффективном расстоянии r_{ef} , м, устанавливается температура невозмущённого грунта T_r , К, учитывается, что стенка корпуса термостабилизатора стальная с коэффициентом теплопроводности материала λ_s , Вт/(м·К), имеет внутренний радиус r_{ti} , м, и внешний радиус r_{to} , м, оребрение внешней поверхности корпуса учитывается с помощью эффективного размера оребрения δ , м, определяемого в рамках развития концепции скин-фактора как половина латерального размера рёбер. На этот размер увеличивается внешний радиус трубы корпуса термостабилизатора при расчёте его теплообмена с грунтом. Коэффициент теплопроводности грунта λ_r , Вт/(м·К), тепловой поток, поглощаемый термостабилизатором из грунта, с учётом осевой симметрии из классического решения уравнения теплопроводности определяется как [25]

$$q(z) = \frac{2\pi(T_r - T(z))}{\left(\frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{r_{to} + \delta}{r_{ti}} + \frac{1}{\lambda_r} \ln \frac{r_{ef}}{r_{to} + \delta} + \frac{1}{\alpha_2 r_{ti}}\right) S_g}, \quad (29)$$

где коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности корпуса термосифона вычисляется как

$$\alpha = \frac{C_m v S_g (T(z) - T_s)}{2 \left(T(z) + \frac{q(z) S_g}{2\pi \lambda_s} \ln \frac{r_{to} + \delta}{r_{ti}} - T(z) \right) \pi r_{ti} h_u}. \quad (30)$$

где C_m – объёмная теплоёмкость парожидкостной смеси, Дж/(м³·К).

Решение этой подзадачи (29), (30) осуществляется численно с помощью метода простой итерации с точностью 99 %, решение связанной четвертой подзадачи проводится численно с использованием метода Эйлера.

Результаты и обсуждение

С использованием разработанной физико-математической модели проведены расчёты по

определению оптимальных параметров термосифона, позволяющих более эффективно охлаждать грунт. В таблице приведены параметры термостабилизатора, грунта и окружающей среды для здания Государственного архива в Салехарде, при которых проводились расчёты, причём r_{so} – внешний радиус сегментов разделяющего потоки устройства, м.

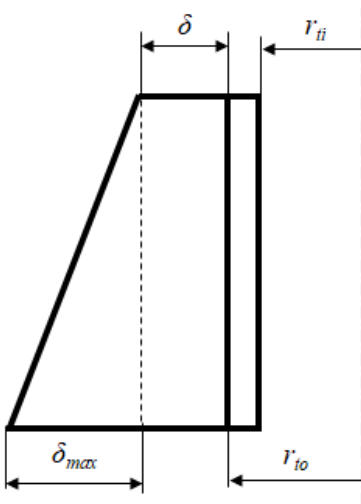


Рис. 2. Термостабилизатор с равномерным изменением латеральных размеров оребрения внешней поверхности его подземной части

Fig. 2. Heat stabilizer with a uniform change in the lateral dimensions of the fins of the outer surface of its underground part

Одним из перспективных способов увеличения теплового взаимодействия в системе термостабилизатор–грунт является оребрение внешней поверхности термосифона. Для более эффективного охлаждения грунта в нижней части термостабилизатора предлагается использовать оребрение, величина латеральных размеров которого равномерно увеличивается с глубиной (рис. 2), тогда в формуле

(29) с увеличением z подставляется линейно увеличивающееся значение δ (что соответственно увеличивает площадь боковой поверхности цилиндра).

Замеры вертикального температурного профиля в грунте с использованием термокосы показывают, что в распределении температуры имеется аномалия, вызванная наложением тепловых полей от летнего и зимнего периодов. В силу более длительного зимнего периода времени фронт промерзания грунта опускается ниже, чем фронт прогрева за летний период (рис. 3).

На рис. 3 коричневыми точками показаны данные замеров температуры с термокосы. Вертикальный температурный профиль в грунте на расстоянии 1 м от термосифона, рассчитанный по разработанной физико-математической модели при неизменных латеральных размерах оребрения подземной части термостабилизатора с характерными значениями параметров из таблицы, соответствует с погрешностью в пределах 10 % измеренному термокосой профилю температуры и изображён на рис. 3 синей линией. Такое соответствие свидетельствует о корректности разработанной модели. Равномерные увеличения латеральных размеров оребрения δ_{max} , м, у основания термосифона в 2, 3 и 4 раза по сравнению с его значением у начала подземной части устройства иллюстрируются зелёной, фиолетовой и голубой кривыми на рис. 3 соответственно. Видно, что охлаждение грунта становится более эффективным с увеличением латерального размера оребрения вследствие интенсификации тепловых потоков, поступающих в термостабилизатор. При увеличении этих размеров с постоянным шагом интенсивность снижения температуры нелинейно возрастает. Четырёхкратное увеличение размера оребрения вблизи основания термосифона позволяет охладить грунт практически равномерно, начиная с глубины 2 м, поэтому такие размеры оребрения рекомендуются в качестве оптимальных.

Таблица. Параметры термостабилизатора, грунта и окружающей среды для здания Государственного архива в Салехарде

Table. Parameters of the heat stabilizer, soil and environment for the Salekhard State Archive building

Параметр/Parameter	Значение/Value	Параметр/Parameter	Значение/Value	Параметр/Parameter	Значение/Value
h_w , м/м	10	N_s	1	T_a , К	236
h_g , м/м	3	λ_s , Вт/(м·К) W/(m·K)	70	T_s , К	243
r_{ef} , м/м	2	λ_r , Вт/(м·К) W/(m·K)	2	T_o , К	304
r_{to} , мм/mm	30	λ_a , Вт/(м·К) W/(m·K)	0,022	P_o , МПа/MPa	7,38
r_{ti} , мм/mm	27	γ	1,4	P_a , МПа/MPa	0,1
δ , мм/mm	15	v_{sa} , м/с/m/s	340	P_g , МПа/MPa	0,9
r_{so} , мм/mm	20	v_a , м/с/m/s	7	l , кДж/кг/kJ/kg	215
r_{si} , мм/mm	10	t_h , ч/h	8,33	c_a , кДж/(кг·К) kJ/(kg·K)	1,005
h_c , мм/mm	1	t_v , с/s	108	c_g , кДж/(кг·К) kJ/(kg·K)	0,791
r_{go} , мм/mm	50	M_a , г/моль/g/mol	29	c_f , кДж/(кг·К) kJ/(kg·K)	2,155
μ_a , мкПа·с/μPa·s	16,3	M_h , г/моль/g/mol	44		

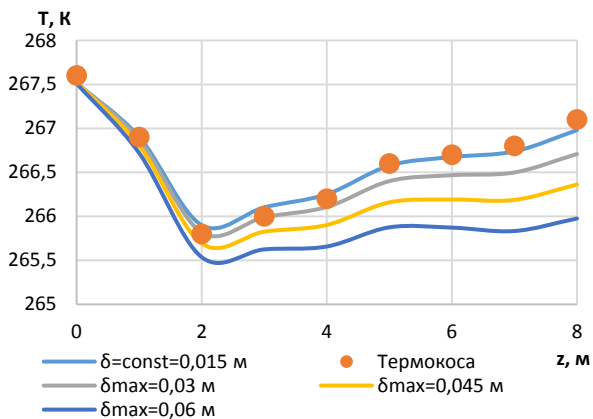


Рис. 3. Распределение температуры по глубине в грунте на расстоянии 1 м от термосифона для здания Государственного архива в Салехарде при различных размерах оребрения подземной части термостабилизатора

Fig. 3. Temperature distribution by depth in the ground at a distance of 1 m from the thermosiphon for Salekhard State Archive building at different sizes of the fins of the underground part of the heat stabilizer

Другим способом повысить эффективность охлаждения грунта за счёт более равномерного подвода жидкой фазы хладагента к внутренней поверхности корпуса термостабилизатора является сегментирование разделяющего внутренние потоки теплоносителя устройства. Влияние количества таких сегментов на вертикальный температурный профиль в грунте на расстоянии 1 м от термосифона приведено на рис. 4.

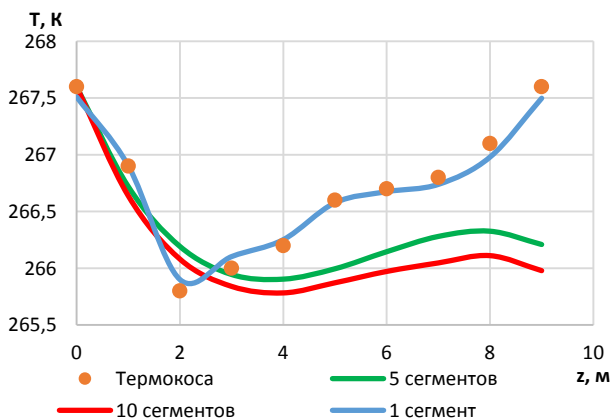


Рис. 4. Распределение температуры по глубине в грунте на расстоянии 1 м от термосифона для здания Государственного архива в Салехарде при различном количестве сегментов разделяющего внутренние потоки хладагента устройства

Fig. 4. Temperature distribution by depth in the ground at a distance of 1 m from the thermosiphon for Salekhard State Archive building with a different number of segments of the device separating the internal refrigerant flows

Коричневые точки на этом рисунке соответствуют замерам температуры с использованием термокосы. Термостабилизатор в стандартном исполнении имеет сплошное разделяющее потоки устройство. Модельные расчёты для такого термосифона с учётом его оребрения с параметрами из таблицы приведены на рис. 4 синей кривой. Описанный случай совпадает с синей кривой на рис. 3. При изготовлении разделяющего потоки устройства из 5 одинаковых сегментов (зелёная кривая на рис. 4) температура в грунте ниже 2 м, где отсутствует сезонное влияние, становится ниже более чем на 1 К. Изготовление разделяющего потоки устройства из 10 равных сегментов (красная кривая на рис. 4) позволяет снизить температуру в грунте ещё на 20 % относительно случая с 5 сегментами.

Эффективность охлаждения грунта определяется не только средними значениями температуры воздуха в зимний период работы термостабилизатора, но и продолжительностью этого периода. Длительность активного периода работы устройства определяется способностью хладагента конденсироваться за характерное время его циркуляции по термосифону. Если время конденсации хладагента больше, чем время циркуляции, и введённый критерий K_t (безразмерная величина) больше 1, то в подземную часть термостабилизатора поступает не полностью сконденсировавшийся теплоноситель, что резко снижает эффективность работы устройства, поскольку на понижение температуры грунта в значительной степени влияет теплота, отбираемая у него термосифоном при фазовом переходе хладагента.

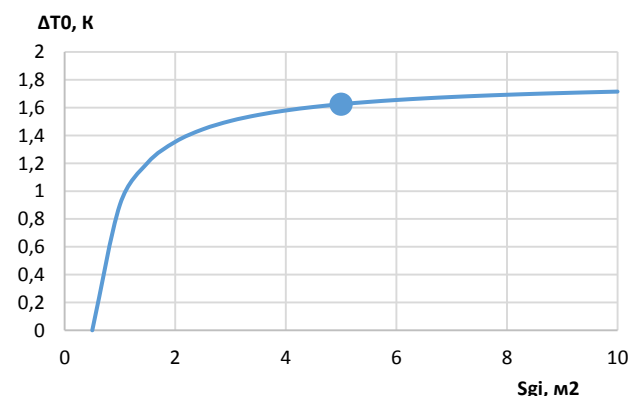


Рис. 5. Зависимость разницы предельных температур воздуха с оребрением и без оребрения внутренней поверхности надземной части термостабилизатора, при которых происходит конденсация хладагента, от площади этой поверхности

Fig. 5. Dependence of the difference in the maximum temperatures of air, at which the refrigerant condenses, on the area of this surface, with fins and without fins on the inner surface of the above-ground part of the heat stabilizer

Сократить время конденсации и увеличить границы рабочего диапазона средней температуры окружающего воздуха можно за счёт увеличения площади контакта теплоносителя с внутренней поверхностью надземной части термостабилизатора путём её оребрения.

На рис. 5 приведена зависимость разницы предельных температур ΔT_0 , К, окружающего воздуха с оребрением и без оребрения внутренней поверхности надземной части термостабилизатора, при которых происходит конденсация хладагента, от площади этой поверхности S_{gi} , m^2 . С увеличением площади оребрения указанная разница температур немонотонно увеличивается и после точки (рис. 5), соответствующей площади поверхности $S_{gi}=5 m^2$, практически выполаживается, что свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение оребрения не является эффективным.

Выводы

1. Разработана физико-математическая модель процесса тепломассопереноса в системе окружающая среда – термостабилизатор – мёрзлый грунт, учитывающая оребрение поверхностей термосифона и перераспределение потоков хладагента к поверхности корпуса.
2. Проведена валидация предложенной модели путём сопоставления расчётных данных со значениями вертикального температурного профиля по данным термокосы для здания Государственного архива Салехарда, показавшая совпадение результатов с погрешностью не более 10 %.
3. Показано, что использование сезонных термостабилизирующих естественнодействующих устройств на основе углекислоты является наиболее эффективным в регионах, характери-

зующихся средними показателями зимних температур не выше $-30^\circ C$.

4. Рассчитаны вертикальные температурные профили в грунте на удалении 1 м от термостабилизатора для здания Государственного архива Салехарда, и определены оптимальные технологические параметры оребрения и разделяющего потоки устройства, позволяющие эффективнее охлаждать грунт.
5. Установлено, что линейное увеличение размеров оребрения внешней поверхности подземной части термостабилизатора позволяет равномерно охладить грунт в области, не подверженной сезонным протаиваниям. Оптимальный латеральный размер оребрения вблизи основания термостабилизатора составляет 6 см, а у поверхности земли – 1,5 см.
6. Показано, что перераспределение потоков жидкого хладагента к корпусу термостабилизатора за счёт сегментирования разделяющего потоки устройства позволяет охладить грунт более равномерно, причём использование 10 сегментов дополнительно понижает температуру в грунте на 1,5 К по сравнению со сплошным разделителем потоков.
7. Установлено, что увеличение площади контакта хладагента с внутренней поверхностью надземной части термосифона за счёт оребрения этой поверхности позволяет снизить время конденсации теплоносителя и повысить среднее значение предельной температуры окружающей среды, при которой работа устройства является эффективной. Определена оптимальная площадь контакта хладагента с внутренней поверхностью надземной части термосифона, составляющая $5 m^2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of warm oil pipeline on underlying permafrost and cooling effect of thermosyphon based on field observations / F. Wang, G. Li, W. Ma, Y. Mu, Y. Mao, B. Wang // Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. – 2018. – P. 1424–1428. DOI: 10.1007/978-3-319-97115-5_115
2. Applicability analysis of thermosyphon for thermally stabilizing pipeline foundation permafrost and its layout optimization / F. Wang, G. Li, A. Fedorov, W. Ma, D. Chen, G. Wu, Y. Mu, X. Wang, H. Jing, Z. Zhang // Cold Regions Science and Technology. – 2023. – Vol. 208. – № 103769. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103769
3. Performance enhancement of air conditioning using thermosyphon system's energy storage unit for cooling refrigerant before entering the condenser / S. Juengjaroennirachon, N. Pratinthong, P. Namprakai, T. Suparos // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – Vol. 31. – № 1. – P. 393–400. DOI: 10.1007/s12206-016-1241-z
4. Ground-coupled natural circulating devices (thermosiphons): a review of modeling, experimental and development studies / M. Badache, Z. Aidoun, P. Eslami-Nejad, D. Blessent // Inventions. – 2019. – Vol. 4. – № 1. – P. 1–43. DOI: 10.3390/inventions4010014
5. Experimental study on thermal characteristics of thermosyphon with water condenser and LTES condenser in parallel (TWCLC) / L. Liu, Q. Zhang, H. Zheng, F. Meng // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 76. – № 109507. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.est.2023.109507
6. Centrifuge model test on performance of thermosyphon cooled sandbags supporting warm oil pipeline buried in thawing permafrost / G. Li, H. Jing, N. Volkov, W. Ma, F. Wang // Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. – 2018. – P. 1380–1384. DOI: 10.1007/978-3-319-97115-5_105
7. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезонноохлаждающими устройствами в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия) / В.М. Ефимов, Ю.К. Васильчук, И.И. Рожин, Ф.Е. Попенко, А.В. Степанов // Арктика и Антарктика. – 2017. – № 4. – С. 86–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25036

8. Unsteady experimental and numerical analysis of a two-phase closed thermosyphon at different filling ratios / D. Jafari, S. Filippeschi, A. Franco, P. Di Marco // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – Vol. 81. – P. 164–174. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.10.022
9. The thermal effect of heating two-phase closed thermosyphons on the high-speed railway embankment in seasonally frozen regions / J. Gao, Y. Lai, M. Zhang, D. Chang // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 141. – P. 948–957. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.061
10. Two-phase closed thermosyphon-induced frost jacking of piles and foundation instability in a thawed permafrost area / L. Guo, Q. Yu, N. Yin, Y. You, J. Wang, Y. Sun, K. Chen // *Natural Hazards*. – 2024. – Vol. 120. – P. 619–637. DOI: 10.1007/s11069-023-06169-6
11. Kukkapalli V.K., Kim J.-H., Kim S. Optimum design of thermosiphon evaporators for roadway embankment stabilization in the arctic regions // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2021. – Vol. 35. – № 10. – P. 4757–4764. DOI: 10.1007/s12206-021-0941-1
12. Zueter A.F., Newman G., Sasmito A.P. Numerical study on the cooling characteristics of hybrid thermosyphons: case study of the Giant Mine, Canada // *Cold Region Science and Technology*. – 2021. – Vol. 189. – № 4. – P. 1–16. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103313
13. Operating parameters optimization of a thermosyphon and compressor system used in 5G TBS / F. Meng, Q. Zhang, S. Zou, X. Zhu, L. Liu, S. Chen // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 241. – № 122331. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122331
14. Ишков А.А., Аникин Г.В. Математическая модель функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем // *Прикладная физика и математика*. – 2020. – № 5. – С. 12–16.
15. Ишков А.А., Аникин Г.В. Математическое моделирование функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем // *Нефтепромышленное дело*. – 2021. – № 2 (626). – С. 53–59.
16. Performance optimization of a two-phase closed thermosyphon through CFD numerical simulations / T. Bouhal, Y. Agrouaz, T. Kouskou, T. El Rhafiki, Y. Zeraoui // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 128. – P. 551–563. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.049.
17. Красношлыков А.С., Кузнецов Г.В. Численное моделирование тепловых режимов термосифонов // *Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума: в 3 т. Т. 1.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 25–28.
18. Heat performances of a thermosyphon as affected by evaporator wettability and filling ratio / Z. Xu, Y. Zhang, B. Li, C.C. Wang, Q. Ma // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 129. – P. 665–673. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.07
19. Nurpeis A., Orlova E., Ponomarev K. An experimental study of the influence of a thermosyphon filling ratio on a temperature distribution in characteristic points along the vapor channel height // *MATEC Web of Conference*. – 2017. – Vol. 110. – P. 1–5.
20. Srivastava A., Rathod M.K., Yarramsetty N. Heat transfer characteristics of a two-phase closed vertical thermosyphon: an experimental study // *Recent Advances in Thermal Sciences and Engineering*. – 2023. – P. 371–383. DOI: 10.1007/978-981-19-7214-0_31
21. Experimental study on the thermal performance of a novel two-phase loop thermosyphon under low-heat-flux conditions / L. Wang, W. Zhong, W. Min, Z. Wang, X. Cao // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 236A. – № 121447. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121447
22. Pinate W., Rittidech S., Meena P. Critical heat flux of a two-phase closed thermosyphon with fins // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2018. – Vol. 32. – № 5. – P. 2357–2364. DOI: 10.1007/s12206-018-0447-7
23. Сахин В.В., Герлиман Е.М., Брыков Н.А. Теплопередача в примерах и задачах. – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2019. – 165 с.
24. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. – 464 с.
25. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

Информация об авторах

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем физико-технического института, Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; a.y.gilmanov@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Андрей Сергеевич Ким, заместитель директора ООО «Альянс», Россия, 625025, г. Тюмень, пр. Можайский, 32. 3659696@mail.ru

Александр Павлович Шевелёв, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем физико-технического института Тюменский государственный университет, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; a.p.shevelev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Поступила в редакцию: 31.03.2024

Поступила после рецензирования: 20.05.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

- Wang F., Li G., Ma W., Mu Y., Mao Y., Wang B. Influence of warm oil pipeline on underlying permafrost and cooling effect of thermosyphon based on field observations. *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, 2018, pp. 1424–1428. DOI: 10.1007/978-3-319-97115-5_115
- Wang F., Li G., Fedorov A., Ma W., Chen D., Wu G., Mu Y., Wang X., Jing H., Zhang Z. Applicability analysis of thermosyphon for thermally stabilizing pipeline foundation permafrost and its layout optimization. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, vol. 208, no. 103769, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103769
- Juengjaroennirachon S., Pratinthong N., Namprakai P., Suparos T. Performance enhancement of air conditioning using thermosyphon system's energy storage unit for cooling refrigerant before entering the condenser. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, no. 1, pp. 393–400. DOI: 10.1007/s12206-016-1241-z
- Badache M., Aidoun Z., Eslami-Nejad P., Blescent D. Ground-coupled natural circulating devices (thermosiphons): a review of modeling, experimental and development studies. *Inventions*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 1–43. DOI: 10.3390/inventions4010014
- Liu L., Zhang Q., Zheng H., Meng F. Experimental study on thermal characteristics of thermosyphon with water condenser and LTES condenser in parallel (TWCLC). *Journal of Energy Storage*, 2024, vol. 76, no. 109507, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.est.2023.109507
- Li G., Jing H., Volkov N., Ma W., Wang F. Centrifuge model test on performance of thermosyphon cooled sandbags supporting warm oil pipeline buried in thawing permafrost. *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, 2018, pp. 1380–1384. DOI: 10.1007/978-3-319-97115-5_105
- Efimov V.M., Vasilchuk YU.K., Rozhin I.I., Popenko F.E., Stepanov A.V.. Modeling of the temperature regime of soil bases with seasonal cooling devices in the cryolithozone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Antarctic*, 2017, 4, pp. 86–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25036 (In Russ.)
- Jafari D., Filippeschi S., Franco A., Di Marco P. Unsteady experimental and numerical analysis of a two-phase closed thermosyphon at different filling ratios. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 81, pp. 164–174. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.10.022.
- Gao J., Lai Y., Zhang M., Chang D. The thermal effect of heating two-phase closed thermosiphons on the high-speed railway embankment in seasonally frozen regions. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 141, pp. 948–957. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.061
- Guo L., Yu Q., Yin N., You Y., Wang J., Sun Y., Chen K. Two-phase closed thermosyphon-induced frost jacking of piles and foundation instability in a thawed permafrost area. *Natural Hazards*, 2024, vol. 120, pp. 619–637. DOI: 10.1007/s11069-023-06169-6
- Kukkapalli V.K., Kim J.-H., Kim S. Optimum design of thermosyphon evaporators for roadway embankment stabilization in the arctic regions. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, vol. 35, no. 10, pp. 4757–4764. DOI: 10.1007/s12206-021-0941-1
- Zueter A.F., Newman G., Sasmito A. P. Numerical study on the cooling characteristics of hybrid thermosiphons: Case study of the Giant Mine, Canada. *Cold Region Science and Technology*, 2021, vol. 189, no. 4, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103313
- Meng F., Zhang Q., Zou S., Zhu X., Liu L., Chen S. Operating parameters optimization of a thermosyphon and compressor system used in 5G TBS. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 241, no. 122331, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122331
- Ishkov A.A., Anikin G.V. A mathematical model of the functioning of soil temperature stabilization systems with a horizontal evaporator. *Applied Physics and Mathematics*, 2020, no. 5, pp. 12–16. (In Russ.)
- Ishkov A.A., Anikin G.V. Mathematical modeling of the functioning of soil temperature stabilization systems with a horizontal evaporator. *Oilfield business*, 2021, no. 2 (626), pp. 53–59. (In Russ.)
- Bouhal T., Agrouaz Y., Kousksou T., El Rhafiki T., Zeraouli Y. Performance optimization of a two-phase closed thermosyphon through CFD numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 128, pp. 551–563. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.049.
- Krasnoshlykov A.S., Kuznetsov G.V. Numerical simulation of thermal modes of thermosiphons. *Intelligent power systems: proceedings of the III International Youth Forum*. Tomsk, TPU Publ. House, 2015. Vol. 1, pp. 25–28. (In Russ.)
- Xu Z., Zhang Y., Li B., Wang C.C., Ma Q. Heat performances of a thermosyphon as affected by evaporator wettability and filling ratio. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 129, pp. 665–673. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.073.
- Nurpeiis A., Orlova E., Ponomarev K. An experimental study of the influence of a thermosyphon filling ratio on a temperature distribution in characteristic points along the vapor channel height. *MATEC Web of Conference*, 2017, vol. 110, pp. 1–5.
- Srivastava A., Rathod M.K., Yarramsetty N. Heat transfer characteristics of a two-phase closed vertical thermosyphon: an experimental study. *Recent Advances in Thermal Sciences and Engineering*, 2023, pp. 371–383. DOI: 10.1007/978-981-19-7214-0_31
- Wang L., Zhong W., Min W., Wang Z., Cao X. Experimental study on the thermal performance of a novel two-phase loop thermosyphon under low-heat-flux conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 236A, no. 121447. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121447.
- Pinate W., Rittidech S., Meena P. Critical heat flux of a two-phase closed thermosyphon with fins. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32, no. 5, pp. 2357–2364. DOI: 10.1007/s12206-018-0447-7
- Sahin V.V., Gerliman E.M., Brykov N.A. *Heat transfer in examples and problems*. St. Petersburg, Baltic State Technical University, 2019. 165 p. (In Russ.)
- Nigmatulin R.I. *Dynamics of multiphase media*. Moscow, Nauka. The main editorial office of the Physics and Mathematics literature Publ., 1987. P. 1, 464 p. (In Russ.)
- Lykov A.V. *Heat and mass transfer: reference book*. 2nd ed., reprint and additional. Moscow, Energiya Publ., 1978. 480 p. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander Y. Gilmanov, Cand. Sc., Senior Lecturer, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; a.y.gilmanov@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Andrey S. Kim, Deputy Director, «Alians» LLC, 32, Mozhaisky passage, Tyumen, 625025, Russian Federation; 3659696@mail.ru

Alexander P. Shevelev, Cand. Sc., Professor, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; a.p.shevelev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Received: 31.03.2024

Revised: 20.05.2024

Accepted: 31.01.2025

УДК 551.21:553.08 (470.5)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Геология и минеральный состав флюидолитов мезо-кайнозойского этапа развития активизированных структур Полярного Урала

В.А. Душин, С.Г. Суставов, И.А. Власов, Д.И. Прокопчук[✉]

Уральский государственный горный университет, Россия, г. Екатеринбург

[✉]uva9090@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* работы связана с выяснением роли наиболее молодых гипогенных процессов в становлении мезозойско-кайнозойского мегакомплекса Полярного Урала. *Цель:* исследование минерального состава флюидолитов как своеобразных нетрадиционных образований, связанных с функционированием под давлением водно-газовых потоков в пределах активизированных тектонических структур Байдарацкого блока. *Методология и методы:* обобщение, анализ и синтез материалов многолетнего изучения геологии и минерализации Полярного Урала, включая проведение ГДП-200/2 листов R-42-XXXI, XXXII, Q-42-I, II, VII, VIII и Программы «Приоритет 2030». Изучение морфологии, внутреннего строения, химического состава флюидолита осуществлено в научно-исследовательском лабораторном центре Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург). Морфологическое изучение было проведено с помощью оптического микроскопа МБС 10 в отраженном свете и сканирующего электронного микроскопа VEGA LMS фирмы TESCAN; состав минералов определялся с использованием энергодисперсионной приставки Xplores 30 Oxford Instruments, программы «Aztec» U=20 кВ, I=3 нА. Рентгенографические исследования выполнены с помощью дифрактометра POWDIX 600. *Результаты.* Флюидолиты как продукты флюидно-газовых процессов приурочены к оперяющим швам Себета-Хуутинской системы разломов. Они имеют сложный полиминеральный состав, где наряду с преобладающими водными сульфатами железа и магния – магнезиокопиапитом, эпсомитом с продуктами его дегидратации и фиброферритом, присутствуют более редкие, такие как славикит и микрокристаллы точно не диагностированного сульфата, содержащего в составе магний и железо. С обломочным силикатным материалом среди игольчатых скоплений фиброферрита установлены мелкие кристаллы каолинита и встречены участки «микрокавернозного» строения, где среди сульфатов сравнительно равномерно распределен алюмосиликатный тонкодисперсный материал. В составе последнего иногда встречаются скопления наноминералов, содержащих калий. *Выводы.* Получены новые данные по минералогическому составу флюидолитов как продуктов гипогенных флюидно-газовых процессов квартала, близких к фумарольным явлениям, в пределах Байдарацкого блока Полярного Урала.

Ключевые слова: Полярный Урал, Байдарацкий блок, флюидолиты, активизированные структуры, минерализация, кора выветривания, славикит

Благодарности: Работа подготовлена при участии научно-исследовательского лабораторного центра Уральского государственного горного университета и при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Геология и минеральный состав флюидолитов мезо-кайнозойского этапа развития активизированных структур Полярного Урала / В.А. Душин, С.Г. Суставов, И.А. Власов, Д.И. Прокопчук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг госресурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 36–46. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554

UDC 551.21:553.08 (470.5)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554

Geology and mineral composition of fluidolites of the Meso-Cenozoic stage of development of activated structures of the Polar Urals

V.A. Dushin, S.G. Sustavov, I.A. Vlasov, D.I. Prokopchuk[✉]

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

[✉]uva9090@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to clarify the role of the youngest hypogenic processes in the formation of the Mesozoic-Cenozoic megacomplex of the Polar Urals. **Aim.** To study the mineral composition of fluidolites as peculiar unconventional formations associated with the functioning of pressurized water and gas flows within the activated tectonic structures of the Baydaratsky block. **Methodology and methods.** Generalization, analysis and synthesis of materials from the long-term study of the geology and minerageny of the Polar Urals, including the implementation of GDP200/2 sheets R-40-XXXI, XXXII, Q-42-I, II, VII, VIII and the Priority 2030 Program. The study of the morphology, internal structure, and chemical composition of the fluidolite was carried out at the research laboratory center of the Ural State Mining University (Yekaterinburg). The morphological study was carried out using an optical microscope MBS 10 in reflected light and a scanning electron microscope VEGA LMS from TESCAN; the composition of minerals was determined using an energy dispersive prefix Xplore 30 Oxford Instruments, the program "Aztec" U=20 kV, I=3 hA. X-ray examinations were performed using a POWDIX 600 diffractometer. **Results.** Fluidolites as products of fluid-gas processes are confined to the feathering seams of the Sebeta-Huuta fault system. They have a complex polymineral composition, where, along with the predominant aqueous sulfates of iron and magnesium – magnesiocopiapite, epsomite with their dehydration products fibroferrite, there are rarer ones, such as slavikite and microcrystals of an accurately undiagnosed sulfate containing magnesium and iron. Along with the clastic silicate material, small kaolinite crystals were found among needle clusters of fibroferrite and areas of a "microcavernous" structure were found, where aluminosilicate fine-dispersed material is relatively evenly distributed among sulfates. Clusters of nanominerals containing potassium are sometimes found in the composition of the latter. **Conclusions.** New data have been obtained on the mineralogical composition of fluidolites, as products of hypogenic fluid-gas processes of the quarter, close to fumarolic phenomena within the Baidaratsky block of the Polar Urals.

Keywords: Polar Urals, Baydaratsky block, fluidolites, activated structures, minerageny, weathering crust, slavikite

Acknowledgements: The research was prepared assisted by the research laboratory center of the Ural State Mining University (Yekaterinburg) and financially supported by the program of strategic academic leadership.

For citation: Dushin V.A., Sustavov S.G., Vlasov I.A., Prokopchuk D.I. Geology and mineral composition of fluidolites of the Meso-Cenozoic stage of development of activated structures of the Polar Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 36–46. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4554

Введение

В сложившихся к настоящему времени представлениях об эволюции Полярного Урала основное внимание уделялось докембрийской и палеозойской эпохам его становления, тогда как мезозойско-кайнозойский мегакомплекс относительно слабо освещен в литературе. Это вызвано, с одной стороны, ограниченным распространением за исключением квартера, мезозойских осадков в горной части Урала, а с другой – сложностью определения возраста и бытующим представлением о его невысокой перспективности в отношении рудных полезных ископаемых. Подобная ситуация начала постепенно исправляться в связи с обнаружением мезозойских фосфоритов гипогенно-гипергенного генезиса в бассейне р. Бол. Пайпудыны (Сафроновское месторождение) и фосфорно-урановых (Високосное проявление) в бассейне р. Нярма Яхи [1, 2].

Первые сведения о корях выветривания были получены П.Д. Миклухо-Маклаем в 1955 г. по карбонатным породам харотской свиты [3]. Затем в 1960-х гг. В.И. Краснокутским в районе оз. Есто-То была обнаружена кора выветривания с повышенным содержанием фосфора, алюминия, никеля, кобальта, марганца, а в среднем течении р. Нарма-Яхи при проведении ГСР-50 [2] тюменскими геологами (Ю.Ю. Эрвье, В.Г. Криночкин и др.) совместно с сотрудниками Шабровской экспедиции выявлено первое рудопроявление гипогенно-гипергенных урансодержащих брекчиевых фосфо-

ритов. Естественно, это привело к более пристальному изучению «молодых» мезозойско-кайнозойских процессов и структур их проявления, а также влияния последних на общую потенциальную рудоносность территории.

Формирование мезозойско-кайнозойских тектонических структур Полярного Урала имеет длительную, многоэтапную геологическую историю. Их становление связано с позднепалеозойско-раннемезозойским коллизионным этапом развития Уральско-подвижного пояса. Переход к постколлизийному раннемезозойскому платформенному этапу характеризовался завершением проявления унаследованных вертикальных тектонических движений с образованием горстовых блоковых дислокаций в тектонически напряженных зонах и грабеновых структур на участках локальных тектонических растяжений. Позднемезозойско-кайнозойские тектонические процессы эмерсивного геотектонического этапа развития Полярного Урала сохранили унаследованность вертикальных движений, сопровождались значительными амплитудами воздымания и эрозией горных сооружений, а также перестройкой речной сети. Кроме того, с этим этапом связано образование своеобразных локальных структур тектономагматической активизации, приуроченных к зонам деструкции земной коры и выраженных в современном рельефе автономными морфоструктурами и линейными зонами северо-западного направления (Приморские, Себета-Хуугинские нарушения), отличающихся набором

слагающих их геологических и рудных формаций. Кроме того, широкое привлечение изотопно-геохронологических исследований в 70-х и 90-х гг. прошлого века по урановым объектам (Ново-Харбейское, Базисное, Андриано-Павловское и др.) и магматическим комплексам кислого и основного состава показывало наличие мезозойских и даже кайнозойских меток при диагностике цирконов, настурана U-Pb (SHRIMP) Pb-Pb методами в различных лабораториях России (ВСЕГЕИ, Невская лаборатория, ВИМС). Полученные данные свидетельствуют о весьма широком участии мезозойско-кайнозойских процессов (метасоматоз, магматизм, рудогенез) в становлении геологического облика региона.

Методика исследования

Данная публикация посвящена краткому описанию геологического положения и характеристике коренного выхода своеобразных слаболитифицированных рыхлых пород (флюидолитов), вероятных индикаторов наиболее «молодых» современных (кайнозойских) эндогенных процессов. Работы выполнялись в рамках геологического доизучения листов R-42-XXXI, XXXII (Байдарацкая площадь) масштаба 1:200000 (ГДП-200/2) и программы «Приоритет 2030» Уральского государственного горного университета (УГГУ) на 2021–2030 гг. Исследования включали широкий круг задач от изучения петрографии и петрохимии пород до выяснения их минерального состава, а также геологического строения, тектонических и геоморфологических особенностей территории.

Изучение морфологии, внутреннего строения, химического состава флюидолитов, проявленных на поверхности натечных новообразований в виде сульфатных корок, проводилось в лабораториях УГГУ (г. Екатеринбург). Морфологическое изучение было проведено с помощью оптического микроскопа МБС 10 в отраженном свете и сканирующего электронного микроскопа VEGA LMS фирмы TESCAN (параметры съемки $U=20$ кВ, $I=300$ pA, $WD=15$ мм); состав минералов определялся с использованием энергодисперсионной приставки Xplore 30 фирмы Oxford Instruments, программа «Aztec» $U=20$ кВ, $I=300$ pA, (аналитик И.А. Власов, УГГУ). Рентгенографические исследования выполнены с помощью дифрактометра POWDIX 600 (параметры съемки: Cu – анод, $U=30$ кВ, $I=10$ mA, фильтр – Ni 20μm (аналитик Г.М. Воротинова) в научно-исследовательской и испытательной лаборатории вещественного состава пород и руд УГГУ.

Объект исследования

Рассматриваемая в работе территория относится к самой северной части Урала – аллохтонному Байдарацкому блоку, принадлежащему Сакмаро-Лемвинской структурно-формационной зоне (СФЗ).

Это в различной степени метаморфизованные (зеленосланцевая фация) осадочные, вулканогенно-осадочные шельфовые и склоновые комплексы нижнего, отчасти среднего палеозоя, осложненные различной тектоникой. Перекрывающие их мезозойско-кайнозойские отложения представлены слабо литифицированными и рыхлыми осадочными формациями морского и континентального генезиса, принадлежащие Зауральской СФЗ.

Главной особенностью Байдарацкого блока является широкое развитие покровно-надвиговых дислокаций, нарушенных системой субвертикальных активизационных структур сбросо-раздвигового типа. При этом последние формируют ступенчатые тектонические зоны субпараллельные арктической береговой линии, сопровождаясь наиболее молодым мезозойско-кайнозойским магматизмом и гидротермально-метасоматическими процессами, в том числе флюидно-фреатического типа.

Наиболее крупными хорошо проявленными разломами активизационной природы, фиксируемыми в пределах Байдарацкого блока, являются системы Приморских и Себета-Хуутинских дизъюнктивов (рис. 1) северо-западного ($320\text{--}340^\circ$) простирания. Первый трассируется немзияхинским лампроитовым (J_1nmz), левдиевским и торасовейским граносиенит-гранитным (T_2ld), а последний – осовейским калиево-трахитовым (K_1os) и яляяхским эссексит-долеритовым (T_2-J_1jl) комплексами.

Не обсуждая информацию о магматизме и рудообразовании в целом мезозойско-кайнозойского платформенного мегакомплекса, остановимся лишь на гипогенных образованиях, обнаруженных нами в процессе исследований в Байдарацком блоке Полярного Урала. Так, в скальных обнажениях нижнего течения р. Мал. Хууты нами были установлены натечные образования (флюидолиты) светло-серого, желтовато-серого цветов, приуроченных к трехметровой зоне повышенной трещиноватости и расланцевания северо-западного простирания (Аз. пад. $40\text{--}60^\circ$, $\angle 75\text{--}80^\circ$). Данные натечные отложения ввиду их растворимости в воде сохранились только на «отрицательных» скальных выходах и в небольших полостях (рис. 1) в полосе развития аповулканогенных сланцев, алевролитов и углеродсодержащих сланцев орангской свиты ($C_3\text{--}O_1$). Вмещающие породы дислоцированы и смяты в складки с размахом крыльев 5–7 м (Аз. пад. 70° , $\angle 45^\circ$; 95° , $\angle 50^\circ$; 115° , $\angle 25^\circ$; 165° , $\angle 35^\circ$; 215° , $\angle 60^\circ$). Флюидолиты располагаются в узле пересечения оперяющих структур Себета-Хуутинской системы региональных нарушений и установлены вблизи маломощных (0,3 м) выходов апогипербазитовых тальцитов (Аз. пад. 85° , $\angle 90^\circ$) и кварц-карбонатных, кварц-сульфидосодержащих линз и прожилков (Аз. пад. $60\text{--}40^\circ$, $\angle 80^\circ$).

Натечные образования представлены кавернозным, рыхловатым и коркоподобным материалом. Под микроскопом в отраженном свете основная масса отложений представлена натечным неясно полосчатым мелко глобулярным, местами скорлуповатым агрегатом желтой окраски. Размер отдельных глобул составляет 1,0–1,5 мм. В дальнейшем глобулы консолидируются в слои, из которых формируются более крупные скорлуповатые и сплошные образования, соединяющиеся между собой и постепенно слагающие всю корку. Подобное строение определяет присутствие в породе множества пустот различного размера и формы. Наиболее мелкие составляют доли миллиметра, наиболее крупные могут превышать мощность флюидолита, располагаясь поперек, имеют овальную, трубчатую и более сложные формы. Минерал легко растворяется в воде при комнатной температуре. Показатель преломления глобул $n < 1,570$.

Глобулы, выходящие на поверхность, очень редко ничем не покрыты и имеют «зализанный» вид. Чаще они обрастают поздними белыми сульфатами, нередко перемешанными с обломочным материалом (рис. 2). Полости частично заполнены сульфатами, образовавшимися позднее. В некоторых случаях на поверхности отдельных полостей видны остаточные трещины дегидратации, свидетельствующие о присутствии более ранних нестабильных сульфатов. В новообразованиях встречаются участки, имеющие ограниченные линейно-трещинные зоны. Последние состоят из нескольких субпараллельных трещин разрыва, которые после возникновения были залечены. На подобных участках возникает много мелкообломочного материала, который вместе с поздними сульфатами заполняет полости флюидолита.

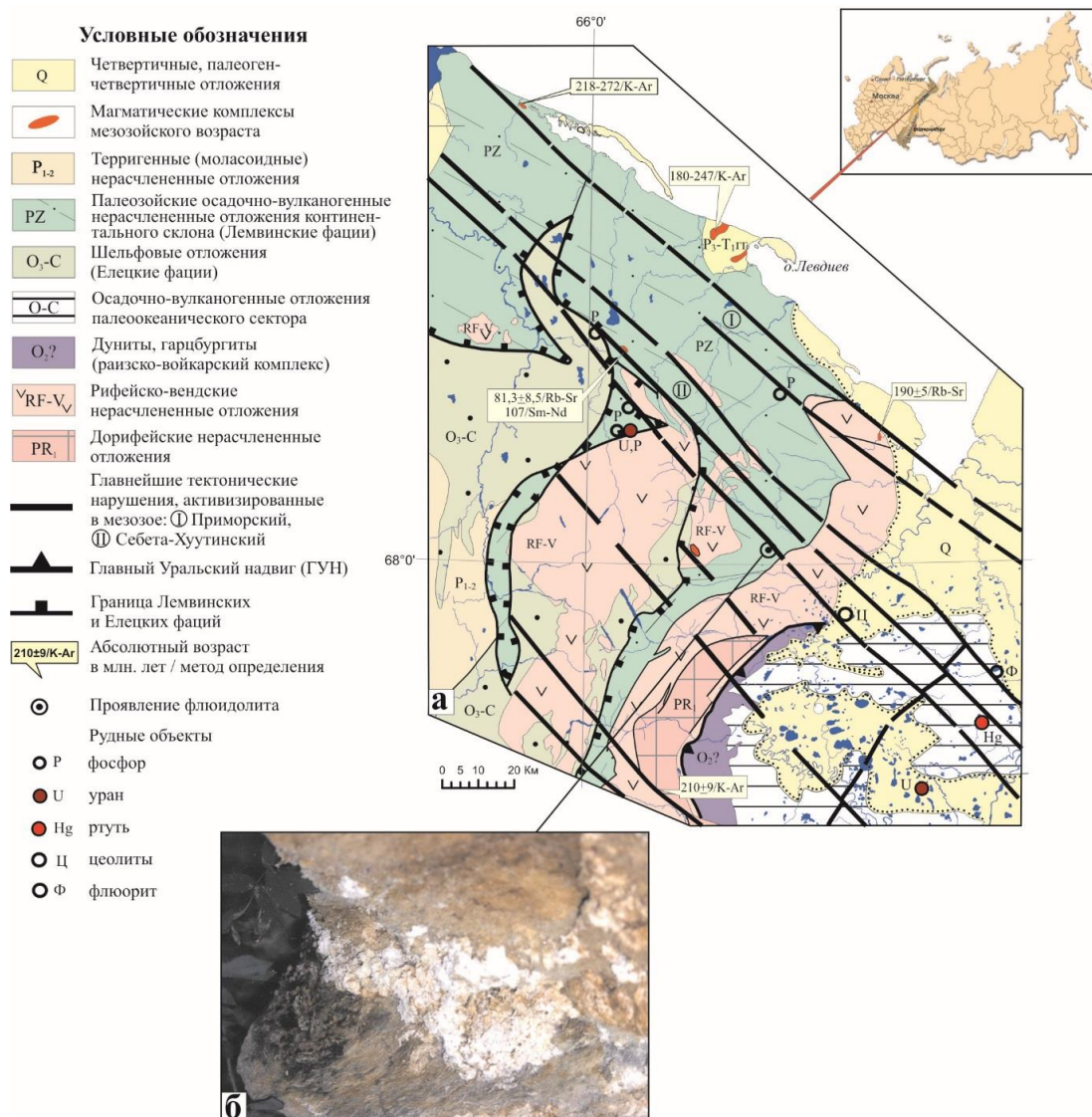


Рис. 1. Схематическая карта Полярного Урала (а), выходы флюидолитов – белое (б)
Fig. 1. Schematic map of the Polar Urals (a), fluidolite outputs – white (b)

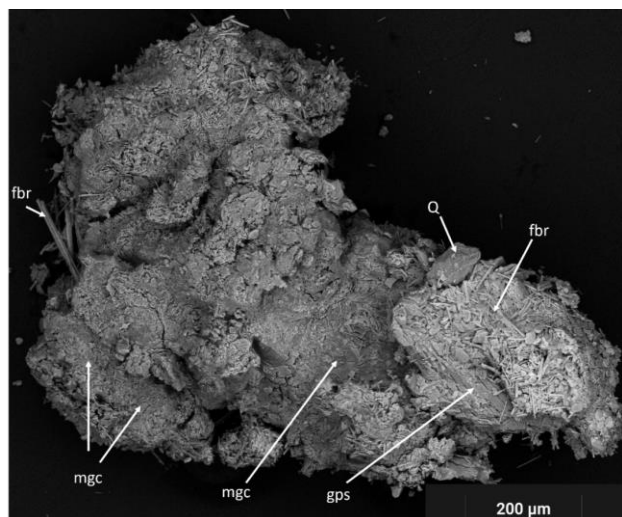


Рис. 2. Внешний вид фрагмента флюидолита (сульфатной корки). Основа представлена магнезиокопиапитом (mgc); игольчатые кристаллы фиброферрита (fbr); на поверхности лежит кристалл гипса (gps) с обломком кварца (Q). BSE изображение

Fig. 2. Appearance of a fragment of fluidolite (sulfate crust). The base is represented by magnesiocopiapite (mgc); needle-like crystals of fibroferrite (fbr); gypsum crystal (gps) with a fragment of quartz (Q) lies on the surface. BSE image

Для определения фазового состава натечного образования было проведено исследование на дифрактометре. Основные значения полученного спектра: 9,33(85)–6,20(75)–5,60(80)–5,35(40)–4,22(100) отвечают магнезиокопиапиту – $\text{MgFe}_4^{3+}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$. Под

электронным микроскопом поверхности глобул имеют черепитчатое строение (рис. 3, а), которое при большем увеличении преобразуется в агрегат тонкопластинчатых кристаллов (рис. 3, б). Группа копиапита содержит в своем составе семь минералов [4–8].

Водный сульфат магния – второй минерал, участвующий в строении флюидолита, сложен мелкими зернистыми выделениями эпсомита – $\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [9, 10] (рис. 4, а), или продуктами его дегидратации, врастающими в магнезиокопиапит (рис. 3, а). Наиболее интенсивные линии этого минерала присутствуют в спектре сульфатной корки и имеют значения 5,35(26)–4,21(100)–3,79(13)–2,880(20)–2,677(24)–2,659(22). При понижении влажности в сухой обстановке эпсомит ступенчато дегидратирует, переходя сначала в шестиводный гексагидрит, затем в пятиводный пентагидрит, далее в четырехводный тетрагидрит и двухводный сандерит. Процесс заканчивается на одноводном представителе – кизерите. Наиболее интенсивные линии этих минералов присутствуют в дифракционном спектре флюидолита (сульфатной корки).

Третий по количественному содержанию минерал представлен бесцветными и белыми волокнистыми или волосовидными индивидами, собранными в метелки или образующими параллельно-волокнистые выделения с перламутровым блеском. Длина некоторых волокон приближается к 1,0 мм, при поперечном сечении, составляющем сотые доли миллиметра. Обычно они обрастают глобулы магнезиокопиапита и заполняют полости в нем.

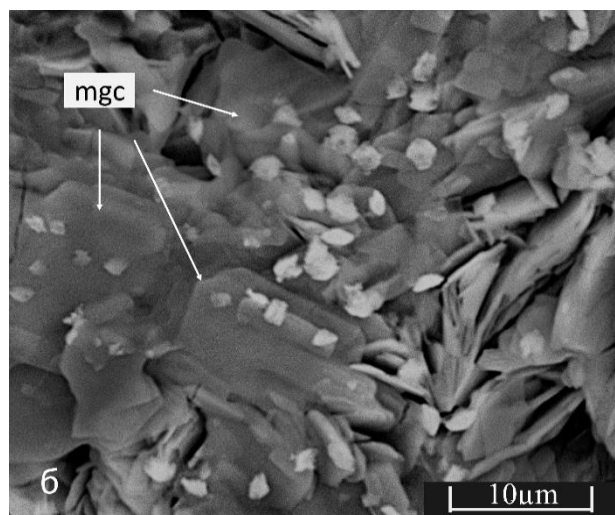
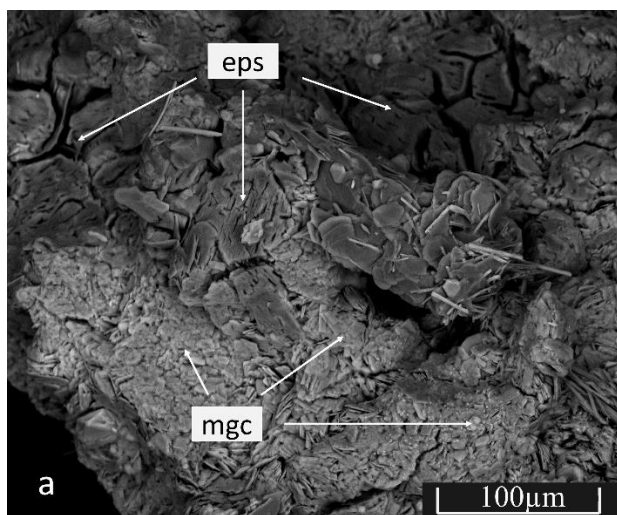


Рис. 3. Минералы флюидолита (сульфатной корки): а) черепитчатое строение глобулы магнезиокопиапита с вростками эпсомита с трещинами дегидратации; б) сrostки пластинчатых кристаллов магнезиокопиапита с микрокристаллами точно не диагностированного магнезиально-железистого сульфата. BSE изображение

Fig. 3. Minerals of fluidolite (sulfate crust): а) tiled structure of a magnesiocopiapite globule with epsomite accretions with dehydration cracks; б) accretions of plate crystals of magnesiocopiapite with microcrystals of an accurately undiagnosed magnesia-ferruginous sulfate. BSE image

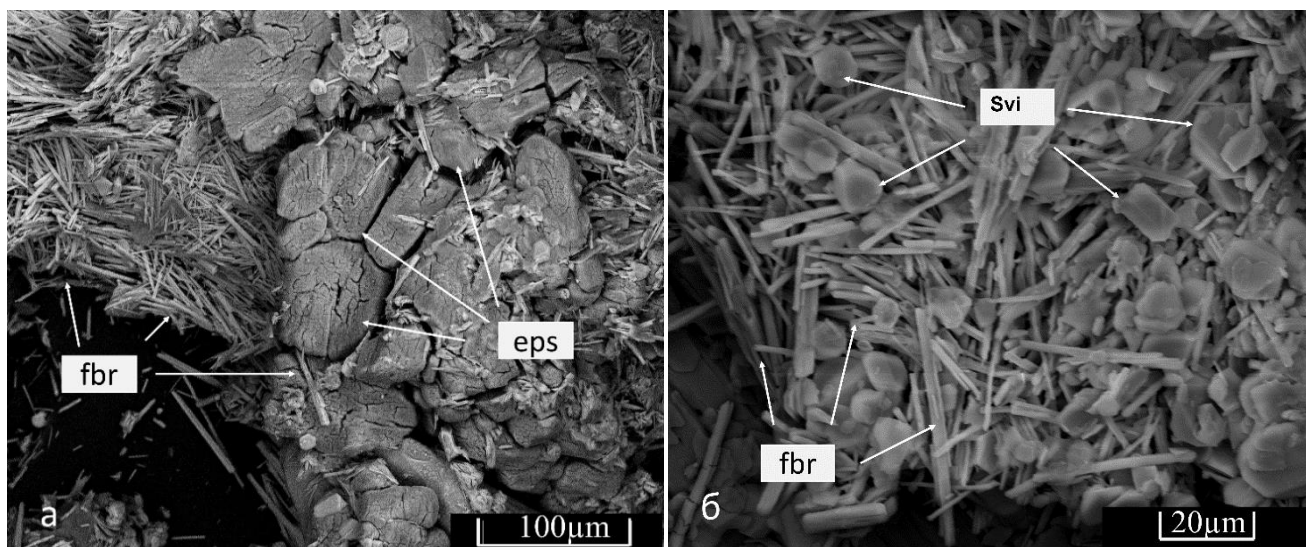


Рис. 4. Взаимоотношение минералов в флюидолите: а) зернистый агрегат эпсомита (eps) с трещинами дегидратации сростается с игольчатыми скоплениями фиброферрита (fbr); б) игольчатый агрегат фиброферрита с множественными сростками таблитчатых кристаллов славикита (svi). BSE изображение
Fig. 4. Relationship of minerals in fluidolite: a) granular epsomite aggregate (eps) with dehydration cracks fuses with needle clusters of fibroferrite (fbr); б) needle aggregate of fibroferrite with multiple accretions of tabular crystals of slavikite (svi). BSE image

В некоторых случаях слагают изолированные участки вытянутой формы до 7 мм в длину и до 2 мм в поперечнике в самой породе или ее полостях. При определении качественного состава подобных участков было выявлено обогащение их железом и серой, лишь единичные иголки содержат в своем составе железо, магний, алюминий и серу.

Рентгеновская диагностика волокнистого сульфата показала его идентичность фиброферриту [11, 12] – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (рис. 5). Редкие волокна имеют второй набор элементов, соответствующий минералу ряда галотрихит-пиккерингит – $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ [13]. В единичных случаях

среди игольчатых индивидов фиброферрита встречаются аналогичные по форме иголки гипса. Среди волокнистых скоплений фиброферрита также обнаружены мелкие изометричные в поперечном сечении, иногда псевдооктаэдрические кристаллики славикита – $(\text{H}_3\text{O}^+)_3\text{Mg}_6\text{Fe}_{15}(\text{SO}_4)_{21}(\text{OH})_{18} \cdot 98\text{H}_2\text{O}$ [14, 15], обычно уплощенные в плоскости базипинакоида (рис. 4, б; 6, а). Первоначально он ошибочно был определен как паракокимбит. После определения состава была установлено, что в нем среди катионов помимо железа еще присутствует магний, но нет натрия, который был приведен в первом описании минерала.

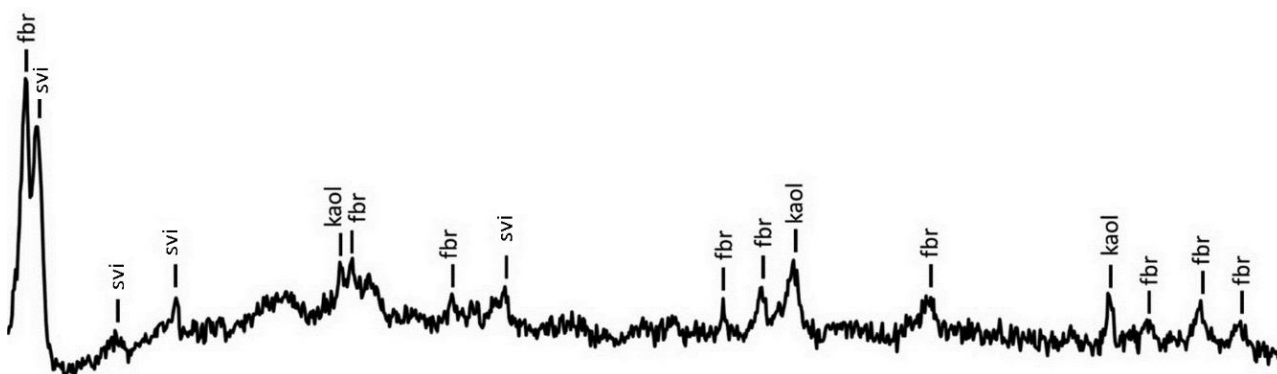


Рис. 5. Дифрактограмма игольчатого сульфата. Дифракционные отражения фиброферрита – fbr, славикита – svi, каолинита – kaol
Fig. 5. Diffractogram of needle sulfate. Diffraction reflections of fibroferrite – fbr, slavikite – slv, kaolinite – kaol

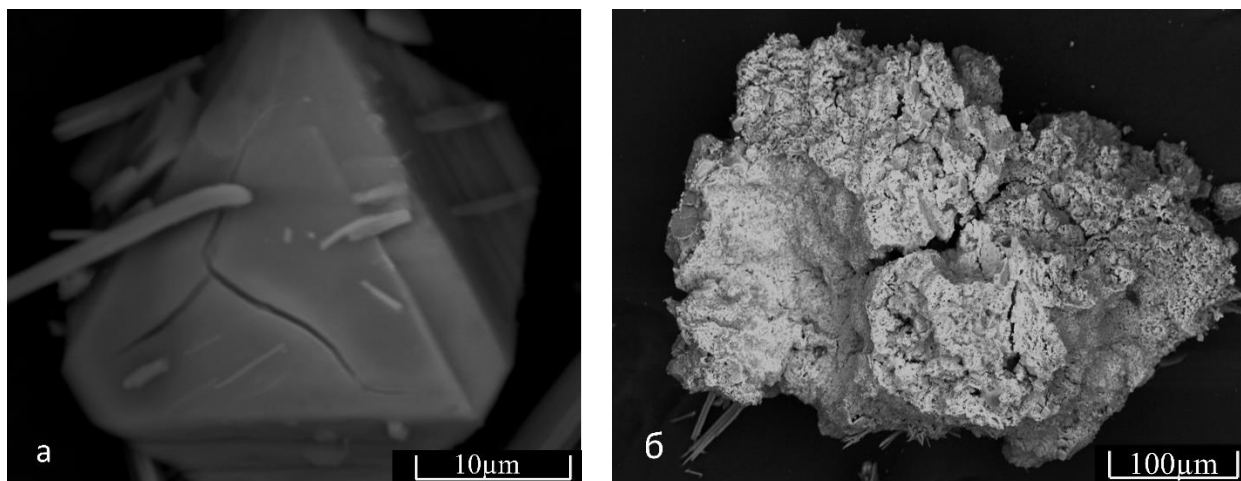


Рис. 6. Особенности строения флюидолита и морфология минералов: а) псевдооктаэдрический кристалл славикита с нарощими иголками фиброферрита; б) мелкоячеистый силикатно-сульфатный участок флюидолита. BSE-изображение

Fig. 6. Features of the structure of fluidolite and morphology of minerals: a) pseudohexagonal crystal of slavikite with overgrown needles of fibroferrite; б) fine-meshed silicate-sulfate section of fluidolite. BSE image

Присутствие славикита было подтверждено съемкой дифрактограммы игольчатого сульфата, где наряду с дифракционным спектром фиброферрита присутствуют основные отражения славикита (рис. 5). Это третья находка данного минерала в России, ранее он был определен в 1940 г. в зоне окисления оловорудного месторождения Эге-Хая (Якутия) совместно с фиброферритом и передан С.С. Смирновым в музей им. А.Е. Ферсмана. Предположительно указывался Л.Д. Герман-Русаковой в 1962 г. в списке минералов зоны окисления Блявинского медно-колчеданного месторождения [16] в прожилках фиброферрита, в приводимой формуле отсутствовал магний, но присутствовали щелочные элементы натрия и калий, которые в его составе отсутствуют. В 2015 г. определен А.В. Касаткиным по материалам сборов А.И. Тищенко в 1999 г. в Петропавловском карьере в Крыму, где славикит присутствует в зоне окисления сульфидной вкрапленности юрских вулканогенных отложений и слагает светло-желтые корки в ассоциации с алуногеном и гипсом.

Наряду с этим среди скоплений фиброферрита со славикитом присутствуют каолинит, отражения которого зафиксированы на дифрактограмме (рис. 5). Внешне кристаллы каолинита близки по форме кристаллам славикита, только, по-видимому, более уплощенные и образуют с ним сростки. Количество его существенно меньше, и он редко фиксируется при электронно-микроскопическом изучении.

В флюидолите встречаются небольшие изолированные участки овальной формы. В них вместе с сульфатами наблюдается тесное прораствание с очень мелкими выделениями силикатов, в составе которых наряду с кремнием принимают участие

алюминий и калий. Выделения силикатов в большинстве случаев имеют округлую или близкую к изометричной форму, их размеры не превышают 10 мкм. Состав их, по-видимому, представлен мусковитом, образованным из газовой фазы.

В единичных случаях в породе отмечаются белые гибкие чешуйки с перламутровым блеском. Они имеют близкое к изометричному сечению до 1 мм в поперечнике при толщине менее 0,1 мм. По оптическим константам и физическим свойствам минерал соответствует гидромусковиту, но образовавшемуся при выветривании окружающих пород.

В некоторых полостях флюидолита встречаются уплощенно-призматические кристаллы с сечением поперек уплощения, близким к ромбическому, с размером до 1,0 мм по длинной стороне ромба. Кристаллы имеют бледно-желтый цвет, низкую твердость, совершенную спайность в одном направлении, отмечаемую только под микроскопом, а по морфологии и наблюдаемым свойствам они соответствуют гипсу.

Обсуждение результатов

Как показали наши исследования, локализация вышеописанных флюидизатных образований определяется главным образом тектоническим фактором. Их проявление связывается с позднекайнозойским повторноколлизийным эпиплатформенным этапом.

В северной части Полярного Урала по геологическим, геоморфологическим параметрам отчетливо обособляется Байдарацкая структура опускания, которая прослеживается по результатам геологического картирования и дешифрирования аэрокосмических материалов. Наиболее крупными тектони-

ческими нарушениями в пределах Байдарацкого блока являются (с севера на юг) системы Приморских, Себета-Хуутинских и Малохуутинско-Лаборовских разломов. Кроме северо-западных ориентировок линеаментов, в пределах Байдарацкого аллохтонного блока выделяются субмеридиональные и частично северо-восточные линеаменты, представляющие поперечные локальные разломы сбросового типа. Системы вышеперечисленных северо-западных структур, как правило, представлены в рельефе протяженными прямолинейными линеаментами либо их параллельными сериями. Они нередко дискордантны по отношению к другим структурным элементам. Четкая выраженность в рельефе, хорошая сохранность линеаментов, их наложенный характер на пермские отложения Карской структуры (Пай-Хой) подтверждают обоснование мезозойского (с подновлением в кайнозой) возраста данных тектонических зон.

Среди горных пород в последнее время стали выделять особую группу пород под общим названием флюидолиты, не принадлежащих к осадочным, магматическим, метаморфическим и метасоматическим образованиям [17]. Их формирование связывается с функционированием водно-газовых потоков, под давлением прорывающихся из глубоких горизонтов литосферы или даже мантии. Они несут к поверхности суспензию, включающую в себя частицы захваченных по пути движения вмещающих пород или продуктов взрыва. Эта водно-газовая смесь в процессе подъема может вступать в реакции как с кислородом воздуха у поверхности, так и в глубине с содержащимися в них элементами и образовывать новые минералы [17].

Представленные выше сульфатные агрегаты можно рассматривать в качестве продуктов подобных флюидно-газовых процессов, т. е. проявления флюидолитов. Они встречаются в зонах активизации, имеют сложный полиминеральный состав, где наряду с преобладающими водными сульфатами железа и магния: магнезиокопиапитом, эпсомитом с продуктами его дегидратации и фиброферритом, присутствуют более редкие, такие как славикит и микрокристаллы точно не диагностированного сульфата, содержащего в составе магний и железо. Помимо этого, в корке встречается гипс, как в виде классических кристаллов, так и в виде мелких иголок. Некоторые иголки могут быть представлены минералами ряда галотрихит-пиккерингит. Вместе с этим в корке встречены обломки зерен кварца, гидратированных чешуек мусковита. Наряду с обломочным силикатным материалом среди игольчатых скоплений фиброферрита установлены мелкие кристаллы каолинита и встречены участки «микрокавернозного» строения, где среди сульфатов сравнительно равномерно распределен алюмосиликат-

ный тонкодисперсный материал, в котором иногда встречаются микронные скопления, в которых выявлен калий.

Природа сульфатных отложений многогранна, с одной стороны они могут быть результатом техногенной деятельности человека, находиться в мочажинах колчеданных месторождений или присутствовать в горелых отвалах угольных месторождений, с другой стороны, они обычные минералы вулканической деятельности, где участвуют в отложении фумарол или присутствуют в составе гидротермальных месторождений [18].

В данном случае основной вопрос связан с эндогенной или гипергенной природой изучаемых сульфатных корок. Рассмотрим его на примере состава конденсатов фумарольных газов вулкана Безымянный. В одной из проб этого конденсата состав следующий (в г/л): SO_4^{2-} – 0,2680, Cl^- – 0,0955, HCO_3^- – 0,1210, Na^+ – 0,0360, K^+ – 0,0105, Ca^{2+} – 0,1200, Mg^{2+} – 0,0105, Fe^{3+} – 0,0068, Al^{3+} – 0,0104, H^+ – 0,0002, H_2SiO_3 – 0,0280.

Большинство катионов и анионов, присутствующих в конденсате фумарольных газов, входят в состав сульфатов корки, кроме этого, в составе конденсата присутствует кремниевая кислота. В случае падения активности более реакционноспособных кислотных анионов более сильных кислот мы можем ожидать образования силикатов. Это мы наблюдаем в нашем случае, и это указывает на эндогенную природу сульфатных корок с примесью новообразованных силикатов алюминия в виде каолинита, а также, по видимому, слюды. Ничего подобного ни на колчеданных месторождениях, ни на горящих отвалах угольных месторождений не установлено.

Исследованиями различных ученых установлено преобладающее развитие среди сульфатных отложений колчеданных и техногенных объектов Урала представителей Mg^{2+} , реже других халькофильных и литофильных элементов [19–21]. На Урале магнезиокопиапит, не содержащий закисного железа, установлен в горящих угольных отвалах Копейского месторождения. В центральных частях угольных терриконов происходит плавление пород, а образование сульфатов происходит под верхней коркой пород.

В долгоживущих тектонически активных участках выделяется огромная энергия, которая помимо кинетической переходит в тепловую и может способствовать частичному плавлению пород. Газовая составляющая, образующаяся при этом, при кристаллизации расплава мигрирует по проницаемым участкам к поверхности и приводит к отложению подобных сульфатно-силикатных корок, которые трассируют их в той или иной степени.

Подобные образования установлены нами не только в оперяющих дизъюнктивах Малохуутин-

ско-Лаборовской, Себета-Хуугинской и Приморской поперечных (северо-западных) системах разломов Байдарацкого блока, но и в более южных частях Полярного Урала.

Следует отметить, что выделенные ранее низкотемпературные верхнепалеогеновые (палеогено-эоценовые по В.И. Силаеву, 1996) образования, известные как коры выветривания линейного типа [4], несут достоверные признаки наличия эндогенных сопряженных либо более молодых процессов. Это достаточно уверенно было установлено на Сафроновском месторождении, где наряду с фосфатами было выявлено золото и платиноиды гипогенного типа. Известно, что большинство установленных проявлений линейной коры выветривания на Полярном Урале приурочено к нижним ярусам рельефа, отвечающим поверхности миоцен-олигоценного пенеплена. Они расположены преимущественно в пределах эрозионно-структурных депрессий субмеридионального простирания (Нияюская, Верхнелемвинская, Пайпудинская и др.), образованных узлами сопряжения и сочленения разломов северо-западного и северо-северо-восточного направлений. Это наиболее молодые деформации мезо-кайнозоя, предопределившие современный структурно-тектонический облик региона, представляющий собой рифтогенно-блоковый тип мегаструктур. Проницаемые зоны служили подводящими каналами флюидно-магматических систем, а в экзогенных условиях – наиболее благоприятными объектами формирования линейной коры выветривания. В настоящее время все более очевидным становится факт взаимосвязи линейных кор выветривания с зонами активизации, что во многом объясняет специфику металлогенически сопряженных рудно-метасоматических систем, где наряду с фосфоритами, оксидными марганцевыми рудами, присутствуют проявления и спорадические находки алмазов, их минералов-спутников, высокие концентрации редких, благородных металлов и сурьмы.

Анализ размещения рудной минерализации в пределах зоны (области) Себета-Хуугинской системы северо-западных ленияментов показал, что они контролируют проявления цеолитов (Неропейское), ртути (Сфинкс), урана (Нижнешучьинское) в Щучьинском блоке, а в Оченырдском и его северном обрамлении – фосфора, урана (Нестеровское, Високосное), флюорита. При этом в непосредственной близости от системы дизъюнктивов как на западе (р-н оз. Освей-то), так и на востоке (р. Щучья) известны выбросы в скважинах газа.

Следует также иметь в виду, что данные структуры контролируют своеобразный освейский комплекс калиевых трахитов возрастом 81 млн лет, который, естественно, сопровождается поствулка-

ническими эманациями, включающими и рудную составляющую.

Заключение

Таким образом, сульфатные корки, идентифицируемые как флюидолиты, встречающиеся в зонах активизации, имеют сложный полиминеральный состав, где наряду с преобладающими водными сульфатами железа и магния: магнезиокопиапитом, эпсомитом с продуктами его дегидратации и фиброферритом, присутствуют более редкие, такие как славикит и микрокристаллы точно не диагностированного сульфата, содержащего в составе магний и железо. Помимо этого, в корке иногда находится гипс, как в виде классических кристаллов, так и в виде мелких иголок. Некоторые иголки могут быть представлены минералами ряда галотрихитпиккерингит. Вместе с этим в корке встречены обломки зерен кварца, гидратированных чешуек мусковита. Наряду с обломочным силикатным материалом среди игольчатых скоплений фиброферрита установлены мелкие кристаллы каолинита и встречены участки микроавернозного строения, где между сульфатов сравнительно равномерно распределен алюмосиликатный тонкодисперсный материал, среди которого встречаются микронные скопления, в которых выявлен калий.

Судя по имеющейся информации на протяжении всего мезозойско-кайнозойского этапа северо-западные системы дизъюнктивов контролировали проявления флюидно-магматических процессов в пределах Полярного Урала. Зародившись, по-видимому, как унаследованные разломы трансформного типа, инъецированные дайковым базальт-долеритовым (яляяхский комплекс) магматизмом, эволюционировали далее в виде лампроитового (немзияхинский, марунский комплексы) и калиево-трахитового (освейский комплекс) экстрезивного вулканизма в обстановке континентального рифтогенеза (горячих точек?) и проявились далее в виде описанных флюидолитов квартера. При этом как в мезозойско-кайнозойский платформенный этап, так и в последующий позднекайнозойский повторноколлизионный период происходило образование линейных кор выветривания, накладывающихся впоследствии на флюидно-рудно-магматические, флюидно-фреатические и прочие проявления. Подобная эволюция сформировала повсеместно устанавливаемую в настоящее время гипогенно-гипергенную зональную систему минералообразования в рудах Урала.

Эту сложную комбинацию часто низкотемпературных минеральных ассоциаций необходимо уметь картировать и учитывать при проведении геологических исследований на любых стадиях геологоразведочных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криночкин В.Г., Островский Л.Я., Пенчук В.Н. Линейные тектонические зоны и оруденение Полярного Урала // Полярный Урал – новая минерально-сырьевая база России. – Тюмень; Салехард: Изд-во Тюменского Государственного университета., 1997. – С. 36–41.
2. Силаев В.И. Минералогия фосфатных кор выветривания (Полярный Урал). – СПб: Наука, 1996. – 136 с.
3. Калецкая М.С. Артемий Дмитриевич Миклухо-Маклай // Народное хозяйство Республики Коми. – 1993. – Т. 2. – № 2. – С. 259–264.
4. Bayliss P., Atencio D. X-ray powder-diffraction data and cell parameters for copiapite-group minerals // The Canadian Mineralogist. – 1985. – Vol. 23 (1). – P. 53–56.
5. Jambor J.L., Nordstrom D.K., Alpers C.N. Metal-sulfate Salts from Sulfide Mineral Oxidation // Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2000. – Vol. 40. – P. 303–350.
6. Физико-химическое и калориметрическое изучение алюмокопиапита и термодинамические свойства минералов копиапитовой группы / Л.П. Огородова, Ю.Д. Гриценко, М.Ф. Вигасина, Д.А. Косова, Л.В. Мельчакова, Д.А. Ксенофонтов, С.К. Дедушенко // Геохимия. – 2021. – Т. 66. – № 3. – С. 281–288.
7. Majzlan J., Michallik R. The crystal structures, solid solutions and infrared spectra of copiapite group minerals // Mineralogical Magazine. – 2007. – Vol. 71 (5). – P. 553–569.
8. Süsser P. Crystal structure and hydrogen bonding of copiapite // Zeitschrift für Kristallographie. – 1972. – Bd. 135. – S. 34–55.
9. Baur W.H. The refinement of the crystal structure of $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epsomite) // Acta Crystallographica. – 1964. – Vol. 17 (11). – P. 1361–1369.
10. Минералогия Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) / А.В. Касаткин, С.Ю. Степанов, М.В. Цыганко, Р. Шкода, Ф. Нестола, Я. Плашил, Э. Маковицки, А.А. Агаханов, Р.С. Паламарчук // Минералогия. Часть 4: кислородные соединения. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 5–31.
11. Lombardo M. Fibroferrite: crystallographic, optical and synthesis experiments. Diss. – Canada, 2010. – 160 p.
12. Scull B.J. Development of melanterite and fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate // Cordilleran Meeting of the Mineralogical Society of America. Development of Melanterite and Fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate. Abstracts of papers submitted to the April meeting. – Los Angeles, 1951. – P. 212–231.
13. Статические и резонансные магнитные свойства галотрихита / Т.М. Васильчикова, О.С. Волкова, Г.В. Раганиян, Л.В. Шванская, А.М. Ковальский, П.Ю. Плечов, Д.С. Батаев, С.В. Таскаев, А.Н. Васильев // Челябинский физико-математический журнал. – 2022. – № 7 (2). – С. 254–262.
14. Laurence N.W. CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. – 2021. – Vol. 85 (3). – P. 291–320.
15. Parafiniuk J., et al. Slavikite revision of chemical composition and crystal structure // American Mineralogist. – 2010. – Vol. 95. – P. 11–18.
16. Герман Л.Д. Некоторые минералы зоны окисления Блявинского месторождения // Кора выветривания. – 1960. – Вып. 3. – С. 117–145.
17. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание третье, исправленное и дополненное. – СПб: Изд-во ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2009. – 200 с.
18. Белогуб Е.В. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. – М.: Наука, 2007. – 160 с.
19. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н. Исследование формирования состава подотвальных вод медноколчеданного месторождения среднего Урала // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 3. – С. 165–176.
20. Sherbakova E., Nikandrova N.G., Zvonareva G. Mössbauer spectroscopy of Fe-containing sulfates // Mitt. Oster. Miner. Ges. – 2004. – Bd. 149. – S. 90–91.
21. Алюминокопиапит из Дегтярского медного рудника (Средний Урал) / Ю.В. Ерохин, А.В. Захаров, П.С. Козлов, О.Л. Галахова // Вестник Уральского отделения РМО. – 2018. – № 15. – С. 66–71.

Информация об авторах

Владимир Александрович Душин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; Vladimir.Dushin@m.ursmu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9657-6324>

Сергей Геннадьевич Суставов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии, петрографии и геохимии, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; Sustavov.s@ursmu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-4186-0829>

Игорь Александрович Власов, младший научный сотрудник научно-исследовательской и испытательной лаборатории вещественного состава пород и руд Уральского государственного горного университета, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30; vlasovbkpost@bk.ru; <https://orcid.org/0009-0002-1842-8497>

Денис Игоревич Прокопчук, младший научный сотрудник, заведующий лабораторией кафедры геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, Уральский государственный горный университет, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30. uva9090@mail.ru

Поступила в редакцию: 24.01.2024

Поступила после рецензирования: 24.05.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Krinochkin V.G., Ostrovsky L.Ya., Penchuk V.N. Linear tectonic zones and mineralization of the Polar Urals. *Polar Urals – a new mineral resource base of Russia*. Tyumen-Salekhard, Tyumen State University Publ. House, 1997. pp. 36–41. (In Russ.)
2. Silaev V.I. *Mineralogy of phosphate weathering crusts (Polar Urals)*. St. Petersburg, Nauka Publ., 1996. 136 p. (In Russ.)
3. Kaletskaya M.S. Artemy Dmitrievich Miklukho-Maklay. *National economy of the Komi Republic*, 1993, vol. 2, no. 2, pp. 259–264. (In Russ.)
4. Bayliss P., Atencio D. X-ray powder-diffraction data and cell parameters for copiapite-group minerals. *The Canadian Mineralogist*, 1985, vol. 23 (1), pp. 53–56.
5. Jambor J.L., Nordstrom D.K., Alpers C.N. Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2000, vol. 40, pp. 303–350.
6. Ogorodova L.P., Gritsenko Yu.D., Vigasina M.F., Kosova D.A., Melchakova L.V., Ksenofontov D.A., Dedushenko S.K. Physico-chemical and calorimetric study of aluminocopiapite and thermodynamic properties of minerals of the copiapite group. *Geochemistry*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 281–288. (In Russ.)
7. Majzlan J., Michallik R. The crystal structures, solid solutions and infrared spectra of copiapite group minerals. *Mineralogical Magazine*, 2007, vol. 71 (5), pp. 553–569.
8. Süss P. Crystal structure and hydrogen bonding of copiapite. *Zeitschrift für Kristallographie*, 1972, Bd. 135, pp. 34–55.
9. Baur W.H. The refinement of the crystal structure of $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epsomite). *Acta Crystallographica*, 1964, vol. 17 (11), pp. 1361–1369.
10. Kasatkin A.V., Stepanov S.Yu., Tsyganko M.V., Shkoda R., Nestola F., Plashil Ya., Makovitsky E., Agakhanov A.A., Palamarchuk R.S. Mineralogy of the Vorontsov gold deposit (Northern Urals). *Mineralogy. Part 4: Oxygen compounds*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 5–31. (In Russ.)
11. Lombardo M. *Fibroferrite: crystallographic, optical and synthesis experiments*. Diss. Canada, 2010. 160 p.
12. Scull B.J. Development of melanterite and fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate. *Cordilleran Meeting of the Mineralogical Society of America. Development of Melanterite and Fibroferrite from gelatinous ferrous sulfate. Abstracts of papers submitted to the April meeting*. Los Angeles, 1951. pp. 212–231.
13. Vasilchikova T.M., Volkova O.S., Raganyan G.V., Shvanskaya L.V., Kovalsky A.M., Plechov P.Yu., Bataev D.S., Taskaev S.V., Vasiliev A.N. Static and resonant magnetic properties of halotrichite. *Chelyabinsk Physico-Mathematical Journal*, 2022, no. 7 (2), pp. 254–262. (In Russ.)
14. Laurence N.W. CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 2021, vol. 85 (3), pp. 291–320.
15. Parafiniuk J. Slavikite revision of chemical composition and crystal structure. *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 11–18.
16. German L.D. Some minerals of the oxidation zone of the Blyavinsky deposit. *Weathering crust*, 1960, Iss. 3, pp. 117–145. (In Russ.)
17. *The Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, and impact formations*. 3rd ed., revised and expanded. St. Petersburg, VSEGEI Publ. house, 2009. 200 p. (In Russ.)
18. Belogub E.V. *Sulfates of the Urals: prevalence, crystal chemistry, genesis*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 160 p. (In Russ.)
19. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Galin A.N. Investigation of the formation of the composition of the subsurface waters of the copper-chipped deposit of the Middle Urals. *Physico-technical problems of mineral development*, 2023, no. 3, pp. 165–176. (In Russ.)
20. Sherbakova E., Nikandrova N.G., Zvonareva G. Mössbauer spectroscopy of Fe-containing sulfates. *Mitt. Oster. Miner. Ges.*, 2004, Bd. 149, pp. 90–91.
21. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Kozlov P.S., Galakhova O.L. Aluminokopiapite from the Degtyarsky copper mine (Middle Urals). *Bulletin of the Ural branch of the Russian Mineralogical Society*, 2018, no. 15, pp. 66–71. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir A. Dushin, Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Vladimir.Dushin@m.ursmu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9657-6324>

Sergey G. Sustavov, Cand. Sc., Associate Professor, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation. Sustavov.s@ursmu.ru

Igor A. Vlasov, Junior Researcher, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; vlasovbkpost@bk.ru. <https://orcid.org/0009-0002-1842-8497>

Denis I. Prokopchuk, Junior Researcher, Head of the Laboratory, Ural State Mining University, 30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation. uva9090@mail.ru

Received: 24.01.2024

Revised: 24.05.2024

Accepted: 31.01.2025

УДК 622.27

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4683

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

Анализ и перспективы развития индикаторных (трассерных) методов исследования пластов-коллекторов нефтяных и газовых месторождений

В.В. Вержбицкий✉, А.И. Щекин, Т.А. Гунькина, А.В. Хандзель, В.В. Вержбицкая

Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, г. Ставрополь

✉vverzhbitskii@ncfu.ru

Аннотация. *Актуальность* статьи обусловлена стремительным развитием методологии проведения и интерпретации результатов трассерных исследований, что требует систематизации данных. В настоящее время индикаторные исследования являются практически единственным безальтернативным методом, позволяющим объективно с физической точки зрения оценить реальные гидродинамические связи между скважинами. Важность информации, получаемой по результатам интерпретации обработки трассерных исследований, заключается в надежности и однозначности, что позволяет значительно уменьшить неопределенности в отношении путей фильтрации флюида, наличия неоднородности и особенностей гидродинамической связи в продуктивных пластах. **Цель:** формирование комплекса методических рекомендаций по методологии проведения и интерпретации результатов трассерных исследований в процессе разработки нефтяных и газовых месторождений. **Методы.** Проанализированы технологии проведения и интерпретации трассерных исследований по таким методологиям, как метод стационарного источника индикатора, в том числе Single Well Chemical Tracer Tests, межскважинные исследования разделяющимися трассерами (Partitioning Inter-Well Tracer Test), а также метод контрольных скважин. **Результаты.** В результате проведенного анализа трассерных методов исследования пластов-коллекторов нефтяных и газовых месторождений выполнена классификация веществ, используемых в качестве индикаторов, проведено сопоставление основных целей, достигаемых с помощью индикаторных исследований в соответствии с объектом изучения и методом исследования. Описаны сильные и слабые стороны проведения и обработки результатов анализируемых методов трассерных исследований. Представлены перспективы развития индикаторных методов исследования, в первую очередь связанные с разработкой новых типов трассеров и методик интерпретации результатов.

Ключевые слова: исследования продуктивных пластов, трассерные методы, стационарный источник индикатора, Single Well Chemical Tracer Tests, межскважинные исследования разделяющимися трассерами, метод контрольных скважин

Для цитирования: Анализ и перспективы развития индикаторных (трассерных) методов исследования пластов-коллекторов нефтяных и газовых месторождений / В.В. Вержбицкий, А.И. Щекин, Т.А. Гунькина, А.В. Хандзель, В.В. Вержбицкая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 47–65. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4683

UDC 622.27

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4683

Analysis and prospects for the development of indicator (tracer) methods for studying oil and gas reservoirs

V.V. Verzhbitsky✉, A.I. Shchekin, T.A. Gunkina, A.V. Handzel, V.V. Verzhbitskaya

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

✉vverzhbitskii@ncfu.ru

Abstract. Relevance. Rapid development of the methodology for conducting and interpreting the results of tracer studies, which requires systematization of data. At present, indicator studies are practically the only non-alternative method that

allows one to objectively evaluate real hydrodynamic connections between wells from a physical point of view. The importance of the information obtained as a result of interpreting the tracer studies lies in its reliability and unambiguity, which can significantly reduce uncertainties regarding fluid filtration paths, the presence of heterogeneity and peculiar features of hydrodynamic connectivity in productive formations. **Aim.** To create a set of systematical recommendations on the methodology for conducting and interpreting the results of tracer studies when developing oil and gas fields. **Methods.** The paper analyzes technologies for conducting and interpreting tracer tests using such methods as the Stationary Tracer Source, including Single Well Chemical Tracer Tests, Partitioning Inter-Well Tracer Test, as well as Inter-Well Tracer Test. **Results and conclusions.** As a result of the analysis of tracer methods for studying reservoir layers of oil and gas fields, the authors have classified the substances used as indicators, and carried out a comparison of the main goals achieved with the help of indicator studies in accordance with the object of study and the research method. The paper describes the strong and weak features of conducting and processing the results of the analyzed tracer research methods. The paper introduces the prospects for the development of indicator research methods, primarily related to the development of new types of tracers and methods for interpreting results.

Keywords: reservoir studies, tracer methods, stationary source of tracer, Single Well Chemical Tracer Tests, Partitioning Inter-well Tracer Test, Inter-well Tracer Test

For citation: Verzhbitsky V.V., Shchekin A.I., Gunkina T.A., Handzel A.V., Verzhbitskaya V.V. Analysis and prospects for the development of indicator (tracer) methods for studying oil and gas reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 47–65. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4683

Введение

В современном мире цифровых технологий для эффективного проектирования, разработки и эксплуатации месторождений нефти и газа обязательным элементом является создание 3D геолого-гидродинамических моделей. Геолого-гидродинамическое моделирование позволяет анализировать текущее состояние разработки месторождений, прогнозировать геолого-технологические условия в продуктивных пластах, обосновывать методы воздействия на залежь и программы геолого-технических мероприятий.

Для создания и эффективного использования геолого-гидродинамической модели необходимо систематизировать и анализировать геолого-промысловую информацию, полученную в процессе эксплуатации и при проведении лабораторных, газогидродинамических, геофизических, трассерных (индикаторных) и других методов исследования. От достоверности, целостности и содержательности анализируемой информации зависит результативность получаемых имитационных данных и, как следствие, обоснованность регулирования технологических режимов работы скважин, эффективность планирования программ геолого-технических мероприятий и в целом рентабельность разработки нефтегазового месторождения.

В настоящее время в научных работах большое внимание уделяется методологии проведения и интерпретации результатов трассерных исследований. В сравнении с результатами обработки лабораторных анализов кернового материала, газогидродинамических и геофизических исследований, достаточно точно оценивающих область призабойной зоны пласта, индикаторные методы исследования позволяют достоверно и информативно оценить межскважинное пространство пласта-коллектора.

Значительное увеличение различных типов индикаторных методов исследования пластов на нефтегазовых месторождениях в последние годы связано в первую очередь со стремительным развитием науки и техники, в том числе с созданием высокочувствительной аппаратуры, позволяющей проводить достаточно точную количественную и качественную оценку индикаторов, с разработкой и подбором новых типов веществ, отвечающих необходимым требованиям и используемым в качестве трассеров. Потребность в объективных и точных исследованиях межскважинного пространства также связана с ухудшением структуры геологических запасов нефти и газа, так как многие крупные и уникальные месторождения нефти и газа вступили в заключительную стадию разработки, а новые разведанные залежи часто характеризуются значительной тектонической и литологической неоднородностью, низкими фильтрационно-емкостными свойствами продуктивных пластов, аномальностью физико-химических параметров добываемого флюида и специфичностью термобарических условий в коллекторах [1, 2].

Наибольшее распространение трассерные методы исследования межскважинного пространства продуктивных пластов получили на нефтяных месторождениях. Прежде всего результаты интерпретации трассерных исследований используются для уточнения геолого-гидродинамических моделей. Анализ научных источников показал, что часто смоделированные траектории и скорости потоков флюида в продуктивном пласте не подтверждаются данными трассерных исследований. Так, например, в работе [3] для нескольких нефтяных месторождений сходимость данных имитации гидродинамических процессов в пласте и результатов обработки индикаторных исследований составляет 50–60 %.

В статье [4] представлены данные по сопоставлению результатов обработки трассерных исследований, проведенных на Северо-Ореховском месторождении, с показателями многофакторного математического анализа. По итогам сравнения установлено, что сходимость данных составляет 65 %. Геолого-гидродинамические модели месторождений в подавляющем большинстве случаев строятся на осреднённых геолого-технологических параметрах пласта-коллектора, полученных косвенными методами, не всегда отражающими действительные процессы, происходящие в межскважинном пространстве. Как отмечено в работе [5], геолого-гидродинамические модели отражают реальные физические параметры пласта с погрешностями, так как создание и адаптация модели основаны на формальном подходе сопоставления ретроспективных промысловых и модельных данных, что может привести к не совсем точным оценкам фильтрационно-емкостных параметров продуктивного пласта.

Трассерные исследования являются практически единственным безальтернативным методом, позволяющим объективно с физической точки зрения оценить реальные гидродинамические связи между скважинами. Важность информации, получаемой по результатам интерпретации обработки трассерных исследований, заключается в надёжности и однозначности, что позволяет значительно уменьшить неопределённости в отношении путей фильтрации флюида, наличия неоднородности и особенностей гидродинамической связи в продуктивных пластах.

Методология и методы проведения индикаторных исследований

Большинство современных научных трудов по методологии проведения индикаторных исследований базируются на работах [6, 7], где обобщены экспериментальные и практические примеры применения трассеров различных типов, рассмотрены методики проведения и обработки результатов трассерных исследований.

Область научных задач, решаемых с применением индикаторных методов исследования, постоянно расширяется. Благодаря использованию единой техники и методологии, трассерные исследования позволяют решать разнообразные геолого-технологические задачи при проектировании и анализе разработки нефтяных и газовых месторождений. Методология трассерных исследований предусматривает различные сценарии их проведения. Цели и задачи проведения трассерных исследований многочисленны и включают такие направления, как диагностика технического состояния эксплуатационных колонн скважин и герметичности цементного камня, оценка эффективности проведения операций по воздействию на пласт и геолого-технических ме-

роприятий, контроль процесса заводнения залежи, определение величины остаточной нефтенасыщенности продуктивного пласта и области дренирования/нагнетания скважины, направлений и скоростей фильтрационных потоков пластового флюида, выявление зон гидродинамической разобщённости между скважинами и участками продуктивного пласта, а также межпластовых перетоков за пределы эксплуатационного объекта и, как следствие, целостного эффективного проектирования и/или регулирования разработки и эксплуатации месторождений нефти и газа [8–12]. Хотя спектр решаемых задач с применением индикаторных методов исследования является широким, объектами исследования чаще всего выступают элементы конструкции скважины, призабойная зона пласта, область дренирования/нагнетания скважины, участки очагового заводнения, а также пространство пласта-коллектора, освоенного группой нагнетательных и добывающих или наблюдательных скважин.

Для решения поставленных задач в таблице представлено сопоставление основных целей, достигаемых с помощью индикаторных исследований, в соответствии с объектом изучения и методом исследования.

Индикаторные методы обследования технического состояния эксплуатационных колонн чаще относят к геофизическим методам исследования, поэтому в таблице приведены как аргумент, что объектом исследования при использовании трассеров, кроме пластов-коллекторов, могут быть и эксплуатационные скважины. Прежде всего, трассерные методы исследования ориентированы на изучение обширных областей межскважинного пространства и геолого-технологических условий в призабойной зоне пласта-коллектора.

Метод стационарного источника индикатора

Технология проведения трассерных исследований по методу стационарного источника индикатора предусматривает выполнение работ на одной конкретной скважине, при этом объектом исследования является область призабойной зоны пласта.

Количественная оценка величины остаточной нефтенасыщенности в призабойной зоне пласта

Для оценки величины остаточной нефтенасыщенности в области призабойной зоны продуктивного пласта в 1970-х гг. разработан метод Single Well Chemical Tracer Tests (SWCTT) [13], который основан на использовании принципов распределительной хроматографии, т. е. на разделении индикаторов между неподвижной (нефть) и подвижной (вода) фазами. В качестве первичного индикатора используются сложные эфиры, чаще всего этилацетат [13, 14], который закачивают вместе с жидкостью заводнения в исследуемую скважину, и временно приостанавливают эксплуатацию.

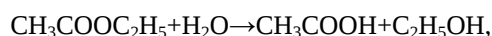
Таблица. Выбор индикаторного метода в зависимости от цели и объекта исследования

Table. Selection of indicator method depending on the goal and the object of study

Цель исследования Purpose of study	Объект исследования Study object	Метод исследования Study method
Оценка технического состояния обсадных колонн и выявление мест заколонных перетоков Casing integrity evaluation and revealing places of behind-casing cross flows	Конструкция скважины Well design	Индикаторные методы обследования технического состояния эксплуатационных колонн и межколонного пространства Indicator studies of casing and annular space integrity
Определение мест нарушения герметичности цементного камня в заколонном пространстве и выявление зон водопритока Determining places of cement stone permeability in behind-casing space and zones of water flooding		
Количественная оценка величины остаточной нефтенасыщенности призабойной зоны пласта Numerical estimation of residual oil saturation in near-well bore zone	Призабойная зона пласта Near-well bore zone	Метод стационарного источника индикатора Stationary Tracer Source
Оценка эффективности проведения мероприятий по воздействию на пласт Estimation of reservoir treatment		
Оценка эффективности проведения гидравлического разрыва пласта Estimation of hydrofracturing		
Оценка притока нефти и воды по интервалам горизонтального ствола скважины Estimation of influx of oil and water along horizontal wellbore intervals		
Оценка остаточной нефтенасыщенности зоны дренирования/нагнетания скважин Assessment of residual oil saturation in the drainage/injection zone of wells	Области дренирования/нагнетания скважин Well drainage/injection areas	Межскважинные исследования разделяющимися трассерами Partitioning inter-well tracer test
Оценка методов увеличения нефтеотдачи Evaluation of enhanced oil recovery methods		
Оценка эффективности геолого-технических мероприятий Evaluation of well interventions		
Определение положения и динамики продвижения водонефтяного контакта и контроль процесса заводнения Determination of the position and dynamics of the oil-water contact and control of the waterflooding process	Участок очагового заводнения Focal flooding area	
Определение причин обводнения скважин Determining the causes of well watering-out		
Определение гидродинамических связей по площади и разрезу залежи Determination of hydrodynamic connections by area and section of the deposit	Участок залежи с группой нагнетательных и добывающих скважин Section of a deposit with a group of injection and production wells	Метод контрольных скважин Inter-well tracer test
Определение направлений и скоростей фильтрационных потоков пластового флюида Determination of directions and velocities of formation fluid filtration flows		
Определение фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов Determination of filtration and capacitance properties of productive formations		
Выявление зон гидродинамической разобщенности между скважинами и участками залежи Identification of zones of hydrodynamic isolation between wells and deposit areas		
Выявление межпластовых и латеральных перетоков за пределы эксплуатационного объекта (техногенные залежи) Identification of interlayer and lateral flows beyond the boundaries of the production facility (technogenic deposits)		
Эффективное проектирование (регулирование) разработки и эксплуатации месторождения нефти и газа Effective design (regulation) of development and operation of oil and gas fields	Месторождение в целом Deposit as a whole	Комплексное исследование индикаторными методами Comprehensive research using indicator methods

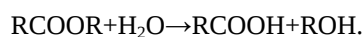
За время технологической остановки скважины в призабойной зоне пласта активизируются два процесса. Фазовое перераспределение эфира между водой и нефтью, а также химическая реакция гидролиза в водной фазе. В результате протекания реакции гидролиза в пластовых условиях образуется вторичный водорастворимый не разделяющийся индикатор, в рассматриваемом случае – этанол. На рис. 1 представлена схема проведения исследований по технологии SWCTT.

Уравнение химической реакции имеет следующий вид:



где этилацетат ($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$) – первичный индикатор, этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) – вторичный индикатор.

В качестве трассеров, помимо этилацетата, используют этилформиат, метилформиат, пропилформиат и другие сложные эфиры [15]. При использовании в качестве первичного индикатора сложных эфиров уравнение химической реакции будет иметь следующий вид:



Продолжительность технологической остановки скважины зависит от скорости реакции гидролиза. За время бездействия скважины 10–50 % массы первичного индикатора, распределенного в водной фазе, должно вступить в реакцию гидролиза [16]. Скорость реакции гидролиза в пластовых условиях зависит от минерализации и pH пластовой воды, а также от вещества, используемого в качестве трассера. В связи с тем, что взаимодействие сложных эфиров с водой происходит достаточно медленно, контрольную скважину оставляют в бездействии на период от 2 до 10 дней [7]. После ввода скважины в работу в процессе эксплуатации отбирают и в лабораторных условиях анализируют пробы добываемого флюида. В условиях двухфазной фильтрации, так как процесс перераспределения индикаторов является равновесным, фронт первичного трассера будет отставать от фронта вторичного трассера. Разница во времени прибытия между первичным и вторичным индикатором зависит от количества остаточной нефти.

Для объективности проведения исследований в процессе закачки первичного индикатора в водный раствор добавляется «индикатор материального баланса», который не растворяется в нефти. «Индикатор материального баланса» необходим для подтверждения объема выхода вторичного индикатора. Если происходят значительные потери или дрейф флюида из-за добычи или закачки из близлежащих скважин, трассер материального баланса и вторичный трассер предоставят доказательства, показывая искаженные профили по возвращению в ствол скважины [15]. В качестве индикаторов материального баланса часто используют пропиловый и изопропиловый спирты [13], хорошо растворяющиеся в воде и не растворяющиеся в нефти.

По результатам отбора и анализа проб скважинной продукции находят зависимость концентрации трассера от времени выноса каждого из индикаторов. Типовой график зависимости концентрации первичного и вторичного трассеров от времени выноса представлен на рис. 2 [17–19].

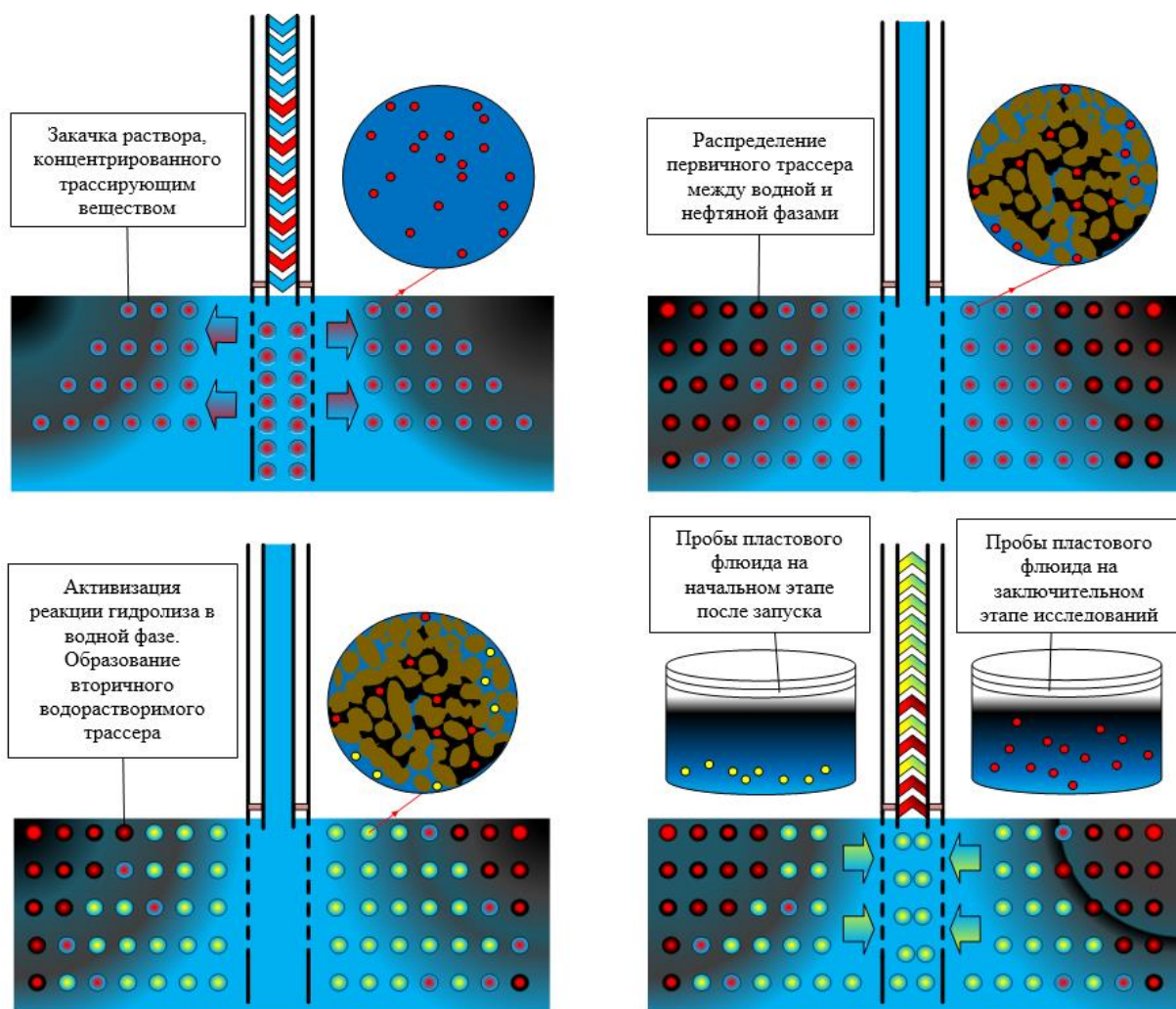


Рис. 1. Схема проведения исследований по технологии SWCTT
Fig. 1. Research flow diagram using SWCTT technology

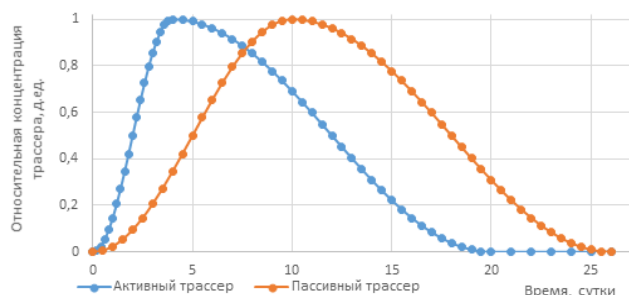


Рис. 2. Типовой график зависимости концентрации первичного и вторичного трассеров от времени выноса

Fig. 2. Typical graph of the dependence of the concentration of primary and secondary tracers on the removal time

Располагая данными о константе распределения и времени выхода максимальной концентрации индикаторов определяют коэффициент остаточной нефтенасыщенности. Наиболее используемые формулы определения остаточной нефтенасыщенности имеют следующий вид [20]:

$$S_o = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2(K-1)} \text{ или } S_o = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2(K-1)},$$

где T_1 и T_2 – соответственно, время выхода первичного и вторичного трассеров, V_1 и V_2 – накопленные объемы выхода первичного и вторичного трассеров, соответствующие максимальной концентрации.

Коэффициент распределения (K) определяется до проведения трассерных исследований в лаборатории на образцах пластовой воды и нефти, отобранных в исследуемой скважине при пластовой температуре, и рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{C_n}{C_v}, \quad (1)$$

где C_n и C_v – концентрации, соответственно, нефти и воды, находящиеся в равновесии.

Формула (1) при лабораторном анализе равных объемов нефти и водного раствора в пробирке (флаконе). Если объемное отношение нефти к водному раствору отличается от единицы, то формула для определения коэффициента распределения будет иметь следующий вид [21]:

$$K = \frac{C_n V_v}{C_v V_n},$$

где V_v и V_n – соответственно, объемы водного раствора и нефти в исследуемом сосуде.

На значение коэффициента распределения оказывают влияние температура в пласте, минерализация и кислотность пластовой воды, состав нефти. В работе [21] проведено исследование влияния температуры и минерализации пластовой воды на значение коэффициента распределения. В лаборатор-

ных условиях в качестве первичного трассера использовался этиловый эфир муравьиной кислоты, в результате проведенных опытов установлено, что при увеличении концентрации солей NaCl , CaCl_2 , BaCl_2 , MgCl_2 в пластовой воде коэффициент разделения возрастает. Аналогичная тенденция наблюдается при повышении температуры в ходе проведения экспериментов. Коэффициент распределения обратно пропорционален эквивалентному числу атомов углерода алканов в нефти. Аналогичные зависимости характерны и для других сложных эфиров, используемых в качестве трассеров при проведении SWCTT.

Исследования влияния таких параметров, как температура в коллекторе, минерализация пластовой воды, состав нефти, на коэффициент распределения первичного индикатора позволяют с достаточной точностью определить время, за которое нужное количество индикатора перераспределится между фазами. Основываясь на скорости протекания реакции гидролиза в конкретных геологических условиях, можно прогнозировать период остановки скважины.

Технология SWCTT апробирована на более чем 600 нефтяных месторождениях с различными геологическими условиями как в карбонатных, так и в терригенных пластах-коллекторах [17, 22]. SWCTT показал обоснованные результаты в широком диапазоне минерализации пластовой воды 0–250 г/л при температурах от 20 до 120 °С. Оценка эффективности проводилась для большинства основных методов процесса заводнения, а именно низкоминерализованной водой (Smart Water), мицеллярно-полимерными растворами и ПАВ, в том числе по технологии ASP и др. [15, 17, 23, 24]. География внедрения подобных исследований охватывает такие районы нефтедобычи, как Западная Сибирь и Прикаспийский регион, Ближний Восток, Северная Европа, Юго-Восточная Азия, Северная Америка, Южная Америка, Восточная Африка [19, 23, 25–28].

Основные недостатки технологии SWCTT заключаются в необходимости закачки больших объемов сложных эфиров, влияющих на нефтенасыщенность в призабойной зоне пласта и тем самым вносящих определенные погрешности в результаты, а также в образовании кислот при протекании реакции гидролиза. Концентрация сложных эфиров в закачиваемом растворе должна составлять около 1 % [13, 17], что требует обращения с большими объемами (до 1000 кг) легковоспламеняющихся и летучих жидкостей. При этом область исследования ограничена призабойной зоной пласта радиусом 3–12 м [17, 29].

С целью улучшения метода SWCTT подбираются новые вещества, используемые в качестве трас-

серов. В статьях [13, 29] представлены вещества, потенциально подходящие к использованию для определения нефтенасыщенности по методу SWCTT. В качестве первичных индикаторов предлагается использовать ароматические спирты, например бензиловый спирт, в котором один из радикалов представлен F, Cl, Br, I. В научных исследованиях [13, 29] предпочтение отдано хлорированному и фторированному бензиловым спиртам. В зависимости от количества присоединённых молекул фтора или хлора (от 1 до 3) спирты будут иметь различные коэффициенты разделения при гидролизе в пластовых условиях. Чем коэффициент разделения больше, тем дальше от исследуемой скважины удалится первичный индикатор и тем самым область исследования пласта расширится. Импульсная поочередная закачка трех и более видов индикаторов позволяет исследовать различные области продуктивного пласта. Область проникновения трассера зависит от величины коэффициента распределения (K). На рис. 3 представлены графики зависимости относительной концентрации трассера от времени выхода. На рис. 3 видно, что время выхода максимальной концентрации трассеров № 1–4 различается. Трассер № 1 имеет наименьший коэффициент разделения по сравнению с трассерами № 2–4 и характеризует наиболее приближенную к скважине область пласта. Время выхода максимальной концентрации трассера № 4 составляет 15 дней, что связано с большим значением коэффициента распределения и наибольшей глубиной проникновения в продуктивный пласт.

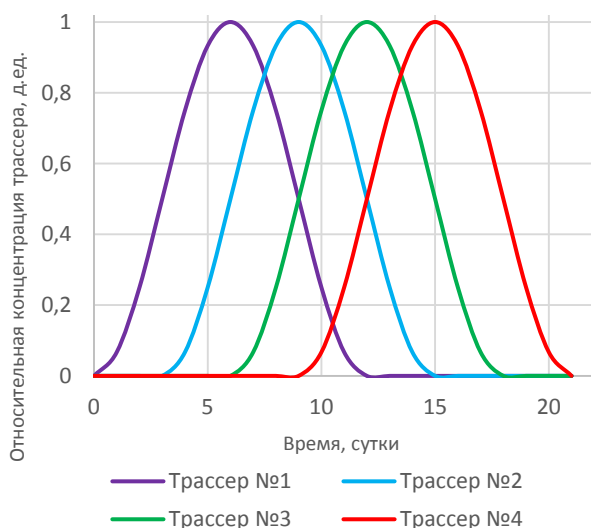


Рис. 3. Графики зависимости концентрации трассеров с различными коэффициентами распределения ($K_1 > K_2 > K_3 > K_4$) от времени выноса

Fig. 3. Graphs of dependence of the concentration of tracers with different distribution coefficients ($K_1 > K_2 > K_3 > K_4$) on removal time

Преимуществами предлагаемых к использованию трассеров в работах [13, 29] являются малая доза и высокая степень обнаружения.

Проведение исследований по методу SWCTT включает в себя множество переменных, таких как объемы и скорость закачки, время остановки и концентрация реагирующего индикатора, скорость реакции и коэффициент распределения. Проектирование дизайна успешного исследования по методу SWCTT предусматривает наиболее точное прогнозирование и определение всех переменных с учетом имеющихся геолого-промысловых данных.

Важным этапом является подбор индикатора, так как от этого зависят такие параметры, как скорость фазового распределения и скорость реакции гидролиза. При этом в программе проведения исследований достаточно точно должны быть обоснованы объем закачиваемого раствора и концентрация трассера [18].

Анализ результатов обработки исследований позволяет оценить эффективность применяемых на месторождении методов повышения нефтеотдачи продуктивных пластов. Оценка эффективности проводится сравнением значений коэффициентов остаточной нефтенасыщенности до и после проведения операций по воздействию на пласт.

Оценка эффективности проведения гидравлического разрыва пласта методом стационарного источника индикатора

Методология проведения трассерных исследований для оценки эффективности ГРП предусматривает закачку индикаторов непосредственно в процессе проведения мероприятия. В работе [30] в качестве первичных индикаторов предлагается использовать соли органических ортофосфорных эфиров с различными радикалами: арильные или алкильные заместители C_7-C_{12} , водород, триэтанолламин и др. При этом закачка первичных индикаторов осуществляется в процессе проведения гидравлического разрыва пласта (ГРП). В процессе закачки жидкости ГРП первичные трассеры проникают и адсорбируются в образовавшихся трещинах и проппанте. Аналогично методу SWCTT в пластовых условиях протекает реакция гидролиза с образованием вторичных трассеров в виде спиртов. В процессе эксплуатации скважины первичные индикаторы медленно десорбируются и в добываемой продукции замеряются концентрации водорастворимых неразделяющихся индикаторов (спирт) и нефтерастворимых разделяющихся индикаторов (органические фосфаты). Предложенная методика проведения трассерных исследований также эффективна при оценке успешности проведения многостадийного гидравлического разрыва пласта (МГРП). При изменении радикалов имеется возможность получения различных соединений, зака-

чанных в различные зоны. На Нонг-Еганском месторождении для оценки МГРП в горизонтальном участке скважины также применялся метод стационарного источника [31] при трассерных исследованиях. В качестве трассеров использовались шарики диаметром около 1 мкм, содержащие частицы люминофора. В результате проведения индикаторных исследований определены притоки в интервалах МГРП и обводненность пропластков.

Достоинство оценки эффективности проведения ГРП по методу стационарного источника индикатора заключается в длительности мониторинга, так как индикаторы адсорбируются на породе, пропанте и других поверхностях и медленно десорбируются за счет фильтрации пластового флюида, накапливаясь в его углеводородной и водной фазах, что позволяет качественно оценить эффективность проведения мероприятия и профиль притока для каждой стадии МГРП [32, 33].

Оценка притока нефти и воды по интервалам горизонтального ствола скважины методом стационарного источника индикатора

Метод стационарного источника индикатора применяется для определения продуктивности и обводненности пласта в работающих интервалах горизонтального ствола скважины. При этом используются полимерные матрицы с интеллектуальными трассерами, которые заключаются в патрубко-носители с перфорированными кожухами на каждом интервале перфорации ствола горизонтальной скважины. В процессе эксплуатации скважины происходит вынос индикаторов различных типов. В каждом патрубко-носителе находятся уникальные полимерные соединения двух типов. Первый тип выносятся только нефтью, а второй – только водой. Регистрируя на устье различные типы уникальных для каждого интервала перфорации трассеры, можно оценить работу всего горизонтального ствола скважины, выявить интервалы с малой продуктивностью пласта, порты, к которым подтягивается пластовая вода, и своевременно и верно запланировать соответствующие геолого-технические мероприятия.

Технология интеллектуальных индикаторов притока успешно апробирована в условиях Крайнего Севера на Северо-Комсомольском месторождении [34], а также в морских условиях на шельфовых месторождениях [35, 36].

Достоинствами технологии интеллектуальных трассеров являются возможность длительного мониторинга за продуктивностью каждого работающего интервала горизонтальной скважины, так как запаса индикаторов хватает на 5–10 лет непрерывной работы в зависимости от геолого-технологических условий в пласте, и многообразие синтезированных химических полимеров для маркировки нефти и воды. В настоящее время синте-

зировано и внедрено более 150 единиц уникальных индикаторов.

Метод межскважинных исследований разделяющимися трассерами (Partitioning inter-well tracer test)

Оценка остаточной нефтенасыщенности зоны дренирования/нагнетания скважин осуществляется методом Partitioning interwell tracer test (PITT). PITT проводится в обводненных зонах между скважинами, при этом одна из них является нагнетательной [37, 38]. Принцип технологии PITT аналогичен технологии SWCTT. На рис. 4 представлена схема проведения исследований по технологии PITT.

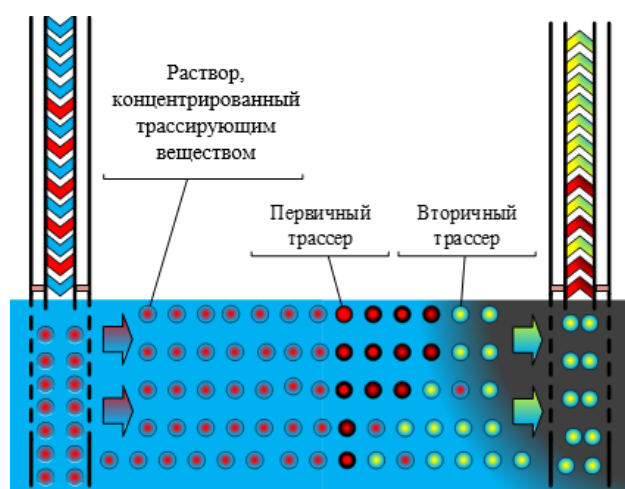


Рис. 4. Схема проведения исследований по технологии PITT
Fig. 4. Scheme of conducting research using PITT technology

Технология PITT была запатентована в 1971 г. практически одновременно с методом SWCTT [39], но не получила широкого распространения в нефтегазовой отрасли. В работах [7, 40, 41] представлены сведения об исследованиях в 1990-х гг., проводимых на небольших участках доломитовых коллекторов, а также в пластах песчаника и известняка, однако проведенные тесты давали противоречивые результаты. Неудачи апробации технологии PITT связаны прежде всего с большой продолжительностью проводимых исследований. Увеличение времени исследования по сравнению с технологией SWCTT связано со значительными расстояниями между нагнетательной и добывающей скважинами. Длительность проведения исследований по технологии PITT не позволяет использовать зарекомендовавшие себя при проведении SWCTT этилацетат и другие сложные эфиры, так как они не обладают достаточной стабильностью. Если проведение исследований по методу SWCTT в среднем составляет 30–60 дней, то для метода PITT время проведения может занимать от 6 месяцев до 3 лет.

Отсутствие специально разработанных и апробированных индикаторов для технологии РИТТ способствовало использованию в качестве трассеров веществ, успешно применяемых в гидрогеологии и недостаточно пригодных для использования в нефтяных пластах из-за температурных ограничений и других факторов.

Новое развитие метод РИТТ получил в 2010-х гг. в связи с подбором новых веществ, используемых в качестве трассеров. В качестве трассеров использовались производные пиразина, а именно алкилпиразины. Пиразины представляют собой бензольные кольца, в которых два атома углерода замещены атомом азота в пара-положении. Алкилпиразины представляют собой просто пиразины с одним или несколькими атомами водорода, замещенными углеводородными группами.

В [39] представлены результаты лабораторных испытаний 2,3-диметилпиразина (99 %), 2,6-диметилпиразина (≥ 98 %), 2,5-диметилпиразина, 2-этилпиразина, 2,3-диэтилпиразина (≥ 98 %). Потенциальные трассеры 2,3-диметилпиразина, 2,6-диметилпиразина обладают необходимой стабильностью и характеризуются отсутствием взаимодействия с горными породами. 2-этилпиразин имеет наибольшее значение коэффициента разделения (K), чем любой из диметилпиразинов для идентичных экспериментальных условий. Температура системы и соленость водной фазы вызывают увеличение значения K исследуемых трассеров.

По результатам исследований [39] можно сделать вывод, что группа соединений алкилпиразинов имеет большой потенциал в качестве кандидата в трассеры фазового разделения при проведении исследований по методу РИТТ. В работах [38, 20] представлены сведения об успешных испытаниях трассеров из группы соединений алкилпиразинов на месторождениях Франции. В качестве растворимого только в водной фазе трассера использовалась фторированная бензойная кислота.

Положительные результаты апробации метода РИТТ способствуют дальнейшему развитию технологии, так как более обширная область исследования пласта по сравнению с методом SWCTT является неоспоримым преимуществом.

Метод контрольных скважин (Interwell tracer test)

Метод контрольных скважин заключается в прослеживании фильтрационных потоков между скважинами в пределах значительных объемов горных пород [6]. Как видно из таблицы, метод контрольных скважин позволяет решать спектр задач, возникающих при разработке нефтегазовых месторождений. Основными и наиболее важными целями и задачами проведения индикаторных исследований методом контрольных скважин при

этом являются оценка эффективности проведения операций по воздействию на пласт и геолого-технических мероприятий, контроль процесса заводнения залежи, определение направлений и скоростей фильтрационных потоков пластового флюида, выявление зон гидродинамической разобщенности между скважинами и участками продуктивного пласта, а также межпластовых перетоков за пределы эксплуатационного объекта и т. д.

Определившись с областью исследования пласта-коллектора и основными решаемыми задачами выполнения трассерных исследований, необходимо проанализировать геолого-технологические условия в залежи по имеющимся промысловым данным и информации, полученной при проведении геофизических, газо- гидродинамических и других исследований. Проанализировав имеющиеся данные о расположении скважин, термобарических и фильтрационно-емкостных параметрах продуктивного пласта, физико-химических свойствах пластового флюида, необходимо подобрать вещества, используемые в качестве индикаторов.

Внедряемые индикаторы не должны нарушать геохимического равновесия в объекте исследования и законов нормальной фильтрации флюида. При этом используемый трассер не должен оказывать влияния на экологическую обстановку, быть безопасным при проведении мероприятий по исследованию и при последующем использовании добываемой продукции.

Классификация веществ, используемых в качестве трассеров

1. *Ксантеновые красители* [42]: (производные флуоресцеина (диоксифлуорана): родамин, уранин, эозин, эритрозин и другие. Основным свойством данных органических веществ, способствующим их использованию в качестве индикаторов, служит ярко выраженная флуоресценция. Флуоресценция – способность веществ преобразовывать ультрафиолет в цвета видимой части спектра. Для идентификации трассеров в добываемой продукции используют флуоресцентную микроскопию, позволяющую идентифицировать трассеры при концентрации от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. Трассеры, представляющие собой микрочастицы сферической формы диаметром 0,5–1,5 мкм, апробированы на Лесном, Западно-Варьганском, Онбийском, Гремехинском, Сиреневском, Бавлинском, Белокаменном, Аксубаево-Мокшинском, Северо-Хохрякском, Ромашкинском, Самотлорском и многих других нефтяных месторождениях [43–45].
2. *Ионные индикаторы*. Наибольшее распространение получили различные нитраты (селитры): натрия, калия, аммония и др. Также в качестве ионных индикаторов используются диамины

угольной и тиоугольной кислот (карбамид, тиомочевина), неорганические соединения, например, тиоцианат аммония (роданид аммония), тиоцианат калия (роданид калия, роданистый калий) и другие соли. При использовании нитратов в процессе гидролиза образуются катионы (Na^+ , K^+ , NH_4^+) и анионы кислотного остатка (NO_3^-).

Основным методом определения NO_3^- является фотоколориметрический анализ, при этом зафиксировать трассер можно при концентрации от $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, в зависимости от минерализации пластовой воды. Кроме NO_3^- в качестве ионных индикаторов используются NO_2^- , I^- , Cl^- и др.

3. *Радиоизотопное трассирование.* Одним из первых трассеров, получивших практическое применение, является радиоактивный тяжелый изотоп водорода – тритий H^3 . Суть метода заключается в нагнетании в скважину тритиевой воды, в которой атом водорода заменен на атом трития, что дает возможность уловить испускаемое изотопом β -излучение и рассчитать концентрацию трассера в пластовой воде. В практике применения трассерных исследований в качестве трассеров использовались изотопы йода I^{131} , брома Br^{82} , золота Au^{198} , хрома Cr^{51} , кобальта Co^{60} , хлора Cl^{36} и др. Радиоизотопное трассирование проводилось на месторождениях Ставропольского края, Татарстана, Краснодарского края, Пермского края, Тюменской, Самарской, Волгоградской, Саратовской, Сахалинской областей РФ, а также в США, Великобритании, Франции, Канаде, Румынии и других странах [6, 7].
4. *Органическими трассерами* служат органические кислоты и спирты, такие как метанол, бутанол, этанол, пропанол, изопропанол, изомеры фторбензойной кислоты, а также стабильные радикалы (2,2,6,6-тетраметил-4-оксиперидин-1-оксил) и амины нитроксильных радикалов [10]. Определение концентрации органических трассеров в отбираемых пробах добываемой продукции проводят методом газовой хроматографии или в селективных капиллярных колонках.
5. *Газовые трассеры.* В качестве газовых трассеров в разное время использовались инертные газы: гелий He , радиоизотопы криптона Kr^{85} и ксенона Xe^{133} , а также тритированные метан, этан, пропан, бутан и др. [7]. В настоящее время одним из самых применяемых газовых индикаторов является изотоп одноатомного инертного газа радона – Rn^{222} [46]. Индикаторный метод с использованием изотопа радона применяется для определения интервалов нарушения эксплуатационных колонн и цементного камня в колонном пространстве, профиля приемистости скважин и остаточной нефтенасыщенности, а

также для оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта и эффективности проведения ГТМ. В России за последнее десятилетие индикаторные исследования с использованием Rn^{222} проведены на Чухонастовском, Бахметьевском, Павловском, Комсомольском, Ключевском, Северо-Шаджинском, Памятно-Сасовском, Талинском, Жирновском, Котовском, Коробковском, Олейниковском и других месторождениях нефти и газа.

6. *Индикаторы с квантовыми точками (полимерная матрица на проппанте) и интеллектуальные трассеры притока (химические ДНК-трассеры).* Индикаторные исследования с маркерами из квантовых точек и с химическими ДНК-трассерами апробированы для оценки эффективности проведения многостадийного гидравлического разрыва пласта, в том числе в горизонтальных скважинах [9, 47, 48]. Интеллектуальные трассеры притока – это полимерные соединения, состоящие из повторяющихся нуклидов. В качестве квантовых точек используются синтезированные нанокристаллы, покрытые молекулами, состоящими из атомов диаметром 2–10 мкм, имеющих адсорбирующие свойства за счет поверхностно-активных молекул. Синтезированные нанокристаллы наносятся на проппант. Комбинации квантовых точек формируют код (сигнатуру) маркера. Преимущество использования данной технологии заключается в возможности синтеза до 50 единиц различных типов маркеров. Технология оценки эффективности проведения МГРП получила подтверждение работоспособности в России на месторождениях ХМАО [49], а также в других странах [50, 51]. Для определения концентрации трассеров используют методы цитометрического анализа.

Технологии исследований с химическими интеллектуальными индикаторами притока и индикаторами с квантовыми точками, несомненно, являются одними из наиболее перспективных. По классификации, представленной в работе [52], технологии относятся к четвертому поколению индикаторов, так как в качестве трассеров используются вещества, которые практически, а чаще полностью, отсутствуют в продуктивных пластах, при этом точность измерения достигает уровня в $1 \cdot 10^{-15}$ (ppq), т. е. идентификация трассера возможна при концентрации $1 \cdot 10^{-13}$ % в исследуемой пробе добываемого флюида. Однако, как отмечено в работе [49], основными недостатками технологии химических интеллектуальных индикаторов притока на данном интервале ее развития являются недостаточно широкое внедрение таких индикаторов, из-за чего увеличиваются трудозатраты и стоимость исследований, что связано с синтезом уни-

кальных индикаторов и необходимостью создания индивидуального проекта для каждой исследуемой скважины. Несомненно, технологии химических индикаторов, так же, как и методы исследования с использованием полимерных матриц на проппанте, являются будущими флагманами развития методологии проведения трассерных исследований. Необходимо продолжать расширение спектра решаемых задач с использованием трассеров четвертого поколения, так как в настоящее время область их применения ограничена исследованиями призабойной зоны пластов, вскрытых горизонтальными скважинами с МГРП или оценкой эффективности работы трещин ГРП.

Ко второму и третьему поколению индикаторов относятся радиоактивные изотопы, принадлежность которых определяется такими параметрами, как период полураспада, безопасность работ и сложность синтеза. Идентификация радиоизотопного трассера в добываемой продукции возможна при концентрации 1 мг/т. Однако использование изотопов в качестве трассеров в настоящее время незначительно, что в первую очередь связано с потенциальной возможностью радиоактивного заражения. Несмотря на соблюдения всех норм и правил промышленной безопасности, зафиксированы аварийные ситуации при проведении исследований. Например, при закачке состава в скважину с использованием изотопа кобальта (Co^{60}) в качестве индикатора, применявшегося на месторождениях в британском секторе Северного моря, в результате аварии по неустановленным причинам, но скорее всего из-за ошибок, допущенных при приготовлении водной суспензии, произошло закупоривание насосно-компрессорных труб и последующее радиационное загрязнение [7]. После этого инцидента использование изотопа кобальта запрещено в Великобритании. На отечественных предприятиях снижение исследований с радиоактивными трассерами связано с происшествием на Чернобыльской АЭС [53], после которого произошло переосмысление работ с использованием изотопов, и приоритет был отдан трассерам первого поколения.

К трассерам первого поколения относятся различные химические соединения: ксантеновые красители, анионы кислотных остатков, органические соединения, соли, кислоты. Современные приборы позволяют определять наличие трассеров первого поколения в пробах добываемого флюида при концентрации выше 1–100 мг/кг. Индикаторы первого поколения в настоящее время являются наиболее распространёнными в нефтегазодобывающей отрасли. Химические индикаторы имеют очевидные преимущества при обращении и утилизации, а также позволяют избежать радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Газовые трассеры не получили широкого применения на нефтяных месторождениях, так как использование газовых индикаторов в основном необходимо для отслеживания только газовой фазы. В связи с тем, что практически все газы смешиваются как с нефтью, так и с водой, в соответствии с их коэффициентами распределения, скорость движения газовых трассеров отличается от скорости фильтрации флюида, поэтому информации по разработке методов исследования и обработке результатов в научной литературе недостаточно.

После выбора типа индикатора необходимо определиться с объемом вводимых трассирующих частиц, т. е. концентрацией. Как правило, для последующей интерпретации результатов индикаторных исследований наиболее приемлемой является максимальная концентрация, значение которой равно предельной величине растворимости закачиваемого вещества в воде при заданной пластовой температуре. Если по технологическим или техническим причинам достижение максимальной концентрации невозможно, то для последующих расчётов необходимо полученную концентрацию индикатора в воде оценить в процентах от максимально возможной. Количество закачиваемого трассера определяется умножением объема закачиваемого раствора на концентрацию индикаторов в закачиваемой воде.

Успешность проведения исследований зависит от целей и геолого-технологических условий в пласте-коллекторе. Период отбора проб продолжается до обеспечения полного выноса индикатора из пласта с учетом закона сохранения масс и потерь индикатора в пласте в результате молекулярной диффузии, сорбирования молекул трассера на поверхности поровых каналов и возможных перетоков флюида.

Несмотря на то, что проведение трассерных исследований возможно при различных стандартных конструкциях устьевого и подземного оборудования скважин, перед началом работ необходимо убедиться в надлежащем техническом состоянии оборудования нагнетательных и добывающих контрольных скважин. Количество контрольных скважин, участвующих в проведении исследований, зависит от используемой на месторождении сетки скважин и особенностей геологического строения залежи.

До начала исследований в контрольных скважинах необходимо провести отбор фоновых проб наличия концентрации планируемых к использованию индикаторных веществ. Ввод концентрированного раствора индикаторов в нагнетательные скважины осуществляется без нарушения технологического режима работы.

Сразу после закачки меченой жидкости в пласт на контрольных скважинах осуществляются отбо-

ры проб для регистрации индикаторов в добываемом флюиде. Частота отбора проб определяется, прежде всего, решаемой задачей.

На начальном этапе развития основной задачей трассерных методов исследования являлось установление наличия гидродинамической связи между скважинами. Стоит отметить, что эта важная задача может быть решена исключительно проведением индикаторных исследований. При этом методология обработки индикаторных исследований сводится к регистрации поступления или неприбытия индикатора к добывающей скважине, основным инструментом при этом являются качественные методы обработки результатов. Качественные методы обработки результатов являются наиболее простыми, но при этом одними из широко используемых в нефтегазовых компаниях. Качественный анализ дает однозначную информацию о непрерывности коллектора и наличии различных геологических и литологических барьеров. В рассматриваемом случае основным критерием частоты отбора проб будет фиксация трассера в контрольной добывающей скважине.

В ранних научных работах [6, 7] моделировался однородный пласт с двухфазной фильтрацией пластового флюида. Дальнейшее развитие индикаторных методов представило возможность получения количественной оценки параметров пласта на основе аналитических решений и численных методов, позволяющих определить фильтрационно-емкостные параметры пласта по результатам обработки трассерных исследований. При этом, если ставится задача определения фильтрационных параметров пласта по результатам обработки трассерных исследований, частота отбора резко увеличивается, так как важно зарегистрировать не только факт появления трассера, но и особенности кривой «концентрация трассера – время».

Типовой график зависимости концентрации трассера в добываемом флюиде от времени представлен на рис. 5.

Вид кривой «концентрация трассера – время» (рис. 5) характеризует степень неоднородности

пласта. Пики на кривой «концентрация трассера – время», чередующиеся с пробами флюида без трассера, могут свидетельствовать о многочисленности путей фильтрации. При исследованиях карбонатного резервуара множество путей фильтрации указывает на высокую трещиноватость коллектора, а аналогичный график для терригенного резервуара в первую очередь связан со слоистостью пласта и различием проницаемости залегающих прослоев.

Проницаемость пласта можно определить по времени прихода трассера к добывающей скважине. Для определения проницаемости различных каналов фильтрации время прихода трассера определяют по пиковым значениям концентрации на графике «концентрация трассера – время». По площади фигур, ограниченных кривой «концентрация трассера – время» и осью абсцисс, можно определить эффективные толщины прослоев. Разработаны методологические подходы обработки результатов индикаторных исследований для трещинных, трещинно-поровых и поровых коллекторов [6].

Анализ результатов обработки индикаторных исследований на нефтяных месторождениях показал, что основными проблемными вопросами, возникающими в процессе интерпретации, являются:

- обоснование высокой скорости движения индикатора к отдельным скважинам;
- неравномерное по площади распространение количества индикатора между равноудаленными скважинами;
- аргументация пиков концентрации индикатора в отбираемых пробах пластового флюида.

Анализ результатов обработки трассерных исследований на нефтяных месторождениях показывает, что скорость фильтрации пластового флюида достигает значительных величин, исчисляемых сотнями метров в сутки. Так, например, в работе [54] в результате обработки индикаторных исследований силурийских залежей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции установлено, что скорость прохождения трассера колеблется от 0,2 до 120 м/сут.

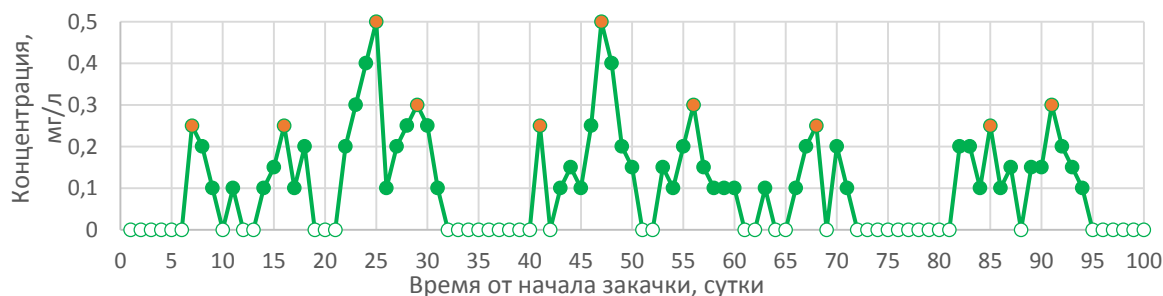


Рис. 5. График зависимости концентрации трассера в добываемом флюиде от времени
Fig. 5. Graph of the dependence of the tracer concentration in the produced fluid on time

Стоит отметить тот факт, что от одной нагнетательной скважины скорость распространения индикаторов по пласту к добывающим скважинам может значительно разниться. Пример: роза-диаграмма скоростей и направлений фильтрации индикаторов представлена на рис. 6.

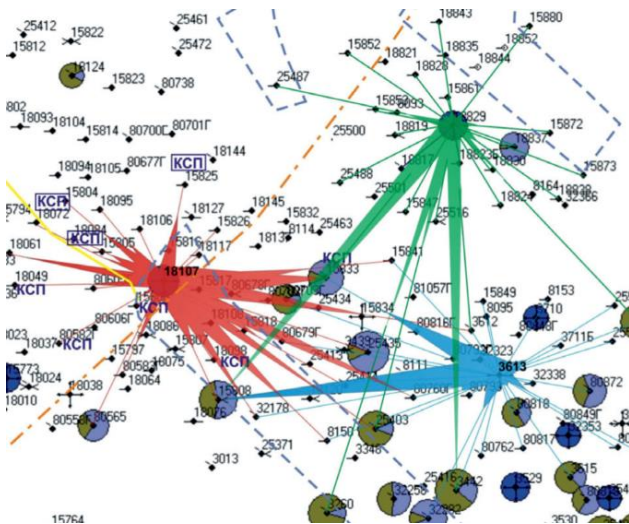


Рис. 6. Роза-диаграмма скоростей индикаторов при исследовании продуктивного пласта AB_1^{-2} Самотлорского месторождения [55]

Fig. 6. Rose diagram of indicator velocities during the study of the productive formation AB_1^{-2} of the Samotlor field [55]

Скорость перемещения трассеров по исследуемому участку продуктивного пласта зависит от типа коллектора и наличия высокопроницаемых каналов фильтрации от нагнетательной до добывающей скважины. Как отмечено в работе [6], первые отбираемые пробы пластового флюида с наличием трассеров, поступающие по высокопроницаемым каналам фильтрации (каналам низкого фильтрационного сопротивления) в добывающую скважину, находятся достаточно быстро, однако доля индикаторов от закачиваемого объема составляет менее 1 %. Наибольший интерес вызывает момент поступления максимальной концентрации индикаторов. Сопоставление скоростей прихода первых проб индикатора и проб с максимальной концентрацией трассеров позволяет на качественном уровне говорить о степени неоднородности исследуемого участка продуктивного пласта.

Авторы работы [55] высокую скорость распространения индикатора (сотни метров в сутки) в объеме поровой среды терригенного коллектора объясняют течением меченой жидкости по трещинам авто-ГРП, образованным в процессе заводнения залежи. В статье [56] обосновывается гипотеза, что высокие скорости фильтрации индикаторов

связаны с наличием техногенной трещиноватости в маломощных плотных пропластках внутри продуктивного пласта. В работе [57] представлен опыт проведения индикаторных исследований на месторождениях Западной Сибири, таких как Северо-Ореховское, Самотлорское, Ватинское, Ай-Еганское, Новомолодежное, Покомасовское, Северно-Поточное, Дружное, Средне-Балыкское, Ершовое, Южное и другие. Скорость фильтрации меченой жидкости при проведении индикаторных исследований в некоторых случаях достигала 50 км/сут при средней скорости фильтрации в поровом пространстве 2 м/сут. Автор работы [57] аномально высокие скорости фильтрации закачиваемой воды объясняет наличием в исследуемом пласте сети разветвленных и гидродинамически связанных каналов низкого фильтрационного сопротивления.

В работе [58] представлены результаты индикаторных исследований для решения таких важных задач, как уточнение геологического строения залежи и оценка проводимости геологических разломов сложнопостроенной залежи, выявление гидродинамической сообщаемости блоков разломно-блоковой залежи и источников водопополнения грифоновых водопроявлений на дневной поверхности.

Аналитические решения основаны на математических моделях, позволяющих прогнозировать время прорыва трассера к добывающим скважинам. Аналитические решения разработаны для различных сеток скважин. Математическая модель основывается на предположении, что происходит радиальная двухфазная фильтрация воды, нефти и частиц индикатора через однородные слои в направлении потока. Количество слоев, толщины слоев и проницаемости слоев использовались для представления неоднородности коллектора [59]. В статье [60] методология трассерных исследований успешно апробирована для определения анизотропии продуктивного пласта.

Аналитические методы основаны на простых предположениях, касающихся условий залежи и поведения индикаторов. Развитие IT-технологий в XXI в. способствовало развитию математического моделирования и имитации результатов трассерных исследований. Численные методы являются наиболее точными для анализа результатов трассерных исследований. Большинство разработанных симуляторов используют в своей основе конечно-разностные решения дифференциальных уравнений или же базируются на теории линий тока [61].

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что индикаторные методы исследования

пластов нефтяных и газовых месторождений зарекомендовали себя как один из самых информативных способов получения данных о межскважинном пространстве пластов-коллекторов, что необходимо для уточнения геолого-гидродинамических моделей. Развитие индикаторных методов исследования обосновано постоянным расширением области решаемых научных задач. Основными методами индикаторных исследований являются методы стационарного источника индикатора и контрольных скважин. Выбор метода исследования зависит от поставленных производственных или научно-исследовательских целей.

Индикаторные исследования методами контрольных скважин решают более широкий класс задач, чем метод стационарного источника индикатора. Методология проведения исследований до-

статочно хорошо апробирована. Перспективы развития индикаторных методов исследования связаны с разработкой новых типов трассеров и методик интерпретации результатов.

Анализ научной литературы о применении индикаторных методов исследования пластов-коллекторов показал, что они получили наибольшее распространение на нефтяных месторождениях. Данное обстоятельство, в первую очередь, связано с историей развития трассерных методов исследования, так как наибольшее использование было связано с целью контроля за процессом заводнения залежи. Перспективным направлением развития индикаторных методов исследования является мониторинг процессов, протекающих в пластах-коллекторах на газовых месторождениях и подземных хранилищах газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анкудинов А.А., Архипов В.Н., Стариков М.А. Особенности формирования технологических решений по разработке залежей ТРИЗ, характеризующихся сверхнизкой проницаемостью и наличием аномально высокого пластового давления // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2022. – № 8. – С. 70–74.
2. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Давыдов А.В. Проблемы трансформации запасов углеводородного сырья в нерентабельную техногенную категорию трудноизвлекаемых // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 4. – С. 38–43.
3. Комплекс инновационных технологий для геолого-технологического моделирования нефтяных месторождений / С.В. Костюченко, А.С. Бордзиловский, И.С. Игнатов, Д.О. Скворцов, К.С. Григорьев, Е.И. Шапиева // *Современные технологии гидродинамических исследований скважин на всех стадиях разработки месторождений: Материалы 8-й науч.-техн. конф. / под ред. канд. техн. наук В.В. Лаврова*. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. – 98 с.
4. Анализ результатов трассерных исследований на примере пласта АС1-3 Северо-Ореховского месторождения / В.Ф. Дягилев, С.Т. Полищук, С.А. Леонтьев, В.М. Спасибов // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2018. – № 4 (130). – С. 44–51.
5. Хозяинов М.С., Чернокожев Д.А. Результаты изучения фильтрационной неоднородности пласта ЮВ1 методом индикаторных (трассерных) исследований // *Каротажник*. – 2012. – № 2 (212). – С. 3–14.
6. Соколовский Э.В., Соловьев Г.Б., Тренчиков Ю.И. Индикаторные методы изучения нефтегазоносных пластов. – М.: Недра, 1986. – 157 с.
7. Zemel B. Tracers in the oil Field. – New York: Elsevier Science, 1995. – 486 p.
8. Хозяинов М.С., Чернокожев Д.А., Кузнецова К.И. Индикаторный (трассерный) метод исследования фильтрационных процессов в нефтяном пласте – М.: Общество с ограниченной ответственностью Изд-во «КУРС», 2022. – 128 с.
9. Регулирование процесса выработки запасов углеводородов на основе динамического трассерного мониторинга профиля притока горизонтальных скважин / К.Н. Овчинников, Ю.А. Котенёв, Ш.Х. Султанов, А.В. Чибисов, Д.Ю. Чудинова // *Георесурсы*. – 2022. – Т. 24 (4) – С. 126–137.
10. Конев Д.А. Исследование нефтяных пластов с помощью индикаторного метода // *Современные наукоемкие технологии*. – 2014. – № 7-2. – С. 23–26.
11. Красноперова С.А. Исследование нефтяных пластов при помощи трассерного метода // *Нефтяная провинция*. – 2021. – № 4-2 (28). – С. 353–365.
12. Методы маркерной диагностики для контроля разработки месторождения. Классификация, структурирование и терминология / А.Г. Камышников А.А. Лутфуллин А.Т. Зарилов, А.Н. Береговой, В.Ю. Воробьев // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 7. – С. 18–23.
13. A step change for single-well chemical-tracer tests: field pilot testing of new sets of novel tracers / M.A. Al-Abbad, M. Sanni, S. Kokal, A. Krivokapic, C. Dye, Ø. Dugstad, S.K. Hartvig, O.K. Huseby // *SPE Res Eval & Eng*. – 2019. – Vol. 22. – P. 253–265. DOI: <https://doi.org/10.2118/181408-PA>
14. Определение остаточной нефтенасыщенности методом разделяющихся трассеров в лабораторных условиях / Ф.А. Корякин, Н.Ю. Третьяков, О.Б. Абдулла, В.Г. Филиппов // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2020. – № 6 (144). – С. 131–143.
15. Numerical interpretation of single well chemical tracer tests for ASP injection / A.H. de Zwart, W.M. Stoll, P.M. Boerrigter, D. W. van Batenburg, S.S. Al Harthy // *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. – Manama, Bahrain, 2011. – P. 318–325. DOI: <https://doi.org/10.2118/141557-MS>
16. Deans H., Carlisle C. The single-well chemical tracer test – a method for measuring reservoir fluid saturations // *Petroleum Engineering Handbook Vol. 5 – Reservoir Engineering and Petrophysics / Ed. by E. Holstein*. – Richardson, Texas: SPE, 2007. – Ch. 5. – P. 615–648. DOI:10.2307/3616786
17. A 1D analytical solution to determine residual oil saturations from single-well chemical tracer test / Doorwar Shashvat, Tagavifar Mohsen, Varadarajan Dwarakanath // *SPE Improved Oil Recovery Conference, Virtual*. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.2118/200420-MS>

18. Simulation of single well tracer tests for surfactant-polymer flooding / P.X. Bu, A.M. Abdulkareem, J. Liu, L. Benedek, H. Ming / SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition. – Al-Khobar, Saudi Arabia, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2118/172229-MS>
19. Design, operation, and laboratory work for single-well tracer test campaign in Handil field Indonesia / A. Mechergui, N. Agenet, C. Romero, M. Nguyen, J. Batias // SPE Enhanced Oil Recovery Conference. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/165227-MS>
20. Application of a new class of chemical tracers to measure oil saturation in partitioning interwell tracer tests / S.O. Viig, H. Juilla, P. Renouf, R. Kleven, B. Krogn, Ø. Dugstad, O.K. Huseby // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – The Woodlands, Texas, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/164059-MS>
21. Wang S., Shiao B., Harwell J.H. Effect of reservoir conditions on designing single-well chemical tracer tests under extreme brine conditions // Transp Porous Med. – 2018. – P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0934-9>
22. Single well chemical tracer test to determine ASP injection efficiency at Lagomar VLA-6/9/21 Area, C4 Member, Lake Maracaibo, Venezuela / C. Hernández, L. Chacón, L. Anselmi, R. Angulo, E. Manrique, E. Romero, N. de Audemard, C. Carlisle // SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. – Tulsa, Oklahoma, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2118/75122-MS>
23. Low salinity oil recovery: an exciting new EOR opportunity for Alaska's North Slope / P.L. McGuire, J.R. Chatham, F.K. Paskvan, D.M. Sommer, F.H. Carini // SPE Western Regional Meeting. – Irvine, California, 2005. DOI: <https://doi.org/10.2118/93903-MS>
24. Snorre low-salinity-water injection – coreflooding experiments and single-well field pilot / K. Skrettingland, T. Holt, M.T.T. Tveheyo, I. Skjevrak // SPE Res Eval & Eng. – 2011. – P. 182–192. DOI: <https://doi.org/10.2118/129877-PA>
25. Применение технологии SWCTT для оценки эффективности заводнения низкоминерализованной водой карбонатного пласта Харьягинского месторождения / Ю.А. Келлер, А.А. Усков, А.Н. Кривогуз и др. // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 7. – С. 109–113. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-7-109-113.
26. Алгоритм оценки рабочего интервала распределяющегося трассера для применения в односкважинном трассерном тесте / А.Р. Мухутдинова, А.В. Болотов, О.В. Аникин, М.А. Варфоломеев // Георесурсы. – 2022. – Т. 24 (4). – С. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.6>
27. Single well chemical tracer tests to assess low salinity water and surfactant EOR processes in West Africa / C. Callegaro, F. Masserano, M. Bartosek, R. Buscaglia, R. Visintin, S.K. Hartvig, O.K. Huseby // International Petroleum Technology Conference. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-17951-MS>
28. Surfactant-polymer flooding: single well chemical tracer test design and implementation in a major sandstone Kuwaiti reservoir / M.T. Al Murayri, A.A. Hassan, A. Abdul Rahim, B. Decroux, A. Negre, M. Salaun // SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference. – Mishref, Kuwait, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2118/197995-MS>
29. Sayfritz S., Krivokapic A. Springstoff. (Tracers). Norwegian patent 338291, published as WO2015181398 A1 (PCT/EP2015/062180), 3 Dec. 2015.
30. Баженова О.О., Магадова Л.А. Водонефтерастворимые трассеры для контроля работы зон пласта, вскрытых трещиной гидравлического разрыва // Нефтепромысловая химия: Материалы VII Международной научно-практической конференции (XV Всероссийской научно-практической конференции). – М., 19 ноября 2020. – М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2020. – С. 46–48.
31. Яркиева Н.Р., Насыров Э.А., Газизова Э.Р. Использование трассеров для определения параметров гидроразрыва пласта // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 2 (124). – С. 42–51.
32. Бикметова А.Р., Асалхузина Г.Ф. Оценка индивидуальных свойств трещин гидроразрыва пласта по результатам трассерных исследований в горизонтальных скважинах с многостадийными гидроразрывами пласта // Геолого-геофизические исследования нефтегазовых пластов: Сборник научных статей по материалам VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции. – Уфа, 26 мая 2022. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2022. – С. 68–69.
33. Бикметова А.Р., Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я. Оценка параметров трещин в горизонтальных скважинах с многостадийным гидроразрывом пласта путем настройки гидродинамической модели на результаты трассерных исследований // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 11. – С. 118–121. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-11-118-121.
34. Well completion technology evaluation for oil rim field development using permanent tracers: a case study from North-Komsomolskoye Field / R.R. Gashimov, V.V. Salyaev, A.M. Nuykin, G.G. Arzamastsev, A.F. Safin, I.R. Mukhametshin, M.T. Nukhaev, A.V. Prusakov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/187746-MS>
35. Tracer-based monitoring of P&A in offshore fields European Association of Geoscientists & Engineers Source / M. Silva, Ø. Brandvoll, P.A. Hubred, S. Viig // 84th EAGE Annual Conference & Exhibition. – 2023. – P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.2118/214446-MS>
36. The comparison of inflow profiling technologies for ERD wells including PLT, fiber optics DTS, stationary chemical tracers: a case study from the Caspian offshore Yuri Korchagin Field in Russia / S.Y. Shtun, A.A. Senkov, O.I. Abramenko, V.V. Matsashik, I.R. Mukhametshin, A.V. Prusakov, M.T. Nukhaev // SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition. – Baku, Azerbaijan, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/188985-MS>
37. Silva M., Stray H., Bjørnstad T. Stability assessment of PITT tracer candidate compounds: the case of benzyl alcohols // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 167. – P. 517–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peteng.2018.05.017>
38. Pushing the envelope of residual oil measurement: a field case study of a new class of inter-well chemical tracers / M. Sanni, M. Al-Abbad, S. Kokal, Ø. Dugstad, S. Hartvig, O. Huseby // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Dubai, UAE, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2118/181324-MS>
39. Alkylpyrazines – from the “Dinner Table” to the oilfield: a new class of partitioning tracers / M. Silva, M. Ould Metidji, H. Stray, T. Bjørnstad // European Association of Geoscientists & Engineers Source, IOR 2019 – 20th European Symposium on Improved Oil Recovery. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900063>

40. Tang J.S. Interwell tracer tests to determine residual oil saturation to waterflood at Judy Creek Bhl'a'pool // J Can Pet Technol 31. – 1992. DOI: <https://doi.org/10.2118/92-08-06>
41. Lichtenberger G.J. Field applications of interwell tracers for reservoir characterization of enhanced oil recovery pilot areas // SPE Production Operations Symposium. – Oklahoma City, Oklahoma, 1991. DOI: <https://doi.org/10.2118/21652-MS>
42. Перевалов В.П. Ксантеновые красители // Большая российская энциклопедия. Электронная версия. – 2016. URL: <https://old.bigenc.ru/chemistry/text/2638778> (дата обращения: 08.02.2023).
43. Результаты индикаторных исследований на Западно-Варьганском нефтяном месторождении / С.В. Терновая, М.Г. Тарасов, Н.М. Трунов и др. // Ученые записки геолого-географического факультета. – Ростов-на-Дону: Институт наук о Земле, 2004. – С. 156–168.
44. Тарасов М.Г., Никаноров А.М., Трунов Н.М. Использование нового вида трассера для исследования техногенных изменений водонапорных систем нефтяных месторождений // Фундаментальные проблемы нефтегазовой гидрогеологии: Материалы Всерос. конф. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 184–188.
45. Антонов Г.П., Абрамов М.А., Кубарев П.Н. Проведение трассерных исследований для контроля и регулирования процесса заводнения нефтяных залежей в ОАО «Татнефть» // Инженерная практика. – 2015. – № 5. – С. 42–53.
46. Sukanya S., Sabu J. Environmental radon: a tracer for hydrological studies. – Singapore Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2023. – 184 p.
47. Яхин А.Р., Газизова Э.Р., Хазиев А.М. Исследование горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта при помощи химических индикаторов притока // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 1 (135). – С. 22–37.
48. Сопоставление промыслово-геофизических и трассерных методов исследований для контроля профиля притока в горизонтальных скважинах с многостадийным гидроразрывом пласта / З. Калуджер, К.В. Торопов, Р.Р. Муртазин, А.В. Сергейчев, А.Г. Климентьев, Р.М. Тугушев, Р.Г. Хадиев // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 38–41. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-9-38-41.
49. Гурьянов А., Каташов А., Овчинников К. Диагностика и мониторинг притоков скважин с помощью трассеров на квантовых точках // Время коллужинга. Время ГРП. – 2017. – № 2 (060). – С. 42–51.
50. Bionic slow-release hydraulic fracturing proppant and slow release hydraulic fracturing tracer / Ding Shidong, Di Dejie, Gao Jiajia, Khan Waleed, Niu Yingchun, Quan Xu // 55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Virtual. – 2021.
51. Photoluminescent Carbogenic Dots / A.B. Bourlino, A. Stassinopoulos, D. Anglos, R. Zboril, V. Georgakilas, E.P. Giannelis // Chem. Mater. – 2008. – Vol. 20 (14). – P. 4539–4541.
52. Advance on the tracer test technology among wells / Ji Bingyu, Sui Xinguang, Wang Qinglin, Li Qun, Anjian Liu, Tongjing Liu // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Melbourne, Australia, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2118/77874-MS>
53. Возможность определения фильтрационных параметров дисъюнктивных нарушений на нефтяных месторождениях по данным гидродинамических исследований пластов и скважин / С.Г. Вольпин, И.В. Афанаскин, В.А. Юдин, Н.П. Ефимова. – М.: Изд-во ООО «Красногорский полиграфический комбинат», 2018. – 262 с.
54. Распопов А.В., Прокушева С.А. Изучение гидродинамических связей силурийских залежей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции методом трассерных исследований // Нефтяная провинция. – 2022. – № 4 (32). – С. 65–78.
55. Изотов А.А., Афонин Д.Г. Механизм распространения индикатора в терригенном пласте при трассерных исследованиях // Экспозиция Нефть Газ. – 2021. – № 5. – С. 31–34.
56. Ипатов А.И., Залетова Д.В. Причина высоких скоростей фильтрационных потоков при трассировании индикаторами // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2004. – №10. – С. 57–62.
57. Кривова Н.Р. Технологии разработки многопластовых месторождений с разрывными нарушениями: монография. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 96 с.
58. Уточнение геологического строения и степени неоднородности продуктивных пластов по результатам индикаторных исследований / Д.А. Чернокожев, М.С. Хозяинов, М.И. Кузнецов, К.И. Кузнецова // Вестник Международного университета природы, общества и человека "Дубна". Серия: Естественные и инженерные науки. – 2016. – № 2 (34). – С. 68–75.
59. Abbaszadeh-Dehghani Maghsood, Brigham W.E. Analysis of well-to-well tracer flow to determine reservoir layering // J Pet Technol. – 1984. – Vol. 36. – P. 1753–1762. DOI: <https://doi.org/10.2118/10760-PA>
60. Коровин М.О. Особенности определения анизотропных параметров по результатам трассерных исследований пласта Ю11 на примере нефтяного месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 85–90.
61. Поташев К.А., Ахунов Р.Р., Мазо А.Б. Вычисление перетоков флюида между скважинами в фильтрационной модели разработки нефтяного пласта с помощью линий тока // Георесурсы. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 27–35.

Информация об авторах

Вячеслав Владимирович Вержбицкий, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений факультета нефтегазового инжиниринга Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, Пушкина, 1. vverzhbitckii@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4559-6904>

Александр Иванович Щекин, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений факультета нефтегазового инжиниринга Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, Пушкина, 1. ashchekin@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4004-2160>

Татьяна Александровна Гунькина, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений факультета нефтегазового инжиниринга Северо-Кавказского

федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, Пушкина, 1. tgunkina@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3001-3921>

Александр Владиславович Хандзел, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений факультета нефтегазового инжиниринга Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, Пушкина, 1. ahandzel@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5686-8931>

Виктория Владимировна Вержбицкая, старший преподаватель кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений факультета нефтегазового инжиниринга Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, Пушкина, 1. vvchernova@ncfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8169-6921>

Поступила в редакцию: 16.05.2024

Поступила после рецензирования: 12.07.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Ankudinov A.A., Arkhipov V.N., Starikov M.A. Aspects of making technological decisions for the development of hard-to-recover reserves deposits characterized by ultra-low permeability and the presence of abnormally high reservoir pressure. *Exposition Oil Gas*, 2022, no. 8, pp. 70–74. (In Russ.).
2. Shakhverdiev A.Kh., Arefyev S.V., Davydov A.V. Problems of transformation of hydrocarbon reserves into an unprofitable technogenic hard-to-recover reserves category. *Oil industry*, 2022, no. 4, pp. 38–43. (In Russ.).
3. Kostyuchenko S.V., Bordzilovsky A.S., Ignatov I.S., Skvortsov D.O., Grigoriev K.S., Shapieva E.I. Complex of innovative technologies for geological and technological modeling of oil fields. *Modern technologies for hydrodynamic testing of wells at all stages of field development. Materials of the 8th scientific and technical conference*. Ed. by V.V. Lavrov. Tomsk, Tomsk University Publ. house, 2009. 98 p. (In Russ.).
4. Dyagilev V.F., Polischuk S.T., Leontev S.A., Spasibov V.M. Analysis of the tracer studies results: a study of AS₁₋₃ formation of the Severo-Orekhovskoe oil field. *Oil and Gas Studies*, 2018, vol. 4, pp. 44–51. (In Russ.).
5. Khozyainov M.S., Chernozhev D.A. Results of studying the filtration heterogeneity of the YuV1 formation using indicator (tracer) studies. *Karotazhnik*, 2012, no. 2 (212), pp. 3–14. (In Russ.).
6. Sokolovskiy E.V., Solovlev G.B., Trenchikov Yu.I. *Indicator methods to study petroleum formations*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 157 p. (In Russ.).
7. Zemel B. *Tracers in the oil field*. New York, Elsevier Science, 1995. 486 p.
8. Khozyainov M.S., Chernokozhev D.A., Kuznetsova K.I. *Indicator (tracer) method for studying filtration processes in an oil reservoir*. Moscow, KURS Publ. House, 2022. 128 p. (In Russ.).
9. Ovchinnikov K.N., Kotenev Yu.A., Sultanov Sh.H., Chibisov A.V., Chudinova D.Yu. Regulation of hydrocarbon production process based on dynamic tracer monitoring of horizontal well inflow profile. *Georesources*, 2022, no. 24 (4), pp. 126–137. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.11>
10. Konev D.A. Study of oil reservoirs using the indicator method. *Modern science-intensive technologies*, 2014, no. 7-2, pp. 23–26. (In Russ.).
11. Krasnoperova S.A. The investigation of oil reservoirs using the tracer method. *Neftyanaya Provintsiya*, 2021, no. 4-2 (28), pp. 353–365. (In Russ.).
12. Kamyshnikov A.G., Lutfullin A.A., Zaripov A.T., Beregovoi A.T., Vorobyev V.Yu. Tracer technology as production management tool. Classification, structuring and terminology. *Oil industry*, 2022, no. 7, pp. 18–23. (In Russ.).
13. Al-Abbad M.A., Sanni M., Kokal S., Krivokapic A., Dye C., Dugstad Ø., Hartvig S.K., Huseby O.K. A step change for single-well chemical-tracer tests: field pilot testing of new sets of novel tracers. *SPE Res Eval & Eng.*, 2019, vol. 22, pp. 253–265. DOI: <https://doi.org/10.2118/181408-PA>
14. Koryakin F.A., Tretyakov N.Yu., Abdulla O.B., Filippov V.G. Residual hydrocarbon saturation determination with the single-well-chemical-tracer-test under laboratory conditions. *Oil and Gas Studies*, 2020, no. 6, pp. 131–143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2020-6-131-143>
15. De Zwart A.H., Stoll W.M., Boerrigter P.M., Van Batenburg D.W., Al Harthy S.S. Numerical interpretation of single well chemical tracer tests for ASP Injection. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, 2011. pp. 318–325 DOI: <https://doi.org/10.2118/141557-MS>
16. Deans H., Carlisle C. The single-well chemical tracer test – a method for measuring reservoir fluid saturations. *Petroleum Engineering Handbook. Vol. 5, Reservoir Engineering and Petrophysics*. Ed. by E.D. Holstein. Richardson, Texas, SPE, 2007. Ch. 5, pp. 615–648. DOI: [10.2307/3616786](https://doi.org/10.2307/3616786)
17. Doorwar S., Tagavifar M., Varadarajan D. A 1D analytical solution to determine residual oil saturations from single-well chemical tracer test. *SPE Improved Oil Recovery Conference, Virtual*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.2118/200420-MS>
18. Bu P.X., AlSofi A.M., Liu J., Benedek L., Ming H. Simulation of single well tracer tests for surfactant-polymer flooding. *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*. Al-Khobar, Saudi Arabia, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2118/172229-MS>
19. Mechergui A., Agenet N., Romero C., Nguyen M., Batias J. Design, operation, and laboratory work for single-well tracer test campaign in Handil Field Indonesia. *SPE Enhanced Oil Recovery Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/165227-MS>

20. Viig S.O., Juilla H., Renouf P., Kleven R., Krognes B., Dugstad Ø., Huseby O.K. Application of a new class of chemical tracers to measure oil saturation in partitioning interwell tracer tests. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. The Woodlands, Texas, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/164059-MS>
21. Wang S., Shiao B., Harwell J.H. Effect of reservoir conditions on designing single-well chemical tracer tests under extreme brine conditions. *Transp Porous Med.*, 2018. pp. 1–13 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0934-9>
22. Hernández C., Chacón L., Anselmi L., Angulo R., Manrique E., Romero E., De Audemard N., Carlisle C. Single well chemical tracer test to determine ASP injection efficiency at Lagomar VLA-6/9/21 Area, C4 Member, Lake Maracaibo, Venezuela. *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. Tulsa, Oklahoma, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2118/75122-MS>
23. McGuire P.L., Chatham J.R., Paskvan F.K., Sommer D.M., Carini F.H. Low salinity oil recovery: an exciting new EOR opportunity for Alaska's North Slope. *SPE Western Regional Meeting*. Irvine, California, 2005. Doi: <https://doi.org/10.2118/93903-MS>
24. Skrettingland K., Holt T., Tveheyo M.T.T., Skjevrak I. Snorre low-salinity-water injection – coreflooding experiments and single-well field pilot. *SPE Res Eval & Eng.*, 2011. pp. 182–192. DOI: <https://doi.org/10.2118/129877-PA>
25. Keller Yu.A., Uskov A.A., Krivoguz A.N. The application of SWCTT for evaluating the efficiency of low-salinity water flooding at the carbonate reservoir of the Kharyaginskoe oil field. *Oil industry*, 2020, no. 7, pp. 109–113. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2020-7-109-113.
26. Mukhutdinova A.R., Bolotov A.V., Anikin O.V., Varfolomeev M.A. Algorithm for estimating boundary conditions of a distributed tracer for application in a single-well tracer test. *Georesources*, 2022, no. 24 (4), pp. 75–81. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.6>
27. Callegaro C., Masserano F., Bartosek M., Buscaglia R., Visintin R., Hartvig S.K., Huseby O.K. Single well chemical tracer tests to assess low salinity water and surfactant EOR processes in West Africa. *International Petroleum Technology Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-17951-MS>
28. Al Murayri M.T., Hassan A.A., Abdul Rahim A., Decroux B., Negre A., Salaun M. Surfactant-polymer flooding: single well chemical tracer test design and implementation in a major sandstone Kuwaiti Reservoir. *SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference*. Mishref, Kuwait, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2118/197995-MS>
29. Sayfritz S., Krivokapic A. *Sporingsstoff. (Tracers)*. Norwegian patent, no. 338291, 2015.
30. Bazhenova O.O., Magadova L.A. Water-oil-soluble tracers for monitoring the operation of reservoir zones exposed by a hydraulic fracture. *Oilfield chemistry. Proc. of the VII International Scientific and Practical Conference (XV All-Russian Scientific and Practical Conference)*. Moscow, November 19, 2020. Moscow, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin Publ., 2020. pp. 46–48. (In Russ.)
31. Yarkееva N.R., Nasyrov E.A., Gazizova E.R., Fedorin D.A., Khaydarshin R.R. Use of tracers for determination of hydraulic fracturing parameters. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2020, no. 2 (124), pp. 42–51. (In Russ.) DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-2-42-51.
32. Bikmetova A.R., Asalkhuzina G.F. Assessment of individual properties of hydraulic fracturing cracks based on the results of tracer studies in horizontal wells with multi-stage hydraulic fracturing. *Geological and geophysical studies of oil and gas formations. Collection of scientific articles based on materials VII All-Russian Youth Scientific and Practical Conference*. Ufa, May 26, 2022. Ufa, Bashkir State University Publ., 2022. pp. 68–69. (In Russ.)
33. Bikmetova A.R., Asalkhuzina G.F., Davletbaev A.Ya. Estimating parameters in the horizontal wells with multistage fracturing using reservoir modeling and tracer analysis. *Oil industry*, 2022, no. 11, pp. 118–121. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2022-11-118-121.
34. Gashimov R.R., Salyaev V.V., Nuykin A.M., Arzamastsev G.G., Safin A.F., Mukhametshin I.R., Nukhaev M.T., Prusakov A.V. Well completion technology evaluation for oil rim field development using permanent tracers: a case study from North-Komsomolskoye Field. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/187746-MS>
35. Silva M., Brandvoll Ø., Hubred P.A., Viig S. Tracer-based monitoring of P&A in offshore fields European Association of Geoscientists & Engineers Source. *84th EAGE Annual Conference & Exhibition*. 2023. pp. 1–14 DOI: <https://doi.org/10.2118/214446-MS>
36. Shtun S.Y., Senkov A.A., Abramenko O.I., Matsashik V.V., Mukhametshin I.R., Prusakov A.V., Nukhaev M.T. The comparison of inflow profiling technologies for ERD wells including PLT, fiber optics DTS, stationary chemical tracers: a case study from the Caspian offshore Yuri Korchagin Field in Russia. *SPE Annual Caspian Technical Conference and Exhibition*. Baku, Azerbaijan, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/188985-MS>
37. Silva M., Stray H., Bjørnstad T. Stability assessment of PITT tracer candidate compounds: The case of benzyl alcohols. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 167, pp. 517–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peteng.2018.05.023>
38. Sanni M., Al-Abbad Mohammed, Kokal Sunil, Dugstad Øyvind, Hartvig Sven, Huseby Olaf. Pushing the envelope of residual oil measurement: a field case study of a new class of inter-well chemical tracers. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dubai, UAE, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2118/181324-MS>
39. Silva M., Ould Metidji M., Stray H., Bjørnstad T. Alkylpyrazines – from the “Dinner Table” to the oilfield: a new class of partitioning tracers. *European Association of Geoscientists & Engineers Source. IOR 2019 – 20th European Symposium on Improved Oil Recovery*. 2019. vol. 2019, pp. 1–12 DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900063>
40. Tang J.S. Interwell tracer tests to determine residual oil saturation to waterflood at Judy Creek Bhl'a'pool. *J Can Pet Technol.*, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2118/92-08-06>
41. Lichtenberger G.J. Field applications of interwell tracers for reservoir characterization of enhanced oil recovery pilot areas. *SPE Production Operations Symposium*. Oklahoma City, Oklahoma, 1991. DOI: <https://doi.org/10.2118/21652-MS>
42. Perevalov V.P. *Xanthene dyes. Great Russian Encyclopedia*. 2016. (In Russ.) Available at: <https://old.bigenc.ru/chemistry/text/2638778> (accessed: 8 February 2023).
43. Ternovaya S.V., Tarasov M.G., Trunov N.M. Results of indicator studies at the West Varieganskoye oil field. *Scientific notes of the geological and geographical faculty*. Rostov-on-Don, Institute of Earth Sciences Publ., 2004. pp. 156–168.

44. Tarasov M.G., Nikanorov A.M., Trunov N.M. Using a new type of tracer to study technogenic changes in water pressure systems of oil fields. *Fundamental problems of oil and gas hydrogeology: Materials of the All-Russian Federation Conference*. Moscow, GEOS Publ., 2005. pp. 184–188. (In Russ.)
45. Antonov G.P., Abramov M.A., Kubarev P.N. Carrying out tracer studies to control and regulate the process of waterflooding of oil deposits at Tatneft. *Oilfield Engineering*, 2015, no. 5, pp. 56–68. (In Russ.)
46. Sukanya S., Sabu J. *Environmental radon: a tracer for hydrological studies*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2023. 184 p.
47. Yakhin A.R., Gazizova E.R., Khaziev A.M. Study of horizontal wells with multistage fracturing formation using chemical inflow indicators. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2022, no. 1 (135), pp. 22–37. (In Russ.)
48. Kaludzhner Z., Toropov K.V., Murtazin R.R. Comparison of field-geophysical and tracer methods to control the inflow profile in horizontal wells with multistage hydraulic fracturing. *Oil industry*, 2019, no. 9, pp. 38–41. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2019-9-38-41.
49. Gurianov A., Katashov A., Ovchinnikov K. Production logging using quantum dots tracers. *Coiled Tubing Times*, 2017, no. 2 (060), pp. 42–51. (In Russ.)
50. Shidong D., Deji D., Jiajia G., Waleed K., Yingchun N., Xu Q. Bionic slow-release hydraulic fracturing proppant and slow release hydraulic fracturing tracer. *55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Virtual, 2021.
51. Georgakilas V., Giannelis E.P. Photoluminescent carbogenic dots. *Chem. Mater.*, 2008, no. 20 (14), pp. 4539–4541.
52. Ji Bingyu, Sui Xinguang, Wang Qinglin, Li Qun, Anjian Liu, Tongjing Liu. Advance on the tracer test technology among wells. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Melbourne, Australia, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2118/77874-MS>
53. Volpin S.G., Afanaskin I.V., Yudin V.A., Efimova N.P. *Possibility of determining filtration parameters of disjunctive disturbances in oil fields based on hydrodynamic studies of formations and wells*. Moscow, Krasnogorsk Printing Plant LLC Publ., 2018. 262 p. (In Russ.)
54. Raspopov A.V., Prokusheva S.A. Tracer analysis of hydrodynamic connections in the Silurian deposits of the Timan-Pechora oil and gas province. *Neftyanaya Provintsiya*, 2022, no. 4 (32), pp. 65–78. (In Russ.)
55. Izotov A.A., Afonin D.G. The mechanism of indicator propagation in a terrigenous formation during tracer studies. *Exposition Oil Gas*, 2021, no. 5, pp. 31–34. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-5-31-34 (in Russ)
56. Ipatov A.I., Zaletova D.V. The reason for the high velocities of filtration flows when tracing indicators. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2004, no. 10, pp. 57–62. (In Russ.)
57. Krivova N.R. *Technologies for the development of multilayer deposits with discontinuous faults*. Monograph. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2014. 96 p. (In Russ.)
58. Chernokozhev D.A., Khozyainov M.S., Kuznetsov M.I., Kuznetsova K.I. Clarification of the geological structure and degree of heterogeneity of productive strata based on the results of indicator studies. *Bulletin of the International University of Nature, Society and Man "Dubna". Series: Natural and engineering sciences*, 2016, no. 2 (34), pp. 68–75. (In Russ.)
59. Abbaszadeh-Dehghani Maghsood, Brigham W.E. Analysis of well-to-well tracer flow to determine reservoir layering. *J Pet Technol*, 1984, no. 36, pp. 1753–1762. DOI: <https://doi.org/10.2118/10760-PA>
60. Korovin M.O. Features of determining anisotropic parameters from the results of tracer studies of U11 formation on the example of oil field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 85–90. (In Russ.)
61. Potashev K.A., Akhunov R.R., Mazo A.B. Calculation of the flow rate between wells in the flow model of an oil reservoir using streamlines. *Georesources*, 2022, no. 24 (1), pp. 27–35. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.3>

Information about the authors

Vyacheslav V. Verzhbitsky, Cand. Sc., Associate Professor, North-Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. vverzhbitckii@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4559-6904>

Alexander I. Shchekin, Cand. Sc., Associate Professor, North-Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. ashchekin@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4004-2160>

Tatiana A. Gunkina, Cand. Sc., Associate Professor, North-Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. tgunkina@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3001-3921>

Alexander V. Handzel, Cand. Sc., Associate Professor, North-Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. ahandzel@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5686-8931>

Viktoriya V. Verzhbitskaya, Senior Lecturer, North-Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation. vvchernova@ncfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8169-6921>

Received: 16.05.2024

Revised: 12.07.2024

Accepted: 31.01.2025

УДК 676.084
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675
Шифр специальности ВАК: 2.6.10

Оптимизация режимов синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины

Д.Ю. Островная✉, А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, А.А. Луценко

НАО Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Казахстан, г. Петропавловск

✉ darya_ostrovnaya@mail.ru

Аннотация. Актуальность. При обработке древесины образуется до 40 % отходов, которые включают в себя стружку, опилки, древесную пыль, части коры и некондиционную древесину различной формы и размеров. Вторичные отходы древесины содержат в своем составе лигнин, являющийся источником для получения солей лигносульфоновых кислот – лигносульфонатов. Возможность применения этих соединений в качестве диспергаторов пигментов обусловлена амфифильным строением их молекул. Целенаправленный синтез лигносульфонатов из вторичных отходов древесины с одной стороны решает задачи обеспечения безотходных производств, а с другой – получения товарного продукта, обладающего диспергирующими свойствами. **Цель.** Оптимизация способа получения водорастворимого диспергатора из отходов древесины. **Методы.** Вероятностно-детерминированный метод планирования эксперимента, метод спектрофотометрии, метод компьютерной-микроскопии. **Результаты и выводы.** Показана возможность целенаправленного синтеза лигносульфоната ЛС_с из отходов распиловки березы. С применением методов вероятностно-детерминированного планирования проведена оптимизация режимов синтеза и получена обобщенная модель, позволяющая оценить выход лигносульфоната. Исследовано влияние трех модификаторов на диспергирование диоксида титана в водно-акриловой эмали. Показано, что введение ЛС_с, ЛС_т и Dispers 715w на уровне 1,0–0,5 г/дм³ приводит к более тонкому диспергированию пигмента. Лучшие показатели диспергирования отмечаются при содержании ЛС_с 0,5 г/дм³, при этом среднестатистический диаметр уменьшается в 3,1 раза (с 8,4 до 2,6 мкм). При содержании синтезированного ЛС_с на уровне 1,0 г/дм³ в составе водно-акриловом лакокрасочном покрытии степень защиты стали в сернокислых растворах составила не менее 62 %.

Ключевые слова: вторичные отходы древесины, сульфопроизводные лигнина, лигносульфонат, планирование эксперимента, акриловая дисперсия, синтез, коррозия

Для цитирования: Оптимизация режимов синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины / Д.Ю. Островная, А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, А.А. Луценко // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675

UDC 676.084
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675

Optimization of the synthesis modes of water-soluble sulfonic derivatives of lignin from wood waste

D.Yu. Ostrovnaya✉, A.N. Dyuryagina, K.A. Ostrovnoy, A.A. Lutsenko

North Kazakhstan University named after M. Kozhaybayev, Petropavlovsk, Kazakhstan

✉ darya_ostrovnaya@mail.ru

Abstract. Relevance. When processing wood, up to 40% of waste is generated, which includes shavings, sawdust, wood dust, bark parts and substandard wood of various shapes and sizes. Secondary wood waste contains lignin, which is a source for the production of salts of lignosulfonic acids – lignosulfonates. The possibility of using these compounds as pigment dispersants is due to the amphiphilic structure of their molecules. The targeted synthesis of lignosulfonates from secondary wood waste, on the one hand, solves the problems of ensuring waste-free production, and on the other hand, obtaining a marketa-

ble product with dispersing properties. **Aim.** Optimization of the method for obtaining a water-soluble dispersant from wood waste. **Methods.** Probabilistic deterministic method of experiment planning, spectrophotometry method, computer microscopy method. **Results and conclusions.** The paper shows the possibility of targeted synthesis of lignosulfonate LS_s from birch sawing waste. Optimization of synthesis modes was carried out using probabilistic-deterministic planning methods and a generalized model was obtained that allows estimating the yield of lignosulfonate. The authors studied the effect of three modifiers on the dispersion of titanium dioxide in aqueous acrylic enamel. It is shown that the introduction of LS_s, LS_t and Dispers 715w at the level of 1.0–0.5 g/dm³ leads to a finer dispersion of the pigment. The best dispersion indicators are observed at a LS_s content of 0.5 g/dm³, while the average diameter decreases by 3.1 times (from 8.4 to 2.6 microns). With the content of synthesized LS_s at the level of 1.0 g /dm³ in a water-acrylic paint coating, the degree of protection of steel in sulfuric acid solutions was at least 62%.

Keywords: secondary wood waste, lignin sulfates, lignosulfonate, experiment planning, acrylic dispersion, synthesis, corrosion

For citation: Ostrovnaya D.Yu., Dyuryagina A.N., Ostrovnay K.A., Lutsenko A.A. Optimization of the synthesis modes of water-soluble sulfonic derivatives of lignin from wood waste *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 66–74. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4675

Введение

Древесина является одним из важнейших возобновляемых ресурсов и служит универсальным строительным материалом. Ежегодно в Северном Казахстане перерабатывается от 80 до 100 тысяч кубических метров древесины, 80 % которой составляют лиственные деревья [1]. При переработке древесины образуется до 40 % вторичных отходов [2], представляющих собой опилки, стружку, древесную пыль, куски коры и некондиционную древесину различной формы и размеров. Утилизация отходов переработки древесины является одним из направлений создания ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий получения модифицирующих добавок многофункционального действия. Известно, что в состав древесины входит целлюлоза и смесь полимеров ароматической природы – лигнин [3]. Он считается уникальным источником для получения солей лигносульфоновых кислот (лигносульфонатов). Особенностью лигносульфонатов (ЛС), в сравнении с другими лигнопроизводными, является высокая растворимость в воде, обусловленная наличием сульфогрупп в молекуле. Кроме того, амфифильная архитектура его молекул предполагает поверхностную активность [4]. Эти две отличительные черты лигносульфонатов позволили широко использовать их в строительстве и на гидрометаллургических предприятиях России и Казахстана [5–8]. Вместе с тем в литературе практически отсутствуют научные данные об их применении в составе водорастворимых лакокрасочных материалов (ЛКМ). Несмотря на безусловные экологические преимущества водных полимерных дисперсий – отсутствие органических растворителей и токсичных веществ, они, как известно [9, 10], значительно уступают органорастворимым лакокрасочным материалам по антикоррозионному эффекту покрытий. Физико-химической предпосылкой для разработки эффективных водных дисперсий пленкообразующих с применением

лигносульфонатов является возможность достижения диспергирующего эффекта поверхностно-активных веществ (ПАВ) по отношению к пигментам (адсорбционно-расклинивающий механизм понижения прочности). Следствием глубокой дезагрегации твердофазных частиц является формирование плотных, малопроницаемых покрытий, надежно изолирующих металл от контакта с агрессивными средами (кислород, вода).

Как свидетельствуют результаты физико-химического анализа лигносульфонатов, они существенно различаются по составу, что не только затрудняет оптимизацию их расходов, но и непосредственно влияет на их функциональные свойства [11, 12]. В ряду существенных отклонений отметим различия в молекулярно-массовом распределении лигносульфонатов (молекулярные массы варьируются от 5000 до 100000), в количественном содержании сульфонатных группировок, а также в катионном составе (натриевые, калиевые, кальциевые, магниевые и аммонийные соли). Вышеуказанные отклонения в составе лигносульфонатов определяют сорт перерабатываемой древесины и технологическими режимами (по номенклатуре реагентов и температуре) [13].

Исходя из вышеизложенного нами сформулирована следующая цель настоящей работы – оптимизация способа получения водорастворимого диспергатора из отходов древесины.

Для достижения данной цели были поставлены задачи:

1. Оптимизировать режимные параметры синтеза лигносульфоната на основе использования методов математического моделирования.
2. Оценить влияние концентрации синтезированного лигносульфоната на показатели диспергирования пигмента в водной дисперсии полимеров.
3. Установить влияние модификатора на антикоррозионные свойства формируемых покрытий лакокрасочных материалов.

Объекты и методика исследования

Для синтеза лигносульфоната использовали вторичные отходы переработки лиственной древесины, представляющие собой смесь опилко-стружечного материала и щепы. Опилки измельчали на дисковой циркулярной пиле и фракционировали на ситах разного диаметра (5–55 мм), что позволило отделить опилки от стружек и разделить их по крупности. В работе использовали фракцию опилок до 5 мм.

Лигносульфонат получали путем сульфитной варки древесных опилок в смеси, содержащей сульфит натрия (ГОСТ 5644-75) и оксид кальция (ГОСТ 9179-2018), в лабораторном автоклаве емкостью 0,4 дм³ (коэффициент заполнения по воде – 0,7) [14]. Для оптимизации режимов синтеза использовали вероятностно-детерминированный метод планирования эксперимента [15–18]. За основу построения плана эксперимента выбрана ортогональная матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях. В качестве влияющих факторов на выход лигносульфоната выбрали массу загрузки древесного материала (m_o , г), массу сульфита натрия ($m_{Na_2SO_3}$, г), массу негашёной извести (m_{CaO} , г) и температуру (t , °C). Числовые значения уровней факторов для построения план-матрицы указаны в табл. 1.

Таблица 1. Числовые значения уровней факторов

Table 1. Numerical values of factor levels

Уровень Level	Факторы/Factors (F)			
	Масса, г/Mass of, g			Температура Temperature t , °C
	опилок m_o sawdust, m_s	сульфита натрия $m_{Na_2SO_3}$ sodium sulfite $m_{Na_2SO_3}$	оксида кальция m_{CaO} calcium oxide m_{CaO}	
1	15	50	15	120
2	30	70	25	140
3	45	90	35	160

Древесный материал и негашеную известь взвешивали на электронных весах с точностью до 0,01 г, помещали в автоклав. Затем в смесь добавляли 250 мл предварительно приготовленного раствора сульфита натрия заданной концентрации. Автоклав плотно закрывали и помещали в заранее разогретую до нужной температуры печь. Продолжительность варки составляла 160 мин. Активный эксперимент проводили согласно матрице (табл. 2).

По завершении каждого опыта автоклав охлаждали. Пульпу разделяли фильтрацией на беззольном фильтре, осадок промывали водой. Фильтрат и промывные воды объединяли и доводили до постоянного объема 200 мл. Количественное содержание сульфо-производных оценивали спектрофотометрически.

Таблица 2. Ортогональная матрица четырехфакторного эксперимента на трех уровнях

Table 2. Orthogonal matrix of a four-factor experiment on three levels

№ эксперимента Experiment number	Масса, г/Mass of, g			Температура Temperature t , °C
	опилок m sawdust m_s	сульфита натрия $m_{Na_2SO_3}$ sodium sulfite $m_{Na_2SO_3}$	оксида кальция m_{CaO} calcium oxide m_{CaO}	
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

В качестве функции отклика использовали определённый интеграл спектра ($\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$), который выражает площадь под спектральной линией $D=f(\lambda)$ и показывает общее количество извлечённых веществ в растворе: чем выше значение данного показателя, тем больше содержание сульфо-производных в растворе (рис. 1).

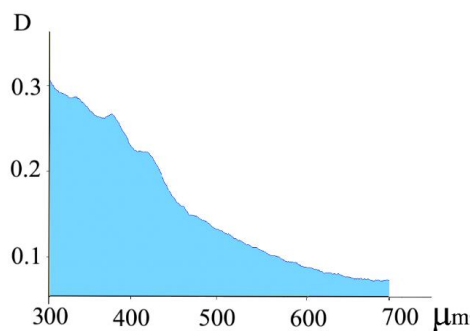


Рис. 1. Определённый интеграл спектра ($\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$)

Fig. 1. Definite integral of the spectrum $\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$

Для нахождения определённого интеграла спектра в образцах растворов ЛС измеряли оптическую плотность в интервале длин волн 300–700 нм с шагом 0,5 на спектрофотометре СФ-2000. После получения спектров $D=f(\lambda)$ проводили расчет определённого интеграла спектра с использованием программы «Сканирование для спектрофотометра СФ 2000» версия 4.06.

Развитие процессов диспергирования пигмента (диоксид титана марки Р-02, ГОСТ 9804-84) исследовали в водных композициях на основе акрилового пленкообразующего (ТУ 2313-004-86926824-2014) компьютерно-микроскопическим методом [19]. Сущность метода заключается в получении растро-

вых изображений проб суспензии лакокрасочного материала с применением микроскопа и последующая обработка их в программе «Обработка изображений» версия 4.5.2. В методе задавали постоянным разрешение изображений (640×480) и увеличение микроскопической установки (×350), состоящей из микроскопа (Levenhuk MED D40T), веб-камеры (Industrial Digital Camera 16MP 1/2.33 COLOR USB 3.0 PANASONIC CMOS SENSOR) и персонального компьютера. После обработки изображений в программе получали процентное содержание фракций (Р, %) в суспензии, общее количество частиц на изображении (N, ед.) и их общую площадь (S_p, пиксель), которые использовали для расчета среднестатистического диаметра частиц (d_{ср}, мкм) по формуле (1) [20]:

$$d = 331.996 \cdot X^{-0.09585} \cdot \sqrt{\frac{S_p}{N}}, \quad (1)$$

где X – увеличение компьютерно-микрооптической установки; S_p – площадь частицы, выраженная в пикселях; N – количество частиц на изображении, шт.

В качестве критерия диспергирующего эффекта определили среднестатистический диаметр (d_{ср}) и содержание фракций (Р).

Для сравнительной оценки диспергирующего эффекта синтезированного лигносульфоната (ЛС_с) использовали промышленно изготовленный лигносульфонат технический «Краснокамский» (ЛС_т) (ТУ 2455-002-00281039-00) и диспергатор «Dispers 715w» (полиакрилат натрия) торговой марки «ТЕГО».

В композициях с постоянным содержанием диоксида титана (С_{ТiO2}=1 %) и плёнообразующего (С_{акр}=10 %) варьировали концентрацию модификаторов (С_м, г/дм³: 0–4).

Антикоррозионные свойства покрытий определяли в зависимости от количественных содержаний (0–4 г/дм³) ЛС_с. Определение скорости коррозии осуществляли по изменению массы образцов окрашенных стальных пластинок после удаления продуктов коррозии. Взвешивание проводили во времени после выдержки образцов в 10 % растворе серной кислоты. Скорость коррозии рассчитывают по формуле (2)

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t}, \quad (2)$$

где m₁ – масса образца после удаления продуктов коррозии, г; m₀ – исходная масса образца, г; S – поверхность образца, м²; t – продолжительность, ч;

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты активного эксперимента по синтезу лигносульфоната, проведенного на основании использованной план-матрицы четырехфакторного эксперимента на трех уровнях, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты активного эксперимента

Table 3. Active experiment results

№ опыта Experiment number	Масса, г / Mass of, g			Температура Temperature t, °C	Определенный интеграл спектра $\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$ Definite integral of the spectrum $\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda$
	опилок m ₀ sawdust m _s	сульфита натрия m _{Na2SO3} sodium sulfite m _{Na2SO3}	оксида кальция m _{CaO} calcium oxide m _{CaO}		
1	15	50	15	120	614,319
2	15	70	25	140	505,439
3	15	90	35	160	377,445
4	30	50	25	160	566,068
5	30	70	35	120	379,056
6	30	90	15	140	344,660
7	45	50	35	140	543,182
8	45	70	15	160	525,028
9	45	90	25	120	519,880

Из экспериментального массива данных была проведена выборка функции отклика по каждому уровню фактора. Частные зависимости показателя содержания сульфопроизводных от массы опилок, сульфита натрия, негашёной извести и температуры представлены на рис. 2. Частные зависимости имеют нелинейный характер и отличаются наличием экстремумов. Оптимальным значениям влияющих факторов отвечает максимальная величина определённого интеграла спектра на нелинейной зависимости. Расчет оптимального значения фактора рассчитывается по формуле (3).

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = f(m). \quad (3)$$

Из представленных частных зависимостей (рис. 2) следует, что оптимальным режимом синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов распиловки березы ($\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda > 500$) является m₀=45 г, m_{Na2SO3}=50 г, m_{CaO}=25 г, t=120 °C. В случае масштабного производства при объеме реактора 1 м³ (с учетом объема используемого в работе реактора 0,4 дм³ и расходов воды 0,25 дм³) оптимальные режима синтеза соответствуют m₀=112,5 кг, m_{Na2SO3}=125 кг, m_{CaO}=62,5 кг, t=120 °C. Нелинейные частные зависимости адекватно аппроксимируются квадратичной функцией, которую отражает уравнение (4).

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = \pm aF^2 \pm bF \pm c. \quad (4)$$

Нахождение коэффициентов a, b, c уравнений осуществляли по методу наименьших квадратов. Для функции отклика однопараметрические уравнения принимают вид:

$$\int_{300}^{700} f(\lambda) d\lambda = 0.374m_0^2 - 21.467m_0 + 736.78, \quad (5)$$

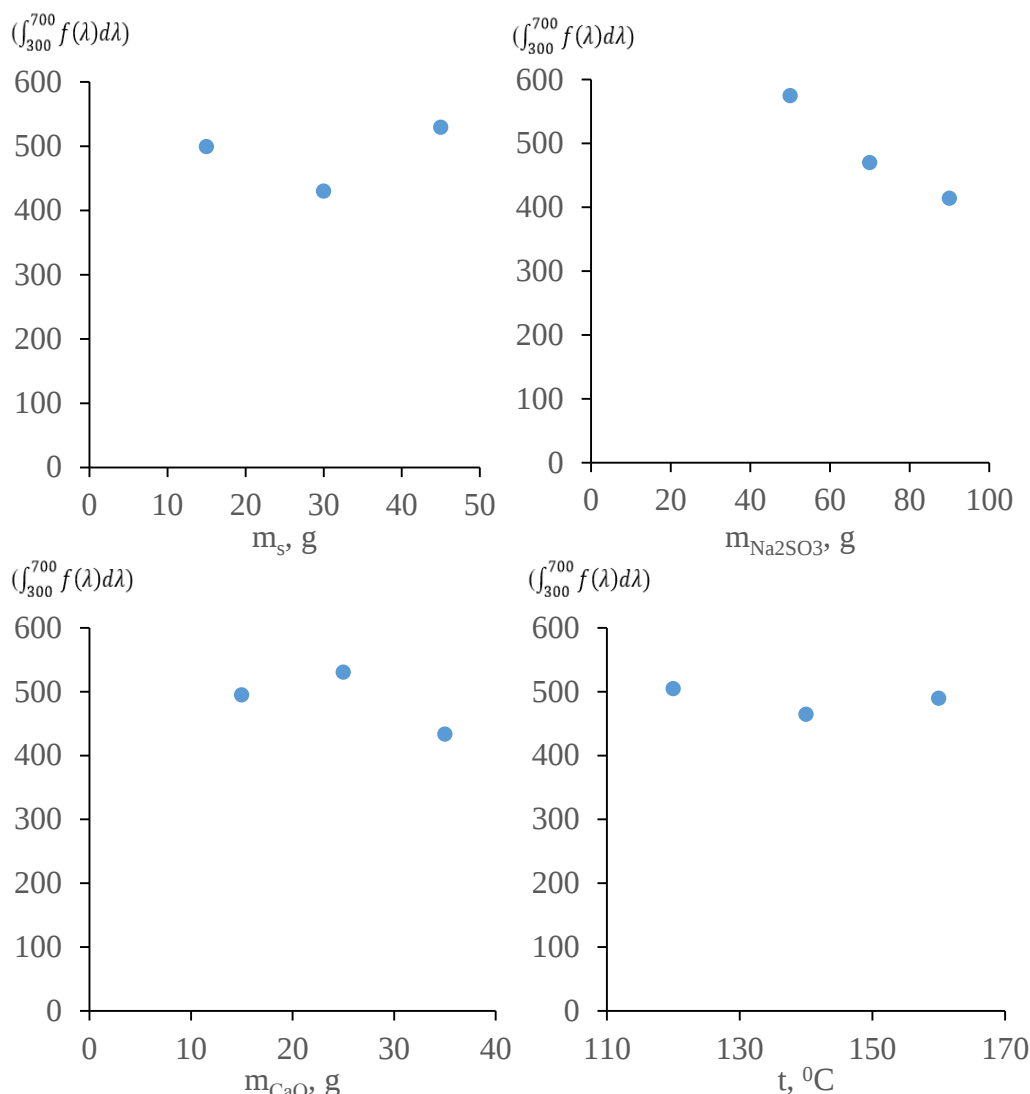


Рис. 2. Частные зависимости показателя содержания сульфопроизводных от параметров оптимизации
Fig. 2. Partial dependences of the content of sulfoderivatives on optimization parameters

$$\int_{300}^{700} f(\lambda)d\lambda = 0.061m_{Na_2SO_3}^2 - 12.56m_{Na_2SO_3} + 1049.9, \quad (6)$$

$$\int_{300}^{700} f(\lambda)d\lambda = -0.6651m_{CaO}^2 + 30.185m_{CaO} + 191.55, \quad (7)$$

$$\int_{300}^{700} f(\lambda)d\lambda = 0.0813t^2 - 23.15t + 211. \quad (8)$$

Рассчитанные величины достоверности аппроксимации для уравнений (5)–(8) составили значения свыше 0,95.

Для построения обобщенной модели использовали многофакторное математическое выражение М.М. Протодяконова [21]:

$$y = \frac{f(x_1)f(x_2)f(x_3)...f(x_m)}{g^{m-1}}, \quad (9)$$

где g – генеральное среднее, рассчитанное по уравнению (10); m – количество факторов; $f(x_1)f(x_2)f(x_3)...f(x_m)$ – произведение уравнений аппроксимации.

$$g = \frac{\sum \int_{300}^{700} f(\lambda)d\lambda}{n}. \quad (10)$$

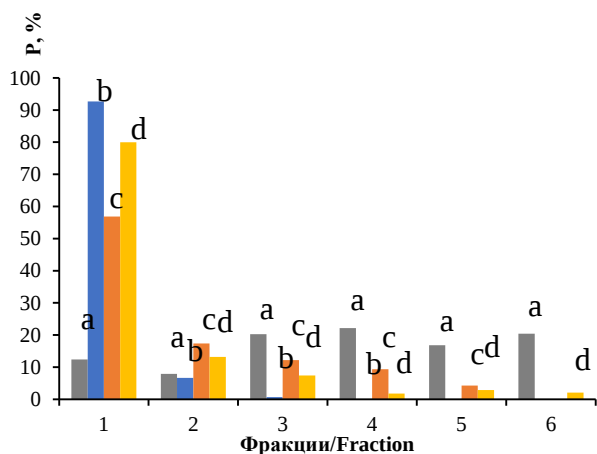
Многофакторная модель процесса синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов распила березы с учетом уравнений (5)–(10) в общем виде отражает уравнение (11).

$$\int_{300}^{700} f(\lambda)d\lambda = \frac{f(m_o)f(m_{Na_2SO_3})f(m_{CaO})f(t)}{486.12^3}. \quad (11)$$

В оптимизированных режимах ($m_o=45$ г, $m_{Na_2SO_3}=50$ г, $m_{CaO}=25$ г, $t=120$ °С) проведены балансовые опыты и наработаны опытные партии продукта.

По результатам компьютерно-микрооптического анализа суспензий диоксида титана в растворе

пленкообразующего было установлено, что в отсутствие модификатора содержание мелких фракций (≤ 10 мкм) не превышает 12,41 % (рис. 3, а), а среднестатистический размер частиц составляет 8,4 мкм (рис. 4).



$C_{пл}=10\%$
Фракции, мкм/Fraction, μm : 1) ≤ 10 ; 2) $+10-20$;
3) $+20-44$; 4) $+44-63$; 5) $+63-99$; 6) $+99-140$;

а) $C_m=0$ г/дм³ (g/dm³); б) $C_{ЛСс}=0,5$ г/дм³ (g/dm³);

в) $C_{Дисперс\ 715w}=0,5$ г/дм³ (g/dm³); г) $C_{ЛСТ}=0,5$ г/дм³ (g/dm³)

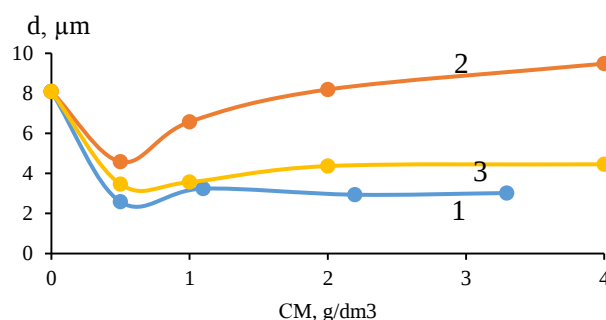
Рис. 3. Влияние содержания модификаторов на фракционный состав акриловой композиции

Fig. 3. Effect of the content of modifiers on the fractional composition of the acrylic composition

При введении модификаторов в акриловые дисперсии отмечали существенные изменения дисперсного состава пигмента (рис. 4). Максимуму диспергирующей эффективности отвечает минимум значений среднестатистического диаметра d_{cp} и максимум содержания мелких фракций P .

Максимальный диспергирующий эффект по отношению к диоксиду титана, судя по характеру изменения среднестатистического диаметра и содержания мелких фракций, фиксировали при содержании в суспензии синтезированного лигносульфоната на

уровне 0,5 г/дм³. Так, при изменении концентрации ЛСс от 0 до 0,5 г/дм³ среднестатистический диаметр частиц уменьшился в 3,1 раза и составил 2,6 мкм (рис. 4). Сравнительный анализ показал, что полученный диспергирующий эффект лучше, чем с промышленно изготавливаемым ЛСТ ($C_{ЛСТ}=0,5$ г/дм³, $d_{cp}=3,5$ мкм) и значительно превышает Dispers 715w ($C_{Дисперс\ 715w}=0,5$ г/дм³, $d_{cp}=4,58$ мкм).



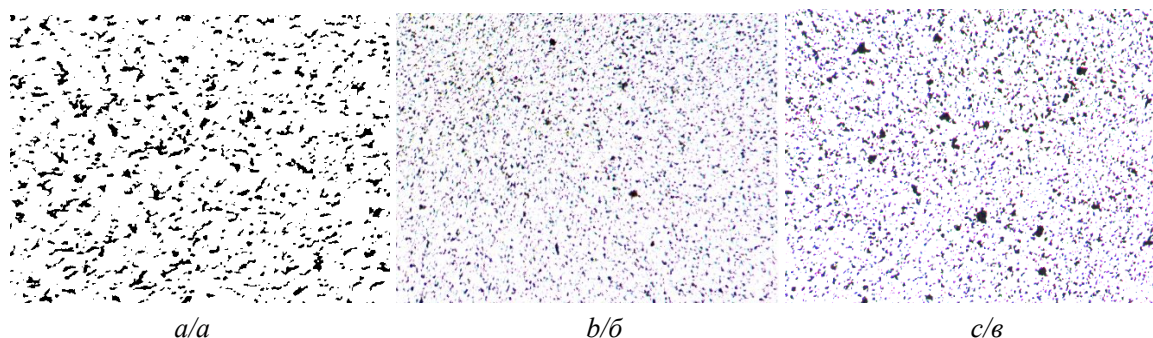
$C_{пл}=10\%$

1 – ЛСс; 2 – Dispers 715w, 3 – ЛСТ

Рис. 4. Влияние концентрации модификаторов на среднестатистический диаметр частиц диоксида титана в акриловой композиции

Fig. 4. Effect of the concentration of modifiers on the average diameter of titanium dioxide particles in an acrylic composition

Диспергирование пигмента, связанное с процессами адсорбции, раскалывающим действием лигносульфоната (Эффект Ребиндера), эффектом электростатического отталкивания (за счет наличия монослоя ориентированных молекул ЛС на поверхности пигмента) приводит к появлению более мелких твердофазных частиц, стабилизированных в дисперсной фазе, и к формированию более плотной упаковки диоксида титана в пленке ЛКМ, что наглядно иллюстрируют представленные микроизображения (рис. 5) [22, 23].



а/а

б/б

в/в

Рис. 5. Микроизображения распределения диоксида титана в ЛКМ: $C_{ЛСс}$, г/дм³: а) 0; б) 0,5; в) 1,0

Fig. 5. Microimages of titanium dioxide distribution in paint materials: $C_{ЛСс}$, g/dm³: а) 0; б) 0,5; в) 1,0

Формирование плотных, малопористых покрытий препятствует проникновению агрессивной среды к металлической подложке, что подтверждается полученными результатами исследования кислотной коррозии, представленными в табл. 4.

Таблица 4. Показатели защиты стали от кислотной коррозии в присутствии ЛСс

Table 4. Indicators of steel protection against acid corrosion in the presence of LSs

Содержание модификатора ЛСс, г/дм ³ Content of the LSs modifier, g/dm ³	Скорость коррозии, г/м ² ·ч Corrosion rate, g/m ² ·h
0	0,524
1	0,199
2	2,490
4	2,646

Анализ полученных результатов, согласно табл. 4, показал, что при низком содержании ЛСс ($C_{\text{ЛСс}}=1,0$ г/дм³) в составе акриловой эмали скорость коррозии уменьшается в 2,5 раза (от 0,524 до 0,199 г/м²·ч), а степень защиты стали в сернокислых растворах при этом составляет 62 %. При дальнейшем увеличении содержания лигносульфоната натрия (более 1 г/дм³) наблюдается рост скорости кислотной коррозии и снижение защитных свойств покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Апокина Л.Ю., Лежнева М.Ю. Изучение рациональной технологии получения биологически активных веществ из отходов деревообрабатывающей промышленности (коры березы) // Материалы МНПК Актуальные проблемы естественных наук. – Петропавловск: СКУ им. М.Козыбаева, 2021. – С. 52–55.
- Степанов В.И., Мезина Н.А. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве // Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова. – 2012. – № 3. – С. 83–88.
- Никитин В.М., Оболевская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 367 с.
- Афанасьев Н.И., Тельтевская С.Е., Пазухина Г.А. Поверхностная активность лигносульфонатов, выделенных на последовательных стадиях делигнификации // Лесной журнал. – 1996. – № 1–2. – С. 136–141.
- Чельшева Т.В. Применение лигносульфонатов для укрепления и обеспыливания лесовозных автомобильных дорог // Лесной журнал. – 2001. – № 5–6. – С. 64–70.
- Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения / Г.А. Тептерева, С.И. Пахомов, И.А. Четвертнева, Э.Х. Каримов, М.П. Егоров, Э.М. Мовсумзаде, Э.И. Евстигнеев, А.В. Васильев, М.В. Севастьянова, А.И. Волошин, Н.Э. Нифантьев, В.В. Носов, В.А. Докичев, Э.Р. Бабаев, С.З. Роговина, А.А. Берлин, А.В. Фахреева, О.А. Баулин, Г.Ю. Колчина, М.С. Воронов, Д.В. Староверов, И.А. Козловский, Р.А. Козловский, Н.П. Тарасова, А.А. Занин, Е.Г. Кривобородов, О.Х. Каримов, В.Р. Флид, М.Е. Логинова // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64. – Вып. 9. – С. 5–122. DOI:10.6060/ivkkt.20216409.6465
- Lugovitskaya T.N., Danilin L.M., Rogozhnikov D.A., Mamyachenkov S.V. Behavior of surface-active substances in a nitric acid medium and prospects for using them in hydrometallurgy // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2023. – Vol. 97. – P. 2822–2828. DOI: 10.1134/S003602442312021X
- Lugovitskaya T.N., Naboychenko S.S. Lignosulfonates as charge carriers and precursors for the synthesis of nanoparticles // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2020. – Vol. 602. – 125127. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125127
- Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. – СПб.: Химиздат, 2017. – 448 с.
- Куис О.В., Прокопчук Н.Р. Антикоррозионная защита металлов: перспективы получения и применения алкидно-уретановых материалов (обзор) // Труды БГТУ. – 2016. – № 4. – С. 25–34.
- Lugovitskaya T.N., Kolmachikhina E.B. Associative behavior of lignosulphonates in moderately concentrated water, water–salt, and water–alcoholic media // Biomacromolecules. – 2021. – Vol. 22 (8). – P. 3323–3331. DOI: doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00441

Заключение

- Показана возможность целенаправленного синтеза сульфопроизводных лигнина из отходов распиловки березы. С применением методов вероятностно-детерминированного планирования проведена оптимизация режимов синтеза и получена обобщенная модель, позволяющая оценить выход лигносульфоната. Оптимальными режимами синтеза водорастворимых сульфопроизводных лигнина из отходов древесины в автоклаве емкостью 0,4 дм³ (коэффициент заполнения по воде – 0,7) являются $m_0=45$ г, $m_{\text{Na}_2\text{SO}_3}=50$ г, $m_{\text{CaO}}=25$ г, $t=120$ °С.
- Исследовано влияние трех модификаторов на диспергирование диоксида титана в водно-акриловой эмали. Показано, что введение ЛСс, ЛСт и Dispers 715w на уровне 1,0–0,5 г/дм³ приводит к увеличению доли мелких фракций. Лучшие показатели диспергирования отмечаются при содержании ЛСс 0,5 г/дм³, при этом среднестатистический диаметр уменьшается в 3,1 раза (с 8,4 до 2,6 мкм).
- При содержании синтезированного ЛСс на уровне 1,0 г/дм³ в составе водно-акрилового лакокрасочного покрытия степень защиты стали в сернокислых растворах составила не менее 62 %.

12. Fechter C., Brelid H., Fischer S. Possibilities for optimization of industrial alkaline steeping of wood-based cellulose fibers // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25 (24). – 5834. DOI: doi.org/10.3390/molecules25245834
13. Komisarz K., Majka T.M., Pieliowski K. Chemical transformation of lignosulfonates to lignosulfonamides with improved thermal characteristics // *Fibers*. – 2022. – Vol. 10 (2). – 20. DOI: doi.org/10.3390/fib10020020
14. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков / Б.Д. Богомолов, С.А. Сапоницкий, О.М. Соколов и др. – М.: Лесная промышленность, 1989 – 360 с.
15. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алматы: Наука, 1981. – 116 с.
16. Zaverl M., Misra M., Mohanty A. Use of the Taguchi method for optimization of poly (butylene terephthalate) and poly (Trimethylene Terephthalate) blends through injection molding // *Int. Polym. Process*. – 2013. – Vol. 28. – P. 454–462. DOI: doi.org/10.3139/217.2714
17. Optimization of blending parameters and fiber size of kenaf-bast fiber-reinforced the thermoplastic polyurethane composites by Taguchi method / Y.A. El-Shekeil, M.S. Sapuan, M.D. Azaman, M. Jawaid // *Adv. Mater. Sci. Eng*. – 2013. – Vol. 2013. – Article ID 686452. – P. 1–5. DOI: doi.org/10.1155/2013/686452
18. Оптимизация процессов водоподготовки оборотной воды завода по вторичной переработке пластмасс / А.Н. Дюрягина, К.А. Островной, И.В. Голодова, З.Н. Шаймерденова, Д.Ю. Козик, А.К. Дюсикеева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. С. 187–195. DOI: doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3368
19. Exploration of the adsorption reduction of the pigment aggregates strength under the effect of surfactants in water-dispersion paints / A.N. Dyuryagina, A.A. Lutsenko, K.A. Ostrovnoy, V.Yu. Tyukanko, M.D. Akanova, A.V. Demyanenko // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14 (5). – 996. DOI: doi.org/10.3390/polym14050996
20. Исследование зависимости геометрических размеров частиц от увеличения компьютерно-микроскопических комплексов / Т.Е. Есауленко, А.К. Дюсикеева, А.Н. Дюрягина, К.А. Островной // *Молодежь и наука – 2018: V Международная студенческая научно-практическая конференция*. – Петропавловск, СКУ им. М.Козыбаева, 2018. – С. 840–845.
21. Optimization of titanium dioxide wetting in alkyd paint and varnish materials in the presence of surfactants / K.A. Ostrovnoy, A.N. Dyuryagina, A.V. Demyanenko, V.Yu. Tyukanko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 4 (6 (112)). – P. 41–50. DOI: doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237879
22. Полищук С.А., Попов Е.В., Горелик М.В. Влияние состава и степени сульфирования лигносульфоната натрия на его коллоидно-химические свойства // *Журнал прикладной химии*. – 1983. – Т. 38. – Вып. 10. – С. 2285–2289.
23. Merkus H.G. Particulate products // *Tailoring Properties for Optimal Performance*. – 2014. – Vol. 19. – P. 343–370. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00714-4_12.

Информация об авторах

Дарья Юрьевна Островная, магистрант кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; darya_ostrovnoy@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-2843-472X

Антонина Николаевна Дюрягина, кандидат химических наук, профессор кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; adyuryagina@inbox.ru, adyuryagina@ku.edu.kz; https://orcid.org/0000-0002-9109-8159

Кирилл Александрович Островной, старший преподаватель кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; kostrovnoy@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-3309-0965

Аида Александровна Луценко, доктор PhD, доцент кафедры химии и химических технологий, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86; l-a.13@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8047-5916

Поступила в редакцию: 01.05.2024

Поступила после рецензирования: 08.07.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Apokina L.Yu., Lezhneva M.Yu. The study of rational technology for obtaining biologically active substances from waste from the woodworking industry (birch bark). *Materials of the MNPK Actual Problems of Natural Sciences*. Petropavlovsk, SKU M. Kozybaev Publ., 2021. pp. 52–55. (In Russ.)
2. Stepanov V.I., Mezina N.A. Waste from the forest industry and their use in the national economy. *Bulletin of the Plekhanov RUE*, 2012. no. 3, pp. 83–88. (In Russ.)
3. Nikitin V.M., Sobolevskaya A.V., Shchegolev V.P. *Chemistry of wood and cellulose*. Moscow, Forest industry Publ., 1987. 367 p. (In Russ.)
4. Afanasyev N.I., Teltevskaia S.E., Pazukhina G.A. Surface activity of lignosulfonates isolated at successive stages of delignification. *Lesnoy zhurnal*, 1996, no. 1–2, pp. 136–141. (In Russ.)
5. Chelysheva T.V. The use of lignosulfonates for strengthening and dedusting logging roads. *Forest Magazine*, 2001, no. 5–6, pp. 64–70. (In Russ.)

6. Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.Kh., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantiev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., Zanin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.H., Flid V.R., Loginova M.E. Renewable natural raw materials, structure, properties, application prospects. *Bulletin of HEI. Chemistry and chemical technology*, 2021, vol. 64, Iss. 9, pp. 5–122. (In Russ.) DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465
7. Lugovitskaya T.N., Danilin L.M., Rogozhnikov D.A., Mamyachenkov S.V. Behavior of surface-active substances in a nitric acid medium and prospects for using them in hydrometallurgy. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2023, vol. 97, pp. 2822–2828. DOI: 10.1134/S003602442312021X
8. Lugovitskaya T.N., Naboychenko S.S. Lignosulfonates as charge carriers and precursors for the synthesis of nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 602, 125127. DOI: doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125127
9. Yakovlev A.D. *Chemistry and technology of paint coatings*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2017. 448 p. (In Russ.)
10. Kuis O.V., Prokopchuk N.R. Anticorrosive protection of metals: prospects for the production and application of alkyd-urethane materials (review). *Proceedings of BSTU*, 2016, no. 4, pp. 25–34. (In Russ.)
11. Lugovitskaya T.N., Kolmachikhina E.B. Associative behavior of lignosulphonates in moderately concentrated water, water–salt, and water–alcoholic media. *Biomacromolecules*, 2021, vol. 22 (8), pp. 3323–3331. DOI: doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00441
12. Fechter C., Brelid H., Fischer S. Possibilities for optimization of industrial alkaline steeping of wood-based cellulose fibers. *Molecules*, 2020, vol. 25 (24), 5834. DOI: doi.org/10.3390/molecules25245834
13. Komisarz K., Majka T.M., Pielichowski K. Chemical transformation of lignosulfonates to lignosulfonamides with improved thermal characteristics. *Fibers*, 2022, vol. 10 (2), 20. DOI: doi.org/10.3390/fib10020020
14. Bogomolov B.D., Sapotnitsky S.A., Sokolov O.M. *Processing of sulfate and sulfite liquors*. Moscow, Forest industry Publ., 1989. 360 p. (In Russ.)
15. Malyshev V.P. *Probabilistic deterministic experiment planning*. Almaty, Nauka Publ., 1981. 116 p. (In Russ.)
16. Zaverl M., Misra M., Mohanty A. Use of the Taguchi method for optimization of poly (butylene terephthalate) and poly (trimethylene terephthalate) blends through injection molding. *Int. Polym. Process*, 2013, vol. 28, pp. 454–462. DOI: doi.org/10.3139/217.2714
17. El-Shekeil Y.A., Sapuan M.S., Azaman M.D., Jawaid M. Optimization of blending parameters and fiber size of kenaf-bast fiber-reinforced the thermoplastic polyurethane composites by Taguchi method. *Adv. Mater. Sci. Eng*, 2013, vol. 2013, pp. 1–5. DOI: doi.org/10.1155/2013/686452
18. Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A., Golodova I.V., Shaimerdenova Z.N., Kozik D.Yu., Dyusikeeva A.K. Optimization of water treatment processes of recycled water of a plastics recycling plant. *Bulletin of the TPU. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 187–195. (In Russ.) DOI: doi.org/10.18799/24131830/2021/9/3368
19. Dyuryagina A.N., Lutsenko A.A., Ostrovnoy K.A., Tyukanko V.Yu., Akanova M.D., Demyanenko A.V. Exploration of the adsorption reduction of the pigment aggregates strength under the effect of surfactants in water-dispersion paints. *Polymers*, 2022, vol. 14 (5), pp. 996. DOI: doi.org/10.3390/polym14050996
20. Esaulenko T.E., Dyusikeeva A.K., Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A. Investigation of the dependence of geometric particle sizes on the magnification of computer microscopic complexes. *V international student scientific and practical conference. Youth and Science – 2018*. Petropavlovsk, M. Kozybaev SKU Publ., 2018. pp. 840–845.
21. Ostrovnoy K.A., Dyuryagina A.N., Demyanenko A.V., Tyukanko V.Yu. Optimization of titanium dioxide wetting in alkyd paint and varnish materials in the presence of surfactants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, vol. 4 (6 (112)), pp. 41–50. DOI: doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237879
22. Polishchuk S.A., Popov E.V., Gorelik M.V. Influence of the composition and degree of sulfation of sodium lignosulfonate on its colloidal chemical properties. *Journal of Applied Chemistry*, 1983, vol. 38, Iss. 10, pp. 2285–2289. (In Russ.)
23. Merkus H.G. Particulate products. *Tailoring Properties for Optimal Performance*, 2014, vol. 19, pp. 343–370. DOI: doi.org/10.1007/978-3-319-00714-4_12.

Information about the authors

Darya Yu. Ostrovnoy, Master Student, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; darya_ostrovnoy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2843-472X>
Antonina N. Dyuryagina, Cand. Sc., Professor, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; adyuryagina@inbox.ru, adyuryagina@ku.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-9109-8159>

Kirill A. Ostrovnoy, Senior Lecturer, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; kostrovnoy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3309-0965>

Aida A. Lutsenko, PhD, Associate Professor, M. Kozybaev North Kazakhstan University, 86, Pushkin street, Petropavlovsk, 150000, Republic of Kazakhstan; l-a.13@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8047-5916>

Received: 01.05.2024

Revised: 08.07.2024

Accepted: 31.01.2025

УДК 556.161

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

Шифр специальности ВАК: 1.6.16

Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–2020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле)

С.Ю. Самойлова✉, Е.В. Мардасова, А.А. Коломейцев

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, г. Барнаул

✉bastet@iwep.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена нарушением стационарности гидрологических характеристик под влиянием потепления климата и необходимостью учета изменений стока при гидрологических расчетах и прогнозах. **Цель:** оценка стационарности гидрологических характеристик и анализ направленных изменений стока реки Оби у г. Барнаула и связанных с ними основных стокоформирующих факторов – температур воздуха и осадков по данным метеостанции г. Барнаула. **Методы:** комплексный географо-гидрометеорологический анализ, статистический анализ временных рядов, включающий: оценку однородности рядов с использованием критериев Фишера и Стьюдента, тестов Петита, Буишанда и Александерсона; исследование направленных изменений с использованием линейных трендов. **Результаты и выводы.** Выполнен анализ стационарности рядов метеорологических и гидрологических характеристик по гидропосту Барнаул и метеостанции Барнаул за период с 1922 по 2020 гг. с годовым, сезонным и месячным разрешением; определены годы нарушения однородности временных рядов. На основании выделенных условно однородных периодов выполнена количественная оценка изменений среднемесячных и среднесезонных расходов воды. Проанализированы линейные тренды средних и максимальных расходов и уровней воды, температуры воздуха и осадков, выполнена оценка их значимости. Выявлены климатические причины изменений стока р. Оби. Установлено, что нарушение стационарности рядов гидрологических характеристик является следствием изменения климатических факторов формирования стока, в первую очередь, температуры воздуха. Наиболее значимые изменения стока заключаются в его перераспределении внутри года. Отмечено статистически значимое увеличение расходов зимней межени на 20–30 %. В половодье характерен рост расходов в апреле и снижение – в мае–июне, однако эти изменения статистически незначимые. На фоне увеличения среднегодовых расходов воды произошло уменьшение максимальных расходов и уровней воды, а также снижение дисперсии годового и максимального стока, что говорит об увеличении его естественной зарегулированности. Изменения стока в период зимней межени и половодья выходят за рамки естественных колебаний водности, т. к. существенно изменилось соотношение талого и базисного стока. Начало нового квазистационарного периода на р. Оби в верхнем течении приходится на 80-е гг. XX в., в отличие от рек Европейской части России, у которых нарушение стационарности рядов соответствует началу интенсивного роста температуры в 1970-х гг.

Ключевые слова: река Обь, город Барнаул, изменение климата, стационарность, линейный тренд, расходы воды, максимальный сток, максимальные уровни воды

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00157, <https://rscf.ru/project/24-27-00157/>

Для цитирования: Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В., Коломейцев А.А. Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–2020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

UDC 556.161

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

Changes in hydrological characteristics of the Ob River caused by climate change in 1922–2020 (according to the observations in Barnaul)

S.Yu. Samoilova✉, E.V. Mardasova, A.A. Kolomeytsev

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation

✉bastet@iwep.ru

Abstract. Relevance. Violation of hydrological characteristics stationarity caused by climate change and the necessity to take into account the flow change in hydrological studies and prognoses. **Aim.** To assess the hydrological characteristics evaluation and analyze the Ob River flow directional changes near the city of Barnaul and the flow-forming factors related to the changes (air temperature and precipitations according to the Barnaul meteorological station data). **Methods.** Complex geographic-hydrological analysis; statistical analysis of time series including the evaluation of the time series homogeneity with the use of the Fisher and Student criteria, the Pettitt's, Buishand's and Alexandersson's tests; directional changes linear trends estimation. **Results and conclusions.** The authors have examined the meteorological and hydrological characteristics series stationarity according to Barnaul gauging station and Barnaul meteorological station from 1922 to 2020 with the annual, seasonal, and monthly resolution and detected the years with the time series homogeneity violations. Based on the conditionally selected homogenous periods the quantitative assessment of the average monthly and seasonal flow was performed. The linear trends of the average and maximum water flow and level, air temperature and precipitations were examined, their significance was assessed. The climate reasons for the Ob River flow changes were detected. During the study it was established that the hydrological characteristics series stationarity violation is caused by the climate flow-forming factors changes, predominantly by the air temperature changes. The main changes of the flow lie in its redistribution within a year. A statistically significant increase in winter low water discharge was marked, the figures being 20–30%. During the seasonal flood the discharge increases in April and decreases in May and June, however, these changes are not statistically significant. There was a decrease of the maximum water discharge and level as well as the dispersion reduction of the annual and maximum flow amid the increase of the annual average discharge of water, which indicates a natural flow regulation. The flow changes in the winter low water and seasonal flood go beyond natural fluctuations as the meltwater and base-flow ratio significantly changed. The new quasistationary period of the Ob River upper course starts in the 80s of the 20th century unlike the rivers in the European part of Russia, the violation of the time-series stationarity of which is correlated to the intense temperature increase in the 70s of the 20th century.

Key words: the Ob River, the city of Barnaul, climate change, homogeneity, linear trend, water discharge, maximum flow, maximum water levels

Acknowledgements: The research was carried out using the Russian Science Foundation grant no. 24-27-00157, <https://rscf.ru/project/24-27-00157/>

For citation: Samoilova S.Yu., Mardasova E.V., Kolomeytsev A.A. Changes in hydrological characteristics of the Ob River caused by climate change in 1922–2020 (according to the observations in Barnaul). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

Введение

Начиная с середины 70-х гг. XX в. в связи с резким ростом глобальной температуры происходят изменения режима рек на территории России. Они выражаются в повсеместном росте меженных (в первую очередь, зимних) расходов. Вместе с тем отмечаются изменения стока половодья, носящие разнонаправленный характер [1]. Как показали исследования половодья на реках европейской части России, эти изменения могут быть настолько значительными, что существовавшие ранее представления о факторах формирования талого стока и разработанные на их основе прогнозы стали неак-

туальными [2, 3]. При традиционном подходе к прогнозированию стока половодья с использованием статистических методов требуется пересмотр предикторов для построения прогнозных моделей. Например, факторы, определяющие приходную часть водного баланса половодья, теряют свое значение, а определяющими становятся расходные составляющие водного баланса [3]. Уменьшение талой составляющей в стоке рек приводит к снижению предсказуемости годового стока от максимального запаса воды в снежном покрове, что имеет критические последствия для управления водными ресурсами [4].

В связи с этим анализ внутренних характеристик стока и стокоформирующих факторов (таких как тренд, стационарность, периодичность) в условиях климатических изменений является важным этапом при разработке гидрологических моделей для того, чтобы прогнозы половодья были более точными [4–7]. При этом, с одной стороны, мы можем проанализировать применимость стандартных статистических методов анализа стока, с другой – выявить значимое изменение факторов формирования стока [8].

Обзор традиционных методов, используемых для оценки стационарности гидрологических рядов и изменений стока, представлен в [1, 9, 10]. При этом в работах [9, 11] отмечается, что при использовании одних и тех же статистических критериев разными авторами могут быть получены противоречивые выводы о стационарности рядов и направленности изменений стока.

Целью работы является оценка направленных изменений стока реки Оби у г. Барнаула. Основными задачами являются: анализ однородности рядов метеорологических и гидрологических характеристик по гидропосту Барнаул и метеостанции Барнаул; определение момента нарушения однородности рядов с последующим их разделением на однородные периоды; оценка масштаба наблюдаемых изменений за период инструментальных наблюдений и определение их причин.

Авторами представленной работы не ставилась целью оценка пространственных изменений климата и стока. Данная работа направлена на статистическую оценку рядов гидрологических характеристик в заданном створе для последующей разработки прогнозных моделей талого стока.

Объект исследования

Обь – одна из крупнейших рек России, образуется от слияния рек Бии и Катунь. Площадь водосборного бассейна р. Оби в створе г. Барнаула – 169 тыс. км², средний расход воды – 1480 м³/с. Особенностью р. Оби в ее верхнем течении (до Новосибирского водохранилища) является то, что она имеет черты режима главных ее составляющих, берущих начало в горах Алтая. Питание реки смешанное, с преобладанием снегового.

По типу режима Обь относится к рекам с весенне-летним половодьем, во время которого проходит в среднем 65 % годового стока. Часто отмечается две волны половодья, первая обусловлена таянием снега на равнине, вторая – результат таяния горных снегов и ледников.

Исходные данные и методы исследования

Гидрологический пост на р. Оби в г. Барнауле является одним из старейших в регионе – наблюдение

за уровнями воды ведутся с 1893 г., а за расходами – с 1922 г. Данные наблюдений публикуются в изданиях государственного водного кадастра («гидрологические ежегодники») с 1936 г. Данные о ежегодных средних и максимальных расходах воды содержатся в сборниках «Основные гидрологические характеристики». Таким образом, доступный ряд наблюдений за расходами воды охватывает период с 1922 по 2020 гг., за уровнями воды – 1936–2020 гг.

В то же время на участке р. Оби до г. Барнаула и на ее крупнейших притоках, формирующих основной объем стока, отсутствуют водохранилища, т. е. изменения стока носят условно естественный характер и связаны с изменением климатических факторов.

Метеостанция в г. Барнауле также является одной из старейших в России, наблюдения на ней ведутся с 1836 г. Данные наблюдений за температурой воздуха содержатся на сайте ВНИИГМИ [12] и охватывают весь период инструментальных наблюдений. Ряд наблюдений за атмосферными осадками опубликован не в полном объеме по причине нарушения однородности ряда, связанного с изменением методики наблюдения за осадками: сменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова в начале 1950-х гг. и введением поправки на смачивание непосредственно на станции с 1966 г. [13, 14]. На сайте ВНИИГМИ представлено два архива данных об осадках с месячным разрешением. В первом представлены данные с 1966 г. по настоящее время, т. е. период, когда никаких изменений в методике наблюдений не происходило [15]. Второй – скорректированный архив, включающий данные о твердых и жидких осадках с введением всех видов поправок [16]. Доступные данные наблюдений за осадками охватывают период с 1936 г., так как в 1930-е гг. производился массовый перенос станций на открытое место [14]. Конкретно по г. Барнаулу – данные представлены с 1959 по 2015 гг.

На данном этапе мы решили ограничиться данными одной метеостанции для общей характеристики климатических изменений, чтобы обосновать возможные причины нарушения однородности гидрологических рядов. Безусловно, метеостанция, расположенная на равнинной территории, не может быть репрезентативной для всего бассейна, особенно в отношении осадков. Выбор метеостанции Барнаул обусловлен длительностью наблюдений на ней. Представляется весьма интересным выполнить совместный анализ гидрологических и метеорологических данных (по крайней мере, расходов воды и температуры воздуха) за весь доступный период наблюдений, с 1922 г. Такой длинный ряд метеонаблюдений имеется только по станции Барнаул. В отношении потепления климата и связанных с

ним процессов перераспределения стока данные метеостанции Барнаул, на наш взгляд, вполне показательны, поскольку колебания температуры в пределах региона в целом синхронны. Пространственно-временная оценка климатических изменений на территории Верхнеобского бассейна является предметом отдельного исследования, выходящего за рамки представленной работы.

Целью проверки рядов на однородность является установление принадлежности членов ряда к одной и той же генеральной совокупности. Специалистами Государственного гидрологического института для статистического анализа однородности гидрологических рядов рекомендованы критерии Фишера и Стьюдента [1]. Они являются общепринятыми [10] и широко используются в гидрологических исследованиях, например в [11, 17].

Согласно [10], расчетное значение статистики критерия Стьюдента определяется по формуле (1):

$$t = \frac{y_{срI} - y_{срII}}{\sqrt{\frac{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}{n_1 + n_2}}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (1)$$

где $y_{срI}$, $y_{срII}$, σ_1^2 , σ_2^2 – средние значения и дисперсии двух последовательных выборок; n_1 и n_2 – объемы выборок.

При анализе стационарности многолетних колебаний гидрологических характеристик исходный ряд, приведенный к многолетнему периоду, разбивается на две равные части, по которым производится оценка однородности выборочных средних.

Расчетные значения статистики Фишера определяются по формуле (2):

$$F = \frac{\sigma_j^2}{\sigma_{j+1}^2}, \quad (2)$$

где σ_j^2 – дисперсии двух следующих друг за другом частей выборок (j и $j+1$) объемом n_1 и n_2 .

Разбиение ряда может осуществляться как в предыдущем случае – на два равных периода, так и по предполагаемому году нарушения стационарности ряда, что предпочтительнее. В большинстве работ по оценке климатообусловленных изменений стока, например в [1, 11], границей разбиения гидрологического ряда является 1976 г. Критические значения критериев Фишера и Стьюдента, учитывающие внутрирядную скоррелированность и асимметричность распределений гидрологических рядов, представлены в табл. Б 13 и Б 15 [10].

В ряде работ, например в [18], отмечается, что классические тесты Фишера и Стьюдента корректно применять только при принадлежности анализируемых выборок нормальному закону распределения, что для гидрологических рядов не всегда выполняется. Кроме того, определить момент нарушения однородности ряда часто не представляется возможным.

В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой, при проверке однородности временных гидрометеорологических рядов целесообразно использовать комбинированный статистический подход с применением нескольких тестов [18–20]. В работе [19] для оценки однородности рядов рекомендовано использовать четыре теста: Петита, Буишанда, Александерсона (Стандартный нормальный тест для проверки однородности рядов, SNHT) и Фон Неймана. Тест Петита непараметрический, остальные параметрические. Все тесты при нулевой гипотезе предполагают, что значения переменной независимы и одинаково распределены. Если только один из тестов отвергает нулевую гипотезу, ряд считается однородным. Если два теста – ряд считается «сомнительным». Если по результатам большинства тестов нулевая гипотеза отвергается, это свидетельствует о нарушении однородности ряда [19].

Преимуществом этого подхода является и то, что тесты Петита, Буишанда и Александерсона, согласно альтернативной гипотезе, предполагают наличие ступенчатого смещения среднего значения (перелома), т. е. способны определять год, в котором произошло нарушение однородности. В длинном временном ряду таких лет может быть несколько, при этом тест определяет только один «переломный» год, в котором значение критерия будет максимальным, остальные годы игнорируются. Поэтому определение «переломного» года может быть неоднозначным при использовании разных тестов и на разных временных интервалах.

Стандартный нормальный тест для проверки однородности рядов Александерсона (SNHT) [19] рассчитывается следующим образом (3), (4).

Ряд величин $Y_1, \dots, Y_n$ разбивается на две части, содержащие k и $n-k$ членов.

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (n-k)\bar{z}_2^2, k = 1 \dots n, \quad (3)$$

где

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) / \sigma, \bar{z}_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n (Y_i - \bar{Y}) / \sigma, \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение.

Если нарушение однородности произошло в году K , то $T(k)$ достигает максимума вблизи года $k=K$ образом (3), (4).

Тест Буишанда [19]. В этом тесте скорректированные частичные суммы определяются как:

$$S_n^* = 0; S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}), \quad (5)$$

где $k = 1 \dots n$. Когда ряд однороден, значения S_k^* будут колебаться около нуля, поскольку систематических отклонений Y_i относительно их среднего значения $\bar{Y}$ нет. Если в году K имеется разрыв, то S_k^* достигает максимума (отрицательный сдвиг) или минимума (положительный сдвиг).

Непараметрический тест Петита [19]. Статистика X_k (6), для расчета которой используются ранги $r_1, \dots, r_n$ (номера в ранжированном ряду) гидрологических величин $Y_1, \dots, Y_n$:

$$X_k = 2 \sum r_i - k(n+1); X_K = \max_{0 \leq k \leq n} X_k, \quad (6)$$

где K – год нарушения однородности ряда.

Полученные значения X_K сравниваются с критическими, приведенными в работе [19].

Подобный подход использован при оценке стационарности климатических характеристик и речного стока в разных регионах мира [19, 21–24], в частности, в Беларуси [18]. В работах [11, 25] для определения года нарушения стационарности ряда использовался тест Петита совместно с разностными и интегральными кривыми.

В представленной нами работе для оценки стационарности рядов гидрологических и метеорологических характеристик использовался комбинированный подход. На первом этапе выполнена оценка с использованием критериев Фишера и Стьюдента. На втором этапе применены тесты Петита, Александерсона и Буишанда с целью определения года нарушения однородности, что дает возможность отследить момент начала реакции речной системы на климатические изменения. Оценка однородности выполнена на 5 % уровне значимости. Ряд признавался неоднородным в случае, если наличие неоднородности подтверждалось тремя и более тестами. Если неоднородность подтверждалась двумя тестами, ряд признавался «сомнительным», в соответствии с [19].

Для оценки направленности изменений проанализированы линейные тренды среднего значения по методу наименьших квадратов. Оценка значимости трендов производилась по значимости коэффициента корреляции [10]: коэффициент корреляции r оценивается по отношению к его случайной среднеквадратической ошибке σ_r (7).

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (7)$$

В случае, если $\frac{r}{\sigma_r} \geq \beta$, тренд значим при уровне значимости 5 % $\beta \approx 2$.

По сути, значимый тренд указывает на нарушение стационарности временного ряда, т. к. в этом случае закономерно изменяется во времени среднее значение гидрологической характеристики. В этом отношении данный подход близок к проверке однородности ряда по критерию Стьюдента [10].

В соответствии с (1)–(7) в среде Excel выполнен статистический анализ гидрологических характеристик: среднегодовых, среднемесячных и максимальных расходов воды, максимальных уровней воды; метеорологических характеристик: среднегодовых и среднемесячных температур, годовой и месячной суммы осадков. Длина рядов соответ-

ствует периоду инструментальных наблюдений за расходами воды – с 1922 по 2020 гг., и составляет в общей сложности порядка 100 лет.

Результаты и обсуждения

Среднемесячные и среднегодовые расходы воды. Анализ рядов среднемесячных и среднегодовых расходов показал неоднородность среднего значения (критерий Стьюдента) и однородность дисперсий (критерий Фишера) для расходов конца летне-осенней (октябрь) и всей зимней межени (с ноября по март). Для расходов марта, мая–июля, сентября и декабря, а также среднегодовых расходов характерна неоднородность дисперсий (критерий Фишера) (табл. 1).

Тесты Петита, Александерсона и Буишанда подтвердили неоднородность рядов расходов зимней межени (с ноября по март), причем в большинстве случаев момент нарушения однородности определяется 1982–1983 гг. (табл. 1).

Если для января и февраля годы нарушения определяются более-менее однозначно всеми тестами – 1982–1984, для ноября, декабря и марта они изменяются довольно существенно – от 1975 до 2012 гг.

Анализ средних расходов зимней межени однозначно свидетельствует о нарушении однородности ряда в 1982 г. (рис. 1). На рис. 1 представлен анализ ряда с использованием теста Буишанда (тесты Петита и Александерсона показали аналогичные результаты). Ряды расходов половодья и летне-осенней межени, а также среднегодовые расходы по результатам этих тестов являются однородными (табл. 1, рис. 1).

Линейные тренды и оценка их значимости рассчитаны для среднегодовых и среднемесячных расходов воды (табл. 2). На рис. 2 представлены графики изменения средних расходов воды и линейные тренды за год и гидрологические сезоны. Рассчитанные тренды (табл. 2) по уравнениям соответствуют коэффициентам корреляции от 0,04 (июнь) до 0,50 (март), средняя квадратическая ошибка которых составила от 0,08 до 0,1. Коэффициент корреляции r превышает удвоенную среднеквадратическую ошибку в уравнениях тренда для расходов с октября по март. Тренды являются статистически значимыми в колебаниях расходов зимней межени.

Таким образом, можно определенно утверждать о статистически значимом увеличении стока зимней межени. Направленность и количественная характеристика изменений расходов воды с ноября по март была оценена как разница между средними значениями расходов в условно однородные периоды, выделенные при помощи тестов Петита, Буишанда и Александерсона (табл. 1). Максимальный рост расходов воды, до 40,5 %, отмечен для рядов, момент нарушения однородности у которых определяется неоднозначно (ноябрь, декабрь и март). Средний рост расходов зимней межени составил 24 %.

Таблица 1. Результаты анализа на однородность среднемесячных и среднегодовых расходов воды р. Оби, г. Барнаул
Table 1. Results of the average monthly and annual water discharge homogeneity analysis in the Ob River, Barnaul

Месяц/Month	Критерий/Test													
	F-критерий/ F-criterion	t-критерий/ t-criterion	Петита Pettitt's				Александрсона SNHT				Буишанда Buishand's			
			Нарушение однородности Homogeneity violation	Средний расход, м³/с Average discharge, m³/s		Изменение/Change, %	Нарушение однородности Homogeneity violation	Средний расход, м³/с Average discharge, m³/s		Изменение/Change, %	Нарушение однородности Homogeneity violation	Средний расход, м³/с Average discharge, m³/s		Изменение/Change, %
				Q1	Q2			Q1	Q2			Q1	Q2	
I	1,34	3,90	1983	309	372	20,5	1983	309	372	20,5	1983	309	372	20,5
II	1,16	3,38	1982	274	331	21,0	1984	274	333	21,5	1984	274	333	21,5
III	1,49	3,27	1982	281	363	29,3	2012	297	480	61,1	1991	283	382	34,7
IV	1,26	1,16	-	2012	2012	0,0	-	2012	2012	0,0	-	2012	2012	0,0
V	2,30	1,80	-	3416	3416	0,0	-	3416	3416	0,0	-	3416	3416	0,0
VI	1,82	0,75	-	3646	3646	0,0	-	3646	3646	0,0	-	3646	3646	0,0
VII	2,06	0,69	-	2481	2481	0,0	-	2481	2481	0,0	-	2481	2481	0,0
VIII	1,14	0,96	-	1780	1780	0,0	-	1780	1780	0,0	-	1780	1780	0,0
IX	2,12	0,48	-	1304	1304	0,0	-	1304	1304	0,0	-	1304	1304	0,0
X	1,23	2,73	1968	993	1185	19,4	-	1095	1095	0,0	-	1095	1095	0,0
XI	1,38	3,70	1975	583	771	32,1	1993	604	840	39,0	1991	602	830	37,8
XII	1,82	3,38	1982	370	471	27,1	2008	390	548	40,5	1986	373	478	28,4
Год Year	1,95	0,45	-	1479	1479	0,0	-	1479	1479	0,0	-	1479	1479	0,0

Примечание: критические значения критериев Фишера F и Стьюдента t приняты в соответствии с [10]. Превышение критических значений критериев выделено в таблице курсивом. Q₁ и Q₂ – осредненные расходы воды в условно однородные периоды (для неоднородных рядов).

Note: Critical values of Fisher F and Student t criteria are in accordance with [10]. The exceeding of the critical value are italicized in the table. Q₁ and Q₂ are the average discharge in conditionally homogenous periods (for heterogenous series).

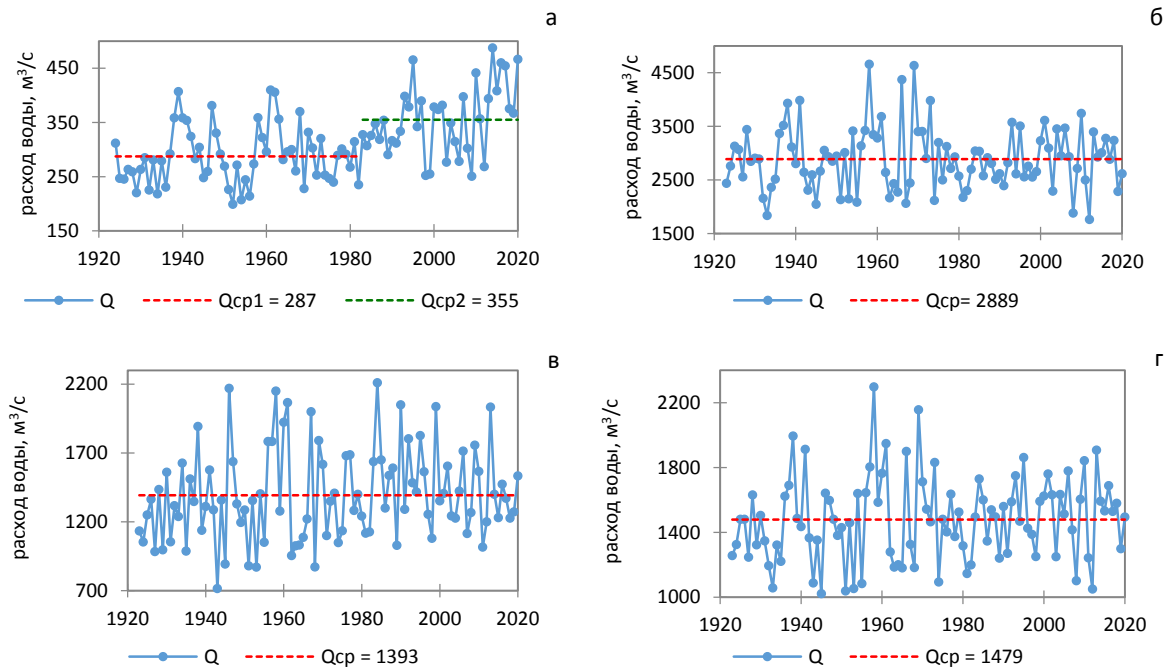


Рис. 1. Результат анализа на однородность расходов воды с использованием метода Буишанда (Buishand's test): а) зимней межени (ноябрь–март); б) половодья (апрель–июль); в) летне-осенней межени (август–октябрь); г) среднегодовых (Q – индивидуальный расход за отдельный год; Q_{ср} – осредненный за период)

Fig. 1. Results of the water discharge homogeneity analysis with the use of the Buishand's range test: а) winter low water (November–March); б) seasonal flood (April–July); в) summer-autumn low water period (August–October); г) average annual (Q – individual year average seasonal discharge; Q_{ср} – averaged for the observation period)

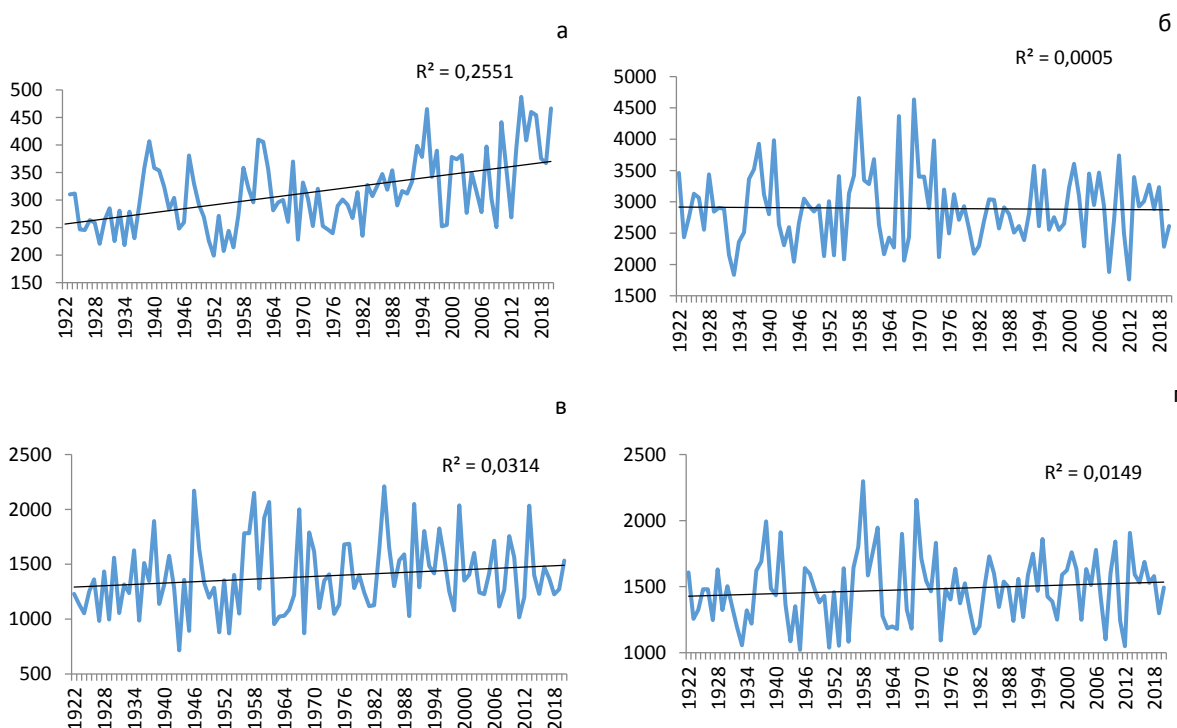


Рис. 2. График изменения расходов и линейный тренд: а) зимней межени (ноябрь–март); б) весеннего половодья (апрель–июль); в) летне-осенней межени (август–октябрь); г) среднегодовых

Fig. 2. Graphs of the changes in the water discharges and the linear trend: а) winter low water (November–March); б) seasonal flood (April–July); в) summer-autumn low water period (August–October); г) annual averaged

Таблица 2. Результаты анализа линейных трендов среднемесячных и годовых расходов р. Оби, г. Барнаул, за 1922–2020 гг.

Table 2. Results of the average monthly and annual water discharges linear trends analysis in the Ob River, Barnaul, for 1922–2020

Месяц Month	Уравнение линейного тренда Linear trend equation	r	σ_r	r / σ_r
I	$y = 1,066x + 278,7$	0,47	0,08	5,88
II	$y = 0,928x + 248,5$	0,44	0,08	5,5
III	$y = 1,551x + 234$	0,50	0,08	6,25
X	$y = 2,824x + 953,2$	0,26	0,09	2,89
XI	$y = 3,523x + 493,5$	0,42	0,08	5,25
XII	$y = 1,688x + 324,5$	0,44	0,08	5,5

Для остальных месяцев года ряды являются однородными, тренды имеют разнонаправленный характер и статистически незначимы. При этом следует отметить уменьшение изменчивости (дисперсии) годового стока и весеннего половодья. Показательны (хотя и статистически незначимы) тренды среднемесячных расходов в период с апреля по июль (половодье). Наблюдается рост расходов воды в апреле и уменьшение стока с мая по июль, очевидно, за счет сдвига снеготаяния на более ранние даты.

Максимальные расходы и уровни воды, с одной стороны, зависят от объема половодья, с другой стороны, в значительной степени обусловлены ме-

теорологическими условиями (интенсивность снеготаяния, жидкие осадки), поэтому были проанализированы отдельно (рис. 3, табл. 3).

Статистический анализ максимальных уровней показал их неоднородность по среднему значению (t-критерий), а максимальных расходов – по F-критерию. По результатам тестов Петита, Алесандерсона и Буишанда ряды являются однородными.

Отмечается статистически незначимый отрицательный тренд максимальных расходов и уровней воды (рис. 3), связанный, очевидно, с общим снижением стока в период весеннего половодья. Кроме того, последние десятилетия характеризуются уменьшением изменчивости (дисперсии) максимальных расходов воды.

Таким образом, несмотря на отсутствие значимых изменений годового и максимального стока, происходит перераспределение стока внутри года, выражающееся в статистически значимом увеличении расходов зимней межени. Расходы воды в половодье, а также максимальные расходы и уровни воды характеризуются отрицательным, статистически незначимым трендом. Тем не менее, учитывая тот факт, что сток половодья формируется под влиянием гидрометеорологических условий осеннего, зимнего и весеннего периодов, можно определенно говорить об увеличении доли базисного стока и,

соответственно, уменьшении талого стока. Это подтверждается уменьшением дисперсии средних и максимальных расходов за половодье (неоднородность рядов по критерию Фишера).

Изменение климата. Обнаруженные изменения водного режима р. Оби, в особенности увеличение стока зимней межени, являются характерной реак-

цией на потепление климата для рек со значительной долей снегового питания [1, 9, 25, 27] и связаны с увеличением количества оттепелей, уменьшением глубины промерзания грунтов, соответственно, ростом грунтового питания в зимний период. В связи с этим представляет особый интерес оценка однородности рядов зимних температур [10].

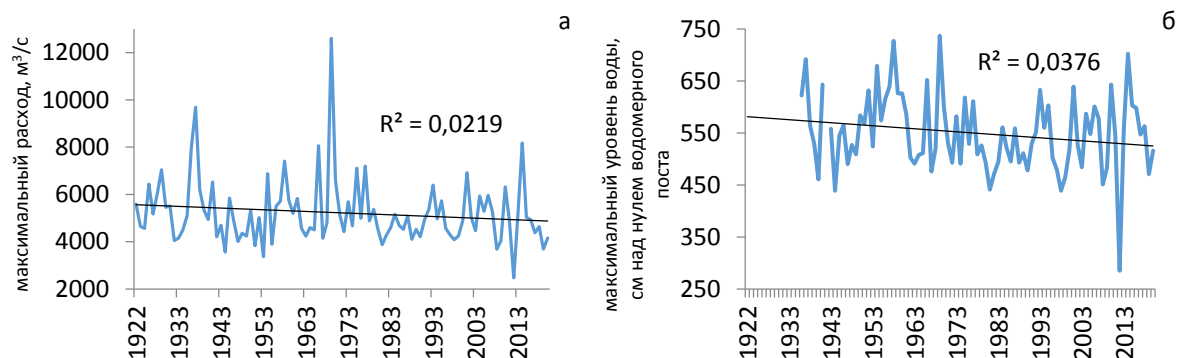


Рис. 3. Изменение максимальных: а) расходов; б) уровней воды, гидропост р. Обь, г. Барнаул

Fig. 3. Changes of the maximum: а) discharges; б) water levels, the Ob River gauging station, Barnaul

Таблица 3. Результаты статистического анализа максимальных расходов $Q_{\max}$ и уровней $H_{\max}$ р. Оби, г. Барнаул

Table 3. Results of statistical analysis of maximum discharges $Q_{\max}$ and levels $H_{\max}$ of the Ob River water, Barnaul

	F-критерий F-criterion	t-критерий t-criterion	Тест Петита Pettitt's test	Тест Александерсона SNHT	Тест Бушанда Buishand's test	r	σ_r	r/ σ_r
$Q_{\max}$	2,43	1,72	однородный	однородный	однородный	0,14	0,1	1,4
$H_{\max}$	1,02	2,61	однородный	однородный	однородный	0,19	0,1	1,9

Примечание: критические значения критериев Фишера F и Стьюдента t приняты в соответствии с [10] и составили для максимальных расходов 1,62 и 1,89 соответственно; для максимальных уровней – 1,63 и 1,98. Превышение критических значений критериев выделено в таблице курсивом.

Note: Critical values of Fisher F and Student t criteria are in accordance with [10] and are 1.62 and 1.89 respectively; for maximum levels – 1.63 and 1.98. The exceeding of the critical value are italicized in the table.

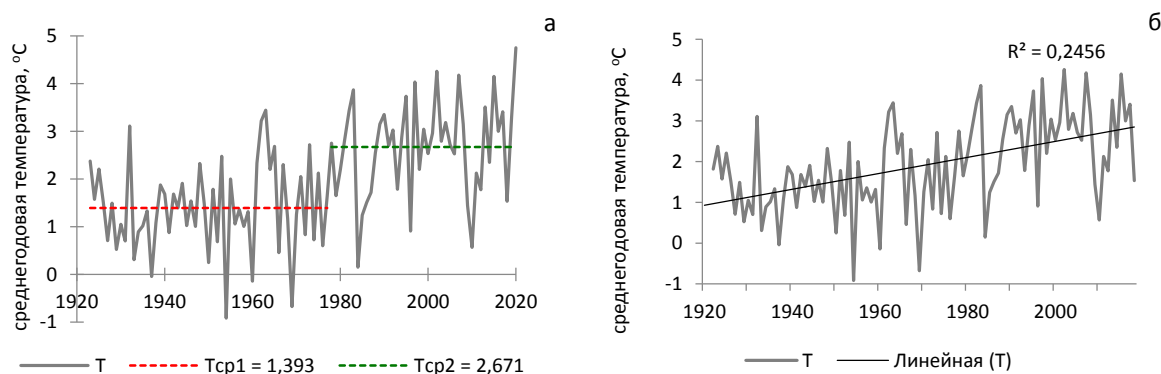


Рис. 4. Результаты статистического анализа среднегодовых температур, метеостанция г. Барнаул: а) тесты на стационарность Петита, Бушианда и Александерсона с определением года нарушения; б) линейный тренд. T – среднегодовая температура; T_{cr1} и T_{cr2} – средняя температура за период до и после нарушения стационарности ряда (1977 г.) соответственно

Fig. 4. Results of the statistics analysis of the annual average temperatures, Barnaul meteorological station: а) the Pettitt's, Buishand's and Alexandersson's tests with the indication of the violation year; б) linear trend. T – average annual temperature; T_{cr1} and T_{cr2} – average temperature during the period before and after the violation of the time-series stationarity (1977) respectively

Для обоснования причин выявленных изменений стока был выполнен анализ основных климатических стокоформирующих факторов – температур и осадков.

Температура воздуха. Анализ рядов среднегодовых температур по метеостанции Барнаул за последние 100 лет показал их неоднородность по среднему значению (критерий Стьюдента). Использование тестов Петита, Бушианда и Александерсона подтвердило неоднородность ряда с точкой нарушения в 1977 г. (табл. 4, рис. 4).

Это хорошо согласуется с общеизвестными представлениями об изменении климата на территории России [1, 28]. Значимость наблюдаемого увеличения среднегодовых температур подтверждает очень высокое значение критерия Стьюдента – 5,62 (при критическом 1,66).

Для среднемесячных температур нарушение однородности рядов характерно лишь для периода с февраля по май и августа, ряд температур за декабрь можно признать «сомнительным». Год нарушения однородности изменяется от 1957 г. (фев-

раль) до 1987–2006 г. (апрель). Очевидно, что изменение температурного режима внутри года происходит очень неравномерно и затрагивает в основном зимние и весенние месяцы (табл. 4).

Анализ линейных трендов показал, что наибольший рост температур наблюдается с февраля по апрель. В июне и с августа по октябрь наблюдаются статистически незначимый рост, а в июле – незначительное снижение температур (табл. 5). В отношении среднегодовых температур можно определенно утверждать о статистически значимом положительном тренде (рис. 4).

Атмосферные осадки. Как отмечалось выше, изменение методики наблюдения за осадками и связанная с этим неоднородность рядов затрудняют статистический анализ атмосферных осадков и его интерпретацию за исследуемый период. Был выполнен анализ двух рядов атмосферных осадков по ГМС Барнаул: один из них – с 1967 по 2020 гг., без разделения осадков на твердые, жидкие и смешанные [15], второй – скорректированный [13, 16] с 1959 по 2015 гг.

Таблица 4. Результаты анализа на однородность среднемесячных и среднегодовых температур воздуха по метеостанции г. Барнаул

Table 4. Results of the average monthly and annual air temperature homogeneity analysis according to Barnaul meteorological station data

Месяц/Month	Критерий/Test													
	F-критерий/F-criterion	t-критерий/t-criterion	Петита/Pettitt's				Александрсона/SNHT				Буишанда/Buishand's			
			Нарушение однородности Homogeneity violation	T ₁	T ₂	Изменение/Change, °C	Нарушение однородности Homogeneity violation	T ₁	T ₂	Изменение/Change, °C	Нарушение однородности Homogeneity violation	T ₁	T ₂	Изменение/Change, °C
I	1,45	1,56	-	-16,65	-16,65	-	-	-16,65	-16,65	0,0	-	-16,65	-16,65	-
II	1,13	2,69	1957	-16,9	-14,3	2,7	1957	-16,9	-14,3	2,7	1957	-16,9	-14,3	2,7
III	1,03	3,72	1982	-8,6	-5,9	2,7	1999	-8,3	-4,8	3,5	1982	-8,6	-5,9	2,7
IV	1,05	3,52	1989	2,7	5,1	2,4	2006	2,9	6,4	3,5	1987	2,6	4,9	2,3
V	1,03	2,56	1988	11,4	13,0	1,5	1988	11,4	13,0	1,5	1988	11,4	13,0	1,5
VI	1,45	1,50	-	17,83	17,83	0,0	-	17,83	17,83	0,0	-	17,83	17,83	0,0
VII	1,71	0,41	-	19,82	19,82	0,0	-	19,82	19,82	0,0	-	19,82	19,82	0,0
VIII	1,28	1,50	1986	16,7	17,6	0,8	1996	16,8	17,7	0,9	1986	16,7	17,6	0,8
IX	1,72	0,59	-	11,0	11,0	0,0	-	11,0	11,0	0,0	-	11,0	11,0	0,0
X	1,20	0,98	1988	2,9	4,0	1,1	-	3,26	3,26	0,0	-	3,26	3,26	0,0
XI	1,13	2,15	-	3,26	3,26	0,0	-	3,26	3,26	0,0	-	3,26	3,26	0,0
XII	1,12	2,46	1976	-15,3	-12,8	2,5	-	-14,16	-14,16	0,0	1976	-15,3	-12,8	2,5
Год Year	1,27	5,62	1977	1,4	2,7	1,3	1977	1,4	2,7	1,3	1977	1,4	2,7	1,3

Примечание: критические значения критериев Фишера F и Стьюдента t приняты в соответствии с [26] и составили 1,45 и 1,66 соответственно. Превышение критических значений критериев выделено в таблице курсивом. T₁ и T₂ – средняя температура в условно однородные периоды (для неоднородных рядов), °C.

Note: Critical values of Fisher F and Student t criteria are in accordance with [29] and are 1.45 and 1.66 respectively. The exceeding of the critical value are italicized in the table. T₁ and T₂ are the average temperature in conditionally homogenous periods (for heterogenous series), °C.

Таблица 5. Результаты анализа линейных трендов среднемесячных и годовых температур по метеостанции Барнаул за период 1922–2020 гг.

Table 5. Results of the average monthly and annual temperature linear trends according to Barnaul meteorological station data from 1922 to 2020

Месяц Month	Уравнение тренда Linear trend equation	r	σ_r	r/ σ_r
I	$y=0,024x-17,91$	0,16	0,10	1,6
II	$y=0,042x-17,33$	0,28	0,09	3,1
III	$y=0,047x-9,884$	0,42	0,08	5,3
IV	$y=0,039x+1,43$	0,41	0,08	5,1
V	$y=0,022x+10,82$	0,31	0,09	3,4
VI	$y=0,006x+17,49$	0,12	0,10	1,2
VII	$y=-0,000x+19,84$	0,00	0,10	0,00
VIII	$y=0,008x+16,61$	0,18	0,10	1,8
IX	$y=0,005x+10,64$	0,10	0,10	1,0
X	$y=0,005x+2,985$	0,08	0,10	0,8
XI	$y=0,019x-8,150$	0,15	0,10	1,50
XII	$y=0,031x-15,69$	0,20	0,10	2,0
Год/Year	$y=0,020x+0,905$	0,53	0,07	7,6

Примечание: значимые тренды выделены курсивом.
 Note: significant trends are italicized.

Детальный сравнительный анализ этих двух массивов данных является предметом отдельного исследования и не входит в наши задачи, тем не менее представляет интерес проследить некоторые общие тенденции в изменении осадков внутри года, в том числе оценить изменение доли твердых осадков. Проверка рядов атмосферных осадков за 1966–2020 гг. с помощью тестов Петита, Буишанда и Александерсона для большинства месяцев не выявила нарушения стационарности. В ноябре и декабре два теста показали нарушение стационарности в 1998 и 1986 гг. соответственно (ряды можно охарактеризовать как «сомнительные»). Анализ линейных трендов показал разнонаправленные статистически незначимые (за исключением ноября и декабря) изменения (табл. 6).

Аналогичные результаты получены при анализе общих сумм осадков по данным скорректированных рядов за 1959–2015 гг. (табл. 7). Особый интерес представляет изменение соотношения осадков разных типов: статистически значимое уменьшение твердых осадков и увеличение жидких и смешанных. Наиболее существенные изменения наблюдаются для твердых осадков – по результатам всех тестов их количество уменьшилось более чем на треть. Год нарушения однородности – 1972, что позволяет связать эту тенденцию с потеплением климата. С другой стороны, значимое увеличение количества жидких осадков с 1989 г. может быть связано как с сокращением доли твердых осадков, так и с общим ростом увлажненности территории.

Таблица 6. Результаты анализа линейных трендов месячных и годовых сумм осадков по метеостанции Барнаул за период 1967–2020 гг.

Table 6. Results of the monthly and annual amount of precipitation linear trends according to Barnaul meteorological station data from 1967 to 2020

Месяц Month	Уравнение тренда Linear trend equation	r	σ_r	r/ σ_r
I	$y=-0,1219x+27,49$	0,11	0,14	0,79
II	$y=-0,063x+19,999$	0,10	0,14	0,71
III	$y=-0,0045x+19,136$	0,00	0,14	0,00
IV	$y=0,0499x+24,993$	0,04	0,14	0,29
V	$y=0,0049x+40,794$	0,00	0,14	0,00
VI	$y=0,0271x+49,048$	0,02	0,14	0,14
VII	$y=0,4649x+54,392$	0,21	0,13	1,62
VIII	$y=-0,3645x+57,372$	0,23	0,13	1,77
IX	$y=0,116x+29,604$	0,09	0,14	0,64
X	$y=-0,0643x+41,06$	0,05	0,14	0,36
XI	$y=0,3751x+25,812$	0,33	0,12	2,75
XII	$y=0,3126x+18,936$	0,36	0,12	3,0
Год/Year	$y=0,7622x+406,89$	0,17	0,13	1,31

Примечание: значимые тренды выделены курсивом.
 Note: significant trends are italicized.

Таблица 7. Результаты статистического анализа сумм жидких, твердых и смешанных осадков по метеостанции Барнаул за период 1959–2015 гг. (скорректированный архив)

Table 7. Results of the statistical analysis of the liquid, solid and mixed precipitations according to Barnaul meteorological station data from 1959 to 2015 (edited archive)

Критерий Test	Тип осадков/Precipitation type			
	Жидкие Wet	Смешанные Mingled	Твердые Solid	Общие Total
	результаты анализа на однородность results of homogeneity analysis			
F-критерий/F-criterion ($F_{крит}=2$)	1,01	1,76	3,28	1,54
t-критерий/t-criterion ($t_{крит}=2,01$)	2,47	1,60	2,54	0,84
Тест Петита/Pettitt's test	1989	1975	1972	однородный homogenous
Тест Александерсона/SNHT	1989	однородный homogenous	1972	
Тест Буишанда/Buishand's test	1989		1972	
Изменение/Change, %	19,58	–	–31,68	–
результаты анализа линейных трендов/linear trend analysis results				
r	0,31	0,24	0,48	0,04
σ_r	0,12	0,12	0,10	0,13
r/ σ_r	2,6	2	4,8	0,31

Таким образом, значимые изменения климата по данным метеостанции Барнаул за последние 100 лет заключаются в интенсивном увеличении температуры воздуха начиная с 1977 г., в основном за счет весенних и зимних месяцев. Следует отметить, что весной начало роста температур отмечается позднее – с 80-х гг. прошлого века. В летние месяцы рост температур минимальный, тренды статистически незначимы. В совокупности с ростом зимних температур статистически значимое уменьшение твердых осадков и замещение их жидкими существенным образом изменяет климатические условия зимних месяцев, определяющих формирование стока как в период зимней межени, так и в половодье.

Заключение

Совместный статистический анализ расходов воды р. Оби на гидропосту в г. Барнауле и основных стокоформирующих факторов (температуры и осадки) по данным метеостанции в г. Барнауле позволил выявить изменения стока, связанные с потеплением климата, произошедшие за период с 1922 по 2020 гг.

Статистически значимые изменения климатических характеристик заключаются, в первую очередь, в увеличении температуры воздуха. Рост годовой температуры по ГМС Барнаул составил 1,3 °С. С ростом температур на 2,3–3,5 °С в зимние месяцы связано уменьшение количества твердых осадков до 30 % и замещение их смешанными и жидкими. Значимого изменения общего количества осадков не выявлено. Нарушение однородности рядов температур, определенное по результатам тестов Петита, Буишанда и Александерсона, произошло в 1977 г., что соответствует имеющимся данным об изменении климата на территории России. Наиболее интенсивный рост температур наблюдается в зимние и весенние месяцы. Изменение количества осадков внутри года характеризуется разнонаправленными статистически незначимыми изменениями.

На фоне увеличения среднегодовых расходов воды произошло уменьшение максимальных расходов и уровней воды, а также снижение дисперсии годового и максимального стока. Ряды годовых

расходов являются однородными по среднему значению (критерий Стьюдента), а также по результатам тестов Петита, Буишанда и Александерсона; линейные тренды статистически незначимы.

В связи с ростом температур произошло значительное перераспределение стока внутри года. Оно проявляется в статистически значимом увеличении стока зимней межени в среднем на 24 % начиная с 1982 г., в росте расходов воды в апреле, в первую волну половодья (за счет сдвига снеготаяния на более ранние даты), и уменьшении стока во вторую волну половодья (май–июль). Следует отметить некоторое «запаздывание» реакции меженного стока на рост зимних температур.

Расходы периода половодья однородны по среднему значению (критерий Стьюдента, а также Буишанда, Петита и Александерсона), но неоднородны по дисперсии (критерий Фишера). При этом можно определенно говорить об увеличении естественной зарегулированности стока, связанной с ростом базисного и уменьшением талого стока. Это подтверждает факт снижения дисперсии средних и максимальных расходов.

Таким образом, наблюдаемые изменения стока выходят за рамки естественных колебаний водности, т. к. существенно изменились факторы, определяющие соотношения талого и грунтового стока, что необходимо учитывать при изучении и прогнозировании, в том числе опасных гидрологических явлений. Этот момент является принципиальным, во-первых, при расчленении гидрографа по типам питания, во-вторых, при определении предикторов для построения моделей формирования талого стока и разработки прогноза объема и максимума половодья с использованием традиционных физико-статистических методов. Определение года нарушения однородности расходов воды с одной стороны и климатических характеристик с другой является основанием для разделения временных рядов как минимум на два условно однородных периода. В отличие от рек Европейской части России, начало нового квазистационарного периода на р. Оби в верхнем течении приходится на начало 80-х гг. XX в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. – СПб.: ГГИ, 2008. – 600 с.
2. Лавров С.А., Калужный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2016. – № 6. – С. 42–60.
3. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона / Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева, М.А. Харламов, М.И. Варенцов, Н.Л. Фролова, Е.С. Повалишника // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 2. – С. 117–146. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-117-146.
4. Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change / W.R. Wieder, D. Kennedy, F. Lehner, K.N. Musselman, K.B. Rodgers, N. Rosenbloom, R. Yamaguchi // Proc. of the National Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 119. – № 30. – P. e2202393119. DOI: 10.1073/pnas.2202393119.
5. Long term trend analysis of river flow and climate in northern Canada / M.S. Zaghloul, E. Ghaderpour, H. Dastour, B. Farjad, A. Gupta, H. Eum, Q.K. Hassan // Hydrology. – 2022. – Vol. 9. – № 11. – P. 197. DOI: 10.3390/hydrology9110197.

6. Rishika A., Reghunath G., Mujumdar P.P. Impact of climate change on non-stationarity of extreme streamflows in Godavari River Basin, India // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2023. – P. EGU-2697. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-2697.
7. Teegavarapu R.S.V., Sharma P.J. Nonoverlapping block stratified random sampling approach for assessment of stationarity // Journal of Hydrologic Engineering. – 2021. – Vol. 26. – № 7. – P. 04021020. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002098.
8. Wang W., Van Gelder P., Vrijling J.K. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in western Europe in the 20th century // Proc. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance Rethymno, Greece. – London: IWA, 2005. – Vol. 810. – P. 451–461.
9. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз / А.Н. Гельфан, Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, М.Б. Киреева, В.Ю. Григорьев, Ю.Г. Мотовилов, Е.М. Гусев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
10. Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб: Нестор-История, 2010. – 162 с.
11. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений / Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, М.Б. Киреева, В.Ю. Григорьев, А.Н. Гельфан, А.А. Сазонов, А.И. Шевченко // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 3. – С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
12. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Л.Т. Трофименко, Н.В. Швец // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 от 23 октября 2014 г. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (дата обращения 15.02.2024).
13. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М. Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936–2000 гг. // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 10. – С. 78–89.
14. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. – 2014. – № 177. – С. 136–148.
15. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Н.Н. Коршунова, Н.В. Швец. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 от 27 февраля 2015 г. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=17> (дата обращения 15.02.2024).
16. Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов / Б.М. Ильин, О.Н. Булыгина, Э.Г. Богданова, В.М. Веселов, С.Ю. Гаврилова. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=12> (дата обращения 15.02.2024).
17. Сикан А.В., Байдук О.В. Влияние изменения климата на водный режим рек южной и восточной частей Республики Беларусь // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2015. – № 40. – С. 61–70.
18. Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И. Статистическая оценка однородности временных рядов стока рек Беларуси // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – Т. 3 (126). – С. 92–95. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-92-95.
19. Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series // InterScience J Climatol. – 2003. – Vol. 23 (6). – P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
20. Руководство по гидрологической практике. Т. II: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. – Женева: ВМО, 2012. – Вып. 168. – 324 с.
21. Trend analysis of hydro-climate variables in the Jemma sub-basin of Upper Blue Nile (Abbay) Basin, Ethiopia / T.M. Lebeza, T. Gashaw, G.W. Tefera, J.A. Mohammed // SN Applied Sciences. – 2023. – Т. 5. – № 5. – P. 129. DOI: 10.1007/s42452-023-05345-4.
22. Yilmaz M., Tosunoğlu F. Assessing the main drivers of low flow series in Turkey // Natural Hazards. – 2023. – Т. 115. – № 3. – P. 1927–1953. DOI: 10.1007/s11069-022-05621-3.
23. Jaiswal R.K., Lohani A.K., Tiwari H.L. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters // Environmental Processes. – 2015. – Т. 2. – P. 729–749. DOI: 10.1007/s40710-015-0105-3.
24. Drissia T.K., Jothiprakash V., Anitha A.B. Statistical classification of streamflow based on flow variability in west flowing rivers of Kerala, India // Theoretical and Applied Climatology. – 2019. – Т. 137. – № 3–4. – P. 1643–1658. DOI: 10.1007/s00704-018-2677-0.
25. Современные изменения характеристик максимального стока рек России / Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, М.Б. Киреева, В.Ю. Григорьев, А.Н. Гельфан, А.А. Сазонов, Л.С. Курочкина // Вопросы географии. – 2023. – № 157. – С. 137–166. DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7.
26. Somorowska U. Warming air temperature impacts snowfall patterns and increases cold-season baseflow in the Liwiec River basin (Poland) of the central European lowland // Resources. – 2023. – Т. 12. – № 2. – P. 18. DOI: 10.3390/resources12020018.
27. Warming soil temperature and increasing baseflow in response to recent and potential future climate change across northern Manitoba, Canada / R. Lilhare, S.J. Déry, T.A. Stadnyk, S. Pokorny, K.A. Koenig // Hydrological Processes. – 2022. – Vol. 36. – № 11. – P. e14748. DOI: 10.1002/hyp.14748.
28. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. – СПб.: Научное издание, 2022. – 676 с.
29. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

Информация об авторах

Светлана Юрьевна Самойлова, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. bastet@iwer.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>

Елена Владимировна Мардасова, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; mardasova_ev@mail.ru

Андрей Алексеевич Коломейцев, ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; kolomeyev@iwer.ru

Поступила в редакцию: 15.05.2024

Поступила после рецензирования: 15.10.2024

Принята к публикации: 19.11.2024

REFERENCES

1. *Russian water resources and their use*. Ed. by I.A. Shiklomanov. St. Petersburg, GGI Publ., 2008. 600 p. (In Russ.)
2. Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. Climatic changes impact upon the spring high-water runoff and its formation factors in the Volga basin. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2016, no. 6, pp. 42–60. (In Russ.)
3. Varenkova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.I., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. Spring river runoff in the European part of Russia main factors and their estimation. II reassessment in modern conditions on example of the Don basin rivers. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2022, no. 2, pp. 117–146. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-117-146. (In Russ.)
4. Wieder W.R., Kennedy D., Lehner F., Musselman K.N., Rodgers K.B., Rosenbloom N., Yamaguchi R. Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119, no. 30, p. e2202393119. DOI: 10.1073/pnas.2202393119.
5. Zaghloul M.S., Ghaderpour E., Dastour H., Farjad B., Gupta A., Eum H., Hassan Q.K. Long term trend analysis of river flow and climate in northern Canada. *Hydrology*, 2022, vol. 9, no. 11, p. 197. DOI: 10.3390/hydrology9110197.
6. Rishika A., Reghunath G., Mujumdar P.P. Impact of climate change on non-stationarity of extreme streamflows in Godavari River Basin, India. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2023, p. EGU-2697. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-2697.
7. Teegavarapu R.S.V., Sharma P.J. Nonoverlapping block stratified random sampling approach for assessment of stationarity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, vol. 26, no. 7, p. 04021020 DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002098.
8. Wang W., Van Gelder P., Vrijling J. K. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in western Europe in the 20th century. *Proc. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance Rethymno, Greece*. London, IWA, 2005, vol. 810, pp. 451–461.
9. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigorev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnostic and projections. *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79. In Russ.
10. Rozhdestvensky A.V., Lobanova A.G. *Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values based on heterogeneous data*. St. Petersburg, Nestor-History Publ., 2010. 162 p. (In Russ.)
11. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
12. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Description of the data array of the average monthly air temperature at Russian stations*. Certificate of state registration of the database no. 2014621485 dated October 23, 2014. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (accessed 15 February 2024).
13. Bogdanova E.G., Gavrilova S.Y., Ilin B.M. Time changes of atmospheric precipitation in Russia from the corrected data during 1936–2000. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 706–714. DOI: 10.3103/S1068373910100092.
14. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Specialized data sets for climate research. *The work of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – the World Data Center*, 2014, no. 177, pp. 136–148. (In Russ.)
15. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. *Description of the data array of monthly precipitation amounts at stations in Russia*. Certificate of state registration of the database no. 2015620394 dated February 27, 2015. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=17> (accessed 15 February 2024).
16. Ilyin B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G., Veselov V.M., Gavrilova S.Yu. *Description of the array of monthly precipitation amounts, with the elimination of systematic errors of precipitation measuring devices*. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=12> (accessed 15 February 2024).
17. Sikan A.V., Baiduk O. V. The impact of climate change on river water regime over southern and eastern parts of the Republic of Belarus. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2015, no. 40, pp. 61–70. (In Russ.)
18. Volchak A.A., Sidak S.V., Parfomuk S.I. Statistical assessment of the runoff time series homogeneity of the rivers in Belarus. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2021, no. 3 (126), pp. 92–95. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-92-95.
19. Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *InterScience J Climatol.*, 2003, vol. 23 (6), pp. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
20. *Handbook of Hydrological Practice Vol. II: Water resources management and the practice of applying hydrological methods*. Geneva, WMO, 2012. Iss. 168, 324 p. (In Russ.)

21. Lebeza T.M., Gashaw T., Tefera G.W., Mohammed J.A. Trend analysis of hydro-climate variables in the Jemma sub-basin of Upper Blue Nile (Abbay) Basin, Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 2023, vol. 5, no. 5, p. 129. DOI: 10.1007/s42452-023-05345-4.
22. Yilmaz M., Tosunoğlu F. Assessing the main drivers of low flow series in Turkey. *Natural Hazards*, 2023, vol. 115, no. 3, pp. 1927–1953. DOI: 10.1007/s11069-022-05621-3.
23. Jaiswal R.K., Lohani A.K., Tiwari H.L. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. *Environmental Processes*, 2015, vol. 2, pp. 729–749. DOI: 10.1007/s40710-015-0105-3.
24. Drissia T.K., Jothiprakash V., Anitha A.B. Statistical classification of streamflow based on flow variability in west flowing rivers of Kerala, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 137, no. 3–4, pp. 1643–1658. DOI: 10.1007/s00704-018-2677-0.
25. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., V Grigorev.Y., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Zhuravlev S.A., Kurochkina L.S. Modern changes of the maximum flow characteristics of the rivers of Russia. *Problems of Geography*, 2023, no. 157, pp. 137–166. DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7.
26. Somorowska U. Warming air temperature impacts snowfall patterns and increases cold-season baseflow in the Liwiec River basin (Poland) of the central European lowland. *Resources*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 18. DOI: 10.3390/resources12020018.
27. Lilhare R., Déry S.J., Stadnyk T.A., Pokorny S., Koenig K.A. Warming soil temperature and increasing baseflow in response to recent and potential future climate change across northern Manitoba, Canada. *Hydrological Processes*, 2022, vol. 36, no. 11, p. e14748. DOI: 10.1002/hyp.14748.
28. *The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Ed. by V.M. Kattsov. St. Petersburg, High-tech technologies Publ., 2022. 676 p. (In Russ.)
29. Mitropolsky A.K. *Technique of statistical computing*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 576 p. (In Russ.)

Information about the authors

Svetlana Yu. Samoilova, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; bastet@iwep.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>

Elena V. Mardasova, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; mardasova_ev@mail.ru

Andrey A. Kolomeytsev, Leading Engineer, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; kolomeycev@iwep.ru

Received: 15.05.2024

Revised: 15.10.2024

Accepted: 19.11.2024

УДК 629.039.58

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

Шифр специальности ВАК: 2.8.6

Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника

А.В. Шалимов[✉], Д.С. Кормщиков, М.Д. Попов

Горный институт УрО РАН, Россия, г. Пермь

[✉]shalimovav@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью прогнозирования конвективного движения воздуха в шахтных стволах в аварийных режимах вентиляции рудников, связанных с прекращением их принудительного проветривания. Возникновение протяжённых конвективных вихрей в стволах интенсифицирует процессы переноса тепла и дыма в случае пожара, а также уменьшает величину естественной тяги, слабо проветриваемой рудник после отключения вентилятора. Знание условий возникновения тепловой конвекции в стволах позволяет точнее планировать мероприятия по борьбе с рудничными пожарами. *Цель:* разработка методики оценки конвективной устойчивости воздуха применительно к условиям шахтных стволов. *Объекты:* шахтные стволы. *Методы:* аналитическое и численное моделирование процессов возникновения и развития конвекции в шахтном стволе; сравнительный анализ способов оценки конвективной устойчивости неравномерно нагретой среды в поле силы тяжести. *Результаты.* Проанализированы способы оценки конвективной устойчивости воздуха в зависимости от значения вертикального градиента температуры. Показано, что аналитические методы оценки в приближениях сжимаемой жидкости в гидродинамике, идеального газа в метеорологии или по знаку вертикального градиента плотности дают результаты, значительно различающиеся количественно. С целью выявления наиболее адекватного способа оценки применительно к рудничным условиям проведено численное моделирование конвективного движения воздуха в стволе при разных значениях его вертикального температурного градиента. Расчётным путём установлено, что неподвижный воздух в стволе при подогреве снизу оказывается ещё более устойчивым, чем следует из самой оптимистичной оценки, и критический температурный градиент воздуха при этом почти в 5 раз превышает адиабатический. Очевидной причиной полученного результата является стабилизирующее действие сил вязкости, многократно возрастающее в теснённых условиях шахтных стволов и не дающее развиваться конвекции, которая в свободной атмосфере возникает при значительно меньших конвективных силах. На основании полученных результатов сделан вывод, что метеорологический критерий оценки конвективной устойчивости воздуха применительно к условиям шахтных стволов не приемлем, т. к. является чрезмерно жёстким. Конвекция возникает при вертикальном градиенте температуры ~46 градусов/км, что возможно либо при поступлении в ствол холодного наружного воздуха, либо при наличии в стволе источников тепла, подогревающих воздух сильнее, чем теплообмен с окружающим породным массивом.

Ключевые слова: конвективная устойчивость, турбулентность, тепловая депрессия, адиабатический градиент, приближение Буссинеска, число Рэлея, число Шварцшильда, коэффициент адиабаты

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 124020500030-7).

Для цитирования: Шалимов А.В., Кормщиков Д.С., Попов М.Д. Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

UDC 629.039.58

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

Determination of air convective stability index in shafts at zero ventilation mode of a mine

A.V. Shalimov✉, D.S. Kormshchikov, M.D. Popov

Mining Institute UB RAS, Perm, Russian Federation

✉shalimovav@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to predict air convective movement in mine shafts in emergency modes of mine ventilation associated with the cessation of their forced ventilation. The occurrence of extended convective vortices in the shafts intensifies heat and smoke transfer in the event of a fire, and reduces as well the amount of natural draught, which poorly ventilates the mine after the fan is turned off. Knowledge of the conditions for the occurrence of thermal convection in shafts will allow for more accurate planning of measures to combat mine fires. **Aim.** To develop a methodology for assessing the convective stability of air in relation to the conditions of mine shafts. **Objects.** Mine shafts. **Methods.** Analytical and numerical modeling of convection occurrence and development in the mine shaft; comparative analysis of methods for estimating the convective stability of an unevenly heated medium in the gravitational field. **Results.** The authors have analyzed the methods for estimating air convective stability depending on the value of the vertical temperature gradient. It is shown that analytical methods of estimation in approximations of a compressible fluid in hydrodynamics, an ideal gas in meteorology, or by the sign of a vertical density gradient give results that differ significantly quantitatively. In order to identify the most adequate method of assessment in relation to mine conditions, the authors carried out numerical simulation of the convective air movement in the shaft at different values of its vertical temperature gradient. By calculation, it was established that the still air in the shaft when heated from below turns out to be even more stable than follows from the most optimistic estimate – the critical temperature gradient of the air is almost 5 times higher than the adiabatic one. The obvious reason for the result obtained is the stabilizing effect of viscosity forces, which increases many times over in the cramped conditions of mine shafts, preventing the development of convection, which occurs in a free atmosphere with much lower convective forces. Based on the results obtained, it is concluded that the meteorological criterion for assessing the convective stability of air in relation to the conditions of mine shafts is not suitable, since it is excessively rigid. Convection occurs at a vertical temperature gradient of ~46 °C/km, which is possible either when cold outside air enters the shaft or when there are heat sources in the shaft that heat the air more than the heat exchange with the surrounding rock mass.

Keywords: convective resistance, turbulence, heat depression, adiabatic gradient, the Bussinesque approach, Rayleigh number, Schwarzschild number, adiabatic coefficients

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. 124020500030-7).

For citation: Shalimov A.V., Kormshchikov D.S., Popov M.D. Determination of air convective stability index in shafts at zero ventilation mode of a mine. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701

Введение

Нулевой режим вентиляции применяется в негазовых шахтах, как правило, в аварийных ситуациях, связанных с возникновением рудничных пожаров [1]. После отключения вентилятора принудительное проветривание рудника прекращается, скорость распространения образующихся в очаге пожара газов по горным выработкам резко уменьшается, также снижается интенсивность горения из-за недостатка кислорода. После выключения источника тяги движение воздуха в руднике полностью не прекращается, т. к. остаются тепловые депрессии – общерудничная, являющаяся причиной возникновения естественной тяги [2–4], и локальные

депрессии, проявляющиеся в негоризонтальных выработках с источниками тепла [5]. Во втором случае возникают как конвективные рециркуляционные движения воздуха по замкнутым контурам различного масштаба [6], так и конвекция внутри отдельных выработок, в том числе и горизонтальных, когда потоки воздуха над почвой и кровлей выработки двигаются с разными скоростями, а иногда и в разных направлениях [7]. С учётом отмеченного прогноз эффективности использования нулевого режима вентиляции для локализации и прекращения пожара без оценки негативного воздействия этих конвективных процессов может быть слишком оптимистичным и не соответствовать ре-

альности [8]. Вклад тепловых депрессий в одномерное движение воздуха по выработкам хорошо изучен и не сложно рассчитывается математически [9], чего нельзя сказать о моделировании теплового расслоения воздушного потока по сечению выработка с образованием замкнутых конвективных вихрей. Особенно актуально такое моделирование в отношении шахтных стволов, как наиболее важных и масштабных по сечению и вертикальной протяжённости элементов рудничной вентиляционной сети, неоднородность температуры воздуха по глубине в которых обусловлена температурой наружного воздуха [10], геотермическим градиентом, гидростатическим разогревом воздуха от сжатия и спецификой теплообменных процессов [11]. В нулевом режиме вентиляции локальное движение воздушных потоков в стволах является плохо предсказуемым, поскольку сопряжено с решением задачи конвективной устойчивости столба неоднородно нагретого воздуха и определением конфигурации движения воздуха в случае потери его устойчивости [12].

Существует два общепринятых способа оценки конвективной устойчивости равновесия среды в поле силы тяжести. Первый из них «плотностной» говорит о том, что среда устойчива, если градиент плотности направлен вниз, и применяется для несжимаемых сред в приближении Буссинеска [13]. Второй способ, «температурный», формулируется для сжимаемых сред в приближении идеального газа. В соответствии с ним идеальный газ находится в устойчивом равновесии, если вертикальный градиент температуры не превышает по абсолютной величине адиабатический [14, 15]. «Плотностной» способ оценки используется для моделирования устойчивости невязких сред небольших бытовых масштабов, когда гидростатическим сжатием и вязкостью можно пренебречь. «Температурный» способ применяется в метеорологии, где перепады высот воздуха исчисляются сотнями метров и километрами [16, 17]. Казалось бы, что для моделирования устойчивости воздуха в вертикальных шахтных стволах, глубина которых составляет несколько сот метров, показателем устойчивости должен являться адиабатический градиент. Однако выбор этот не очевиден, поскольку в отличие от метеорологии, в которой воздушные массы не имеют границ [18], воздух в стволе ограничен вертикальной цилиндрической полостью, протяжённость которой значительно больше поперечного размера. Не исключено, что в таких стеснённых условиях конвективная устойчивость воздуха может оказаться значительно выше, чем в случае отсутствия границ, т. к. возникновение протяжённых по глубине ствола конвективных вихрей сопряжено с большим трением и дополнительными тратами энергии на поддержание такого движения.

Анализ способов математического моделирования конвективной устойчивости среды с вертикальным градиентом температуры

Прежде всего необходимо выяснить, насколько количественно различаются «плотностной» и «температурный» способы оценки конвективной устойчивости воздуха, т. к. при незначительном различии в выборе одного из них будет отсутствовать практический смысл. Для их оценочного сравнения можно использовать приближение идеального газа, уравнение состояния которого на любом уровне $z > 0$, м, от 0 до H , м, по глубине ствола H имеет вид:

$$\frac{P(z)}{T(z)\rho(z)} = \frac{R}{\mu}, \quad (1)$$

где $P(z)$, $T(z)$, $\rho(z)$ и μ – давление, Па, температура, К, плотность, кг/м³, и молярная масса воздуха, кг/моль; $R=8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Если оценку конвективной устойчивости столба воздуха проводить по вертикальному градиенту плотности, то критическим показателем будет нулевой градиент, т. е. $\rho(z)=\text{const} \equiv \rho_0$. При неизменном значении плотности давление воздуха будет расти с глубиной линейно

$$P(z) = P_0 + \rho_0 g z, \quad (2)$$

где $P_0=P(0)$ – давление воздуха на поверхности, Па; $g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения. Подстановка $\rho(z)=\rho_0$ и (2) в (1) даёт значение вертикального градиента температуры воздуха $T_{\rho=\text{const}}(z)$ при его неизменной плотности

$$\frac{dT_{\rho=\text{const}}(z)}{dz} = \frac{\mu}{R} g. \quad (3)$$

Адиабатический градиент температуры T_{ad} равен [15]

$$\frac{dT_{ad}(z)}{dz} = \frac{\mu}{C_p} g, \quad (4)$$

с учётом формулы Майера $C_p - C_v = R$ и коэффициента адиабаты $k = C_p / C_v$ соотношение (3) и (4) имеет вид

$$\frac{dT_{\rho=\text{const}}(z)}{dz} \bigg/ \frac{dT_{ad}(z)}{dz} = \frac{k}{k-1}, \quad (5)$$

где C_p и C_v – молярные теплоёмкости воздуха при постоянных значениях давления (p) и объёма (v), Дж/(моль·К). Получается, что для воздуха с $k=1,4$ соответствующий одинаковой плотности воздуха градиент температуры в 3,5 раза превышает адиабатический градиент. Таким образом, доказано, что

анализируемые показатели количественно не близки друг к другу и адиабатический градиент является значительно более жёстким ограничением конвективной устойчивости равновесия, чем неизменная плотность воздуха.

В работе [15] проведено теоретическое исследование устойчивости вязкой сжимаемой теплопроводной среды в параметрической плоскости «число Рэлея – заданный вертикальный градиент температуры». Установлено, что ниже некоторого значения градиента неустойчивость не возникает ни при каких числах Рэлея, и эта область параметров названа областью абсолютной конвективной устойчивости. Роль критерия устойчивости в данном случае играет так называемое число Шварцшильда K , представляющее собой отношение адиабатического градиента температуры воздуха к заданному dT/dz , К/м:

$$K = \frac{dT_{ad}}{dz} / \frac{dT}{dz}. \quad (6)$$

Исследование проведено в широкой области параметров с непостоянными по z градиентами с использованием уравнений состояния, как в приближении идеального газа, так и для газа Ван-дер-Ваальса. На основании полученных результатов автор [15] пришёл к выводу, что абсолютная конвективная устойчивость среды в случае постоянства её теплофизических свойств и вертикального температурного градиента характеризуется именно критерием Шварцшильда (6): при $K > 1$ среда устойчива, при $K < 1$ – нет. Справедливость этого вывода сомнений не вызывает, тем более что он совпадает с критерием конвективной устойчивости воздуха в метеорологии. Однако следует учитывать, что потеря устойчивости воздуха в стеснённых условиях не обязательно приводит к возникновению его крупномасштабных вертикальных перемещений, как это происходит в атмосфере над поверхностью. В отличие от свободных конвективных вихрей в атмосфере, для образования узких протяжённых вихрей в шахтном стволе требуется дополнительная энергия на преодоление избыточного трения от стеснения. В противном случае само такое течение будет являться неустойчивым и станет распадаться на множество отдельных вихрей с размерами порядка диаметра ствола. В смысле практической значимости подобный сценарий вторичного движения воздуха после потери устойчивости равновесия ничем не отличается от первоначального равновесия, т. к. в реальности всегда есть мелкомасштабные движения воздуха, вызванные не идеальностью процессов и наличием случайных факторов. Поэтому применительно к шахтным условиям можно сказать с уверенностью, что практический интерес представляют не теоретические показатели

потери конвективной устойчивости равновесия столба воздуха с образованием мелкомасштабных циркуляций воздуха в сечении на разных уровнях, а показатель возникновения протяжённых по глубине ствола конвективных вихрей, которые многократно интенсифицируют перенос воздушных масс, тепла и газов по стволу.

В работе [11] были проведены исследования конвективной устойчивости воздуха в стволах к малым длинноволновым возмущениям в приближении Буссинеска, т. е. в пренебрежении его сжимаемостью под действием собственного веса. Рост именно этих возмущений означает развитие крупномасштабной внутриветровой конвекции, в то время как рост малых возмущений равновесия произвольного вида может вести сначала лишь к возникновению мелкомасштабной конвективной турбулентности среды [19] без возникновения перемещения и перемешивания воздушного потока по всей глубине ствола. Далее сжимаемость воздуха была учтена внесением модельной поправки к коэффициенту объёмного расширения воздуха β , K^{-1} в адиабатическом приближении

$$\beta \rightarrow \beta - \frac{g\mu}{kR\bar{T}(dT_{ad}(z)/dz)},$$

в результате чего зависимость для критического градиента температуры $dT_{cr}(z)/dz$, К/м, приняла вид

$$\frac{dT_{cr}(z)}{dz} = \frac{\pi^4 \eta \chi}{g\beta D^4} + \frac{g\mu}{k\beta R\bar{T}}, \quad (7)$$

где D – поперечный размер ствола, м; $\bar{T}$ – средняя температура воздуха, К; η и χ – кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха, m^2/s . Под η и χ следует понимать коэффициенты, характеризующие турбулентное движение воздуха, поскольку моделируется показатель устойчивости не в отношении возникновения турбулентности, а в отношении последующего перехода мелкомасштабных конвективных вихрей в протяжённое по глубине конвективное движение воздуха.

Подстановка характерных значений параметров ($\eta=0,05 \text{ м}^2/\text{с}$, $\chi=0,08 \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta=3,7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $D=5 \text{ м}$, $\bar{T}=300 \text{ К}$, $\mu=0,029 \text{ кг/моль}$) в выражение (7) даёт величину критического градиента ~ 4 градусов на 100 м глубины. Из соотношений (3)–(5) следует, что показатели, основанные на адиабатическом и плотностном градиентах, дают критические градиенты 1 и 3,5 градуса на 100 м, соответственно. Таким образом, результаты простой аналитической оценки устойчивости воздуха в шахтном стволе к протяжённым по глубине конвективным вихрям указывают в большей степени на плотностной, нежели на адиабатический критерий.

Результаты численного моделирования конвективного движения воздуха в шахтных стволах

Для выяснения того, каким показателем следует руководствоваться при определении устойчивости воздуха в условиях шахтных стволов, в программном комплексе SolidWorks было проведено численное моделирование возникающего конвективного движения воздуха в стволе при разных значениях начального вертикального температурного градиента (рис. 1). Ствол задавался вертикальной цилиндрической полостью в земле глубиной 400 м и диаметром 10 м с твёрдыми адиабатическими границами. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что крупномасштабная конвекция начинается приблизительно с числа $K=0,215$, что почти в 5 раз меньше метеорологического показателя конвективной устойчивости $K=1$ и даже в 1,3 раза меньше показателя устойчивости для несжимаемой среды, соответствующего постоянству по глубине её плотности. Такая высокая конвективная устойчивость воздуха в стволе обусловлена, очевидно, большой разницей между вертикаль-

ми и горизонтальными размерами ствола, что значительно увеличивает потери энергии на трение при образовании протяжённых воздушных вихрей, тем самым отодвигая порог их возникновения.

Чтобы убедиться в справедливости данного вывода, аналогичное моделирование с теми же условиями было проведено для воздушной полости в 10 раз большего диаметра. И действительно, интенсивное конвективное перемешивание начинается уже значительно раньше, со значения числа Шварцшильда всего лишь в 2 раза меньше метеорологического (рис. 2). Характерно то, что конвекция в этом случае возникает при положительном градиенте плотности воздуха с её увеличением с глубиной, в то время как для стеснённых условий ствола это происходит тогда, когда плотность воздуха растёт с высотой. Этот результат подтверждает предположение о большой разнице порогов возникновения конвективной устойчивости воздуха в стеснённых условиях шахтных стволов и в условиях свободной атмосферы.

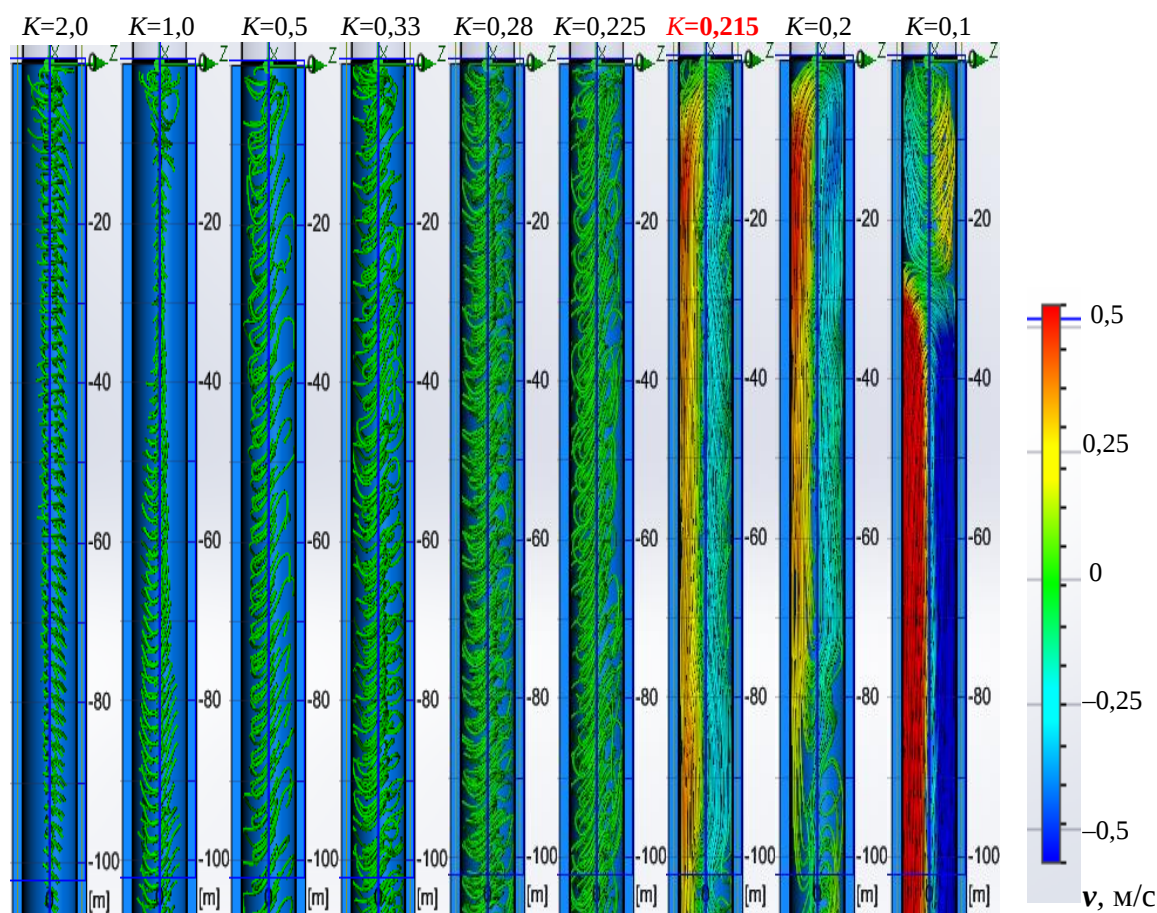


Рис. 1. Траектории конвективного движения воздуха при разных значениях K ($D=10$ м)

Fig. 1. Trajectories of convective air movement at different values of K ($D=10$ m)

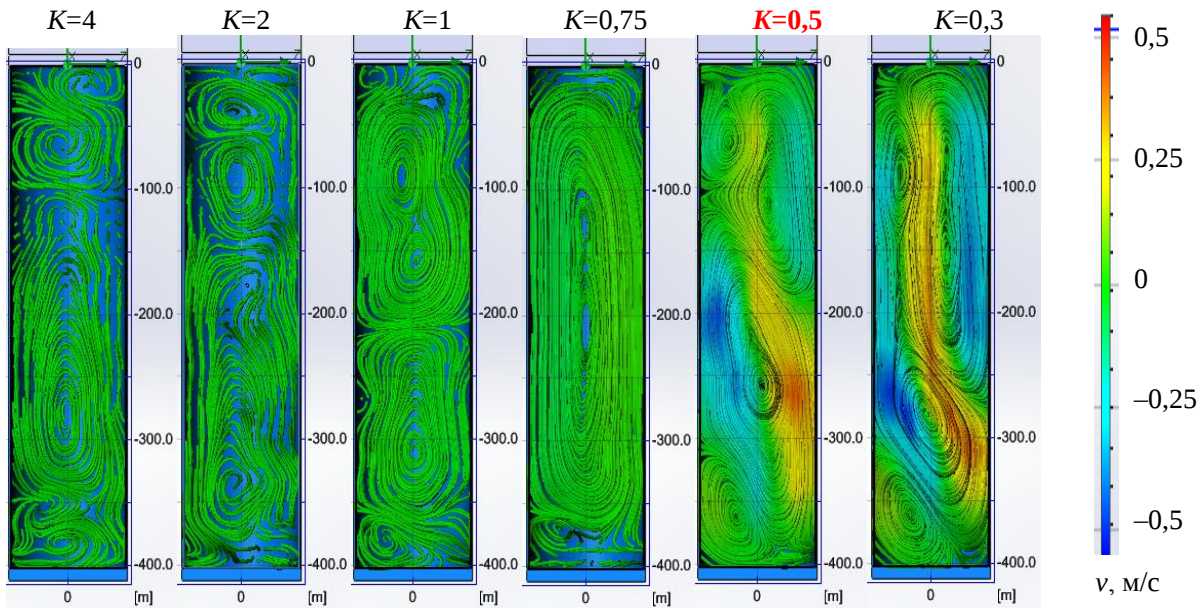


Рис. 2. Траектории конвективного движения воздуха в полости при разных значениях K ($D=100$ м)
Fig. 2. Trajectories of convective air movement in the cavity at different values of K ($D=100$ m)

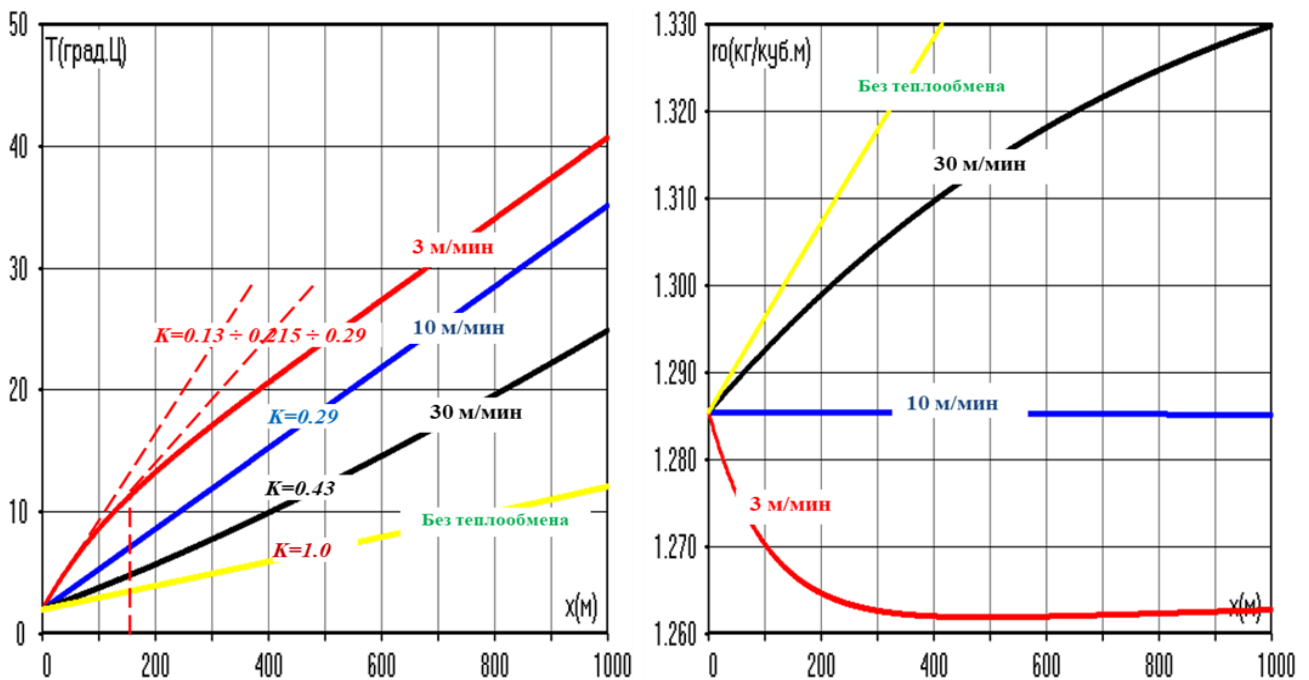


Рис. 3. Расчётные значения температуры и плотности воздуха по глубине воздухоподводящего ствола в зависимости от скорости движения воздуха (начальная температура воздуха $+2^\circ\text{C}$, среднегодовая температура местности $+10^\circ\text{C}$, геотермическая ступень 30 м)
Fig. 3. Calculated values of air temperature and density in the depth of the air supply shaft, depending on air velocity (initial air temperature $+2^\circ\text{C}$, average annual temperature of the area $+10^\circ\text{C}$, geothermal stage 30 m)

Для визуализации полученных результатов был произведён численный расчёт изменения температуры и плотности воздуха при его одномерном движении по стволу за счёт естественной тяги без приближения идеального газа и адиабатичности (рис. 3). Вертикальный градиент температуры воздуха варьи-

ровался скоростью его движения – чем больше скорость, тем короче тепловой контакт воздуха с крепью ствола, и тем меньше он нагревается [20]. Температура крепи ствола задавалась геотермическим градиентом без учёта растепления крепи и окружающего породного массива в процессе эксплуатации рудника,

что соответствует оценке порога наступления конвективной устойчивости по максимуму. Метеорологическому значению критерия устойчивости $K=1$ соответствует график $T(z)$ жёлтого цвета без теплообмена с максимальным градиентом плотности. Чёрным цветом выделен график, при котором плотность воздуха также возрастает с глубиной, но не так сильно, как в отсутствии теплообмена с крепью. Соответствующий постоянной плотности профиль $T(z)$ отмечен на рисунке синим цветом. Распределение температуры воздуха по глубине ствола, выделенное красным цветом, наиболее соответствующее гидродинамическому способу расчёта с учётом сжимаемости, даёт отрицательный градиент плотности до 400-метровой глубины, далее плотность практически постоянна. Таким образом, последний вариант с наименьшей скоростью движения воздуха является наиболее реалистичным применительно к шахтным условиям, т. к. более всего соответствует результатам численного моделирования. Для расчётного набора параметров можно сделать вывод, что градиенты температуры и плотности воздуха непостоянны и уменьшаются с глубиной, интенсивное конвективное перемешивание при $K < 0,215$ возникнет до глубины порядка 150 м, и глубже, при $K > 0,215$, его не будет.

Заключение

По результатам проведённых исследований конвективной устойчивости воздуха в шахтных

стволах в режиме нулевой вентиляции можно сделать следующие выводы:

- принятый в метеорологии критерий оценки конвективной устойчивости воздуха по адиабатическому градиенту температуры применительно к условиям шахтных стволов является чрезмерно жёстким;
- в нулевом режиме вентиляции рудника основным стабилизирующим фактором, препятствующем развитию конвекции в стволах, является вязкость воздуха;
- интенсивное конвективное движение воздуха по всей глубине ствола начинается при вертикальном температурном градиенте ~ 46 °C/km, что почти в 5 раз превышает адиабатический;
- поскольку величина геотермического градиента в поверхностном слое Земли составляет в среднем ~ 30 °C/km, в отсутствие источников выделения тепла или поступления в ствол не подогретого зимнего воздуха интенсивная крупномасштабная конвекция воздуха в стволах возникнуть не будет;
- при значениях числа Шварцшильда больше критического $K=0,215$ тепловое движение воздуха в стволе представляет собой локализованные по глубине вихри малой интенсивности, которые не переносят тепло и газовые примеси в вертикальном направлении и в среднем не отличаются от неподвижного состояния столба воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
2. Казаков Б.П., Шалимов А.В. О возможности проветривания рудника естественной тягой после отключения главной вентиляционной установки // Горный журнал. Известия вузов. – 2013. – № 2. – С. 59–56.
3. McPherson M.J. Subsurface ventilation and environmental engineering. – Berlin: Springer, 1993. – 905 p.
4. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways // Int. J. Min. Geol. Eng. – 1986. – № 4. – Р. 165–196.
5. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, М.А. Семин, Е.Л. Гришин, Н.А. Трушкова // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 105–109.
6. Кобылкин С.С., Хубиева В.М. Учет локальной естественной тяги при обеспечении аэрологической безопасности на горных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 60–65.
7. Оценка параметров пожара в горизонтальной горной выработке на основе аналитического моделирования процесса адвекции тепла / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, Е.Л. Гришин, Д.С. Кормициков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. – С. 179–185.
8. Tien J.C. Practical mine ventilation engineering. – Chicago: Intertec Publ., 1999. – 460 p.
9. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81–85.
10. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions / R. Fair, J.H. Laar, K. Nell, D. Nell, E.H. Mathews // South African Journal of Industrial Engineering November. – 2021. – Vol. 32. – № 3. – Р. 42–51.
11. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Устойчивость конвективного проветривания рудника после отключения вентилятора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 4. – С. 122–130.
12. Lohse D., Xia K.Q. Small-scale properties of turbulent Rayleigh–Bénard convection // Ann. Rev. Fluid Mech. – 2010. – № 42. – Р. 335–364.
13. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 392 с.
14. Динамическая метеорология / под ред. Д.Л. Лайхтмана. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 607 с.
15. Рамазанов М.М. О критериях абсолютной конвективной устойчивости сжимаемой жидкости и газа // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2014. – № 5. – С. 27–37.
16. Salby M.L. Fundamentals of atmospheric physics. – San Diego, United States: Elsevier Science, Academic Press, 1996. – 627 p.

17. Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Pogliani L. On the barometric formula inside the Earth // *J. Math. Chem.* – 2010. – Vol. 47. – P. 990–1004.
18. Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Ч. 1: стационарные решения для температуры // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки.* – 2022. – № 3 (215). – С. 79–90.
19. Falkovich G. *Fluid mechanics: A short course for physicists.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 167 p.
20. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Семин М.А. Моделирование теплообмена между крепью шахтного ствола и проходящим по стволу воздухом в условиях смешанной конвекции // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* – 2021. – № 5. – С. 160–171.

Информация об авторах

Андрей Владимирович Шалимов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. shalimovav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6675-9093>

Денис Сергеевич Кормщиков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. dkormshchikov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0115-3749>

Максим Дмитриевич Попов, инженер, Горный институт УрО РАН, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. maxpan09@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6388-608X>

Поступила в редакцию: 17.05.2024

Поступила после рецензирования: 13.06.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Osipov S.N., Zhadan V.M. *Ventilation of mines in case of underground fires.* Moscow, Nedra Publ., 1973. 152 p. (In Russ.)
2. Kazakov B. P., Shalimov A.V. On possibility of ventilation of the mine by natural draft after disconnecting the main ventilation unit. *Gorny zhurnal. Izvestiya VUZov*, 2013, no. 2, pp. 59–56. (In Russ.)
3. McPherson M.J. *Subsurface ventilation and environmental engineering.* Berlin, Springer, 1993. 905 p.
4. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into undergrounds airways. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 1986, no. 4, pp. 165–196.
5. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Syomin M.A., Grishin E.L., Trushkova N.A. Convective stratification of air flows along the section of mine workings, its role in the formation of fire thermal depressions and its effect on the stability of ventilation. *Gorny zhurnal*, 2014, no. 12, pp. 105–109. (In Russ.)
6. Kobylkin S.S., Khubieva V.M. Consideration of local natural thrust in ensuring aerological safety at mining enterprises. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2021, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)
7. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L., Kormshchikov D.S. Estimation of fire-related parameters in tunnels from analytical modeling of warm advection. *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 1040–1045. (In Russ.)
8. Tien J.C. *Practical mine ventilation engineering.* Chicago, Intertec Publ., 1999. 460 p.
9. Levin L.Yu., Paleev D.Yu., Semin M.A. Calculation of the stability of air flows in the workings of mine ventilation networks by the factor of thermal depression. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*, 2020, no. 1, pp. 81–85. (In Russ.)
10. Fair R., Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E.H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering November*, 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42–51.
11. Kazakov B.P., Shalimov A.V. Stability of convective ventilation after fan switching-off in mines. *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 626–633. (In Russ.)
12. Lohse D., Xia K.Q. Small-scale properties of turbulent Rayleigh–Bénard convection. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 2010, no. 42, pp. 335–364.
13. Gershuni G.Z., Zhuhovickiy E.M. *Convective stability of an incompressible fluid.* Moscow, Nauka Publ., 1972. 392 p. (In Russ.)
14. *Dynamic meteorology.* Ed. by D.L. Laichtman. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 607 p. (In Russ.)
15. Ramazanov M.M. On the criteria of absolute convective stability of a compressible liquid and gas. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2014, no. 5, pp. 27–37. (In Russ.)
16. Salby M.L. *Fundamentals of atmospheric physics.* San Diego, United States: Elsevier Science, Academic Press, 1996. 627 p.
17. Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Pogliani L. On the barometric formula inside the Earth. *J. Math. Chem.*, 2010, vol. 47, pp. 990–1004.
18. Radionov A.A. Mathematical model of the equilibrium of a column of a compressible atmosphere. Part 1: Stationary solutions for temperature. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki*, 2022, no. 3 (215), pp. 79–90. (In Russ.)
19. Falkovich G. *Fluid mechanics, a short course for physicists.* Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 167 p.
20. Kolesov E.V., Kazakov B.P., Semin M.A. Modeling air flow-lining heat transfer in the conditions of mixed convection in a mine shaft. *Journal of Mining Science*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 852–862. (In Russ.)

Information about the authors

Andrey V. Shalimov, Dr. Sc., Leading Researcher, Mining Institute UB RAS, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. shalimovav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6675-9093>

Denis S. Kormshchikov, Cand. Sc., Senior Researcher, Mining Institute UB RAS, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. dkormshchikov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0115-3749>

Maxim D. Popov, Engineer, Mining Institute UB RAS, 78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russian Federation. maxpan09@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6388-608X>

Received: 17.05.2024

Revised: 13.06.2024

Accepted: 19.03.2025

УДК 541.182
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4917
Шифр специальности ВАК: 2.6.6, 2.6.10

Возможности лигносульфонатов для извлечения минералов из природных руд методом флотации

Г.А. Тептерева^{1✉}, А.И. Волошин^{2,3}

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

² ООО РН-БашНИПИнефть, Россия, г. Уфа

³ Уфимский институт химии РАН, Россия, г. Уфа

✉teptereva.tga@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется необходимостью совершенствования существующих флотационных систем для извлечения минералов из состава природных руд импортного производства и поиска возможности полной или частичной замены компонентов флотационных систем на отечественные ресурсные компоненты на основе возобновляемого природного сырья. *Цель:* исследование возможности применения лигносульфонатов различных способов делигнификации в качестве реагентов-собираателей при флотации минералов из природных руд. *Метод:* комплексная оценка экспериментальных и расчетных результатов сравнительных исследований физико-химических характеристик лигносульфонатов различных способов получения. *Результаты и выводы.* Исследованы особенности к пенообразованию для лигносульфонатов и установлено, что пенообразование вызывают сапонины в составе моносахарида L-рамнозы, присутствующего в гемицеллюлозах углеводной части лигносульфонатов сульфитного способа получения и практически отсутствующего в составе углеводной части лигносульфонатов нейтрально-сульфитного способа получения. Получены краевые углы смачивания для лигносульфонатов сульфитного и нейтрально-сульфитного способов делигнификации в системе «твердое тело – жидкость – газ», численные выражения работы адгезии (прилипания) частицы минерала к поверхности пузырька пены. По уравнению Юнга вычислены адгезионные характеристики макромолекул лигносульфонатов и расчетные величины работы адсорбции и адгезии; полная и парциальная величины энергии Гиббса и изменение парциальной энергии Гиббса для компонентов системы «лигносульфонат–вода». Определен интервал изменения химического потенциала и свободной энергии лигносульфонатных систем, форма и геометрические размеры молекул, на основании чего дана положительная оценка возможности использования сульфитных лигносульфонатов для разработки рецептур флотационных систем на горнообогатительных комбинатах России.

Ключевые слова: флотация, реагент-собираатель, лигносульфонаты, работа адсорбции, работа адгезии, краевой угол смачивания

Для цитирования: Тептерева Г.А., Волошин А.И. Возможности лигносульфонатов для извлечения минералов из природных руд методом флотации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 98–106. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4917

UDC 541.182
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4917

Possibilities of lignosulfonates for extraction of minerals from natural ores by flotation

G.A. Teptereva^{1✉}, A.I. Voloshin^{2,3}

¹ Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

² LLC RN-BashNIPIneft, Ufa, Russian Federation 2LLC RN-BashNIPIneft, Ufa, Russian Federation

³ Ufa Institute of Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

✉teptereva.tga@yandex.ru

Abstract. Relevance. The need to improve existing flotation systems for the extraction of minerals from natural ores of imported production and the search for the possibility of complete or partial replacement of components of flotation systems with domestic resource components based on renewable natural raw materials. **Aim.** To study the possibility of using lignosulfonates of various delignification methods as collecting reagents in the flotation of minerals from natural ores. **Method.** Comprehensive assessment of experimental and calculated results of comparative studies of the physico-chemical characteristics of lignosulfonates of various production methods. **Results and conclusions.** The authors have investigated the features of the foaming ability for lignosulfonates and found out that foaming is caused by saponins in the composition of L-rhamnose monosaccharide, present in hemicelluloses of the carbohydrate part of the lignosulfonates of the sulfite preparation method and practically absent in the carbohydrate part of the lignosulfonates of the neutral sulfite preparation method. The authors obtained the wetting edge angles for lignosulfonates of sulfite and neutral sulfite delignification methods in the solid-liquid-gas system, and numerical expressions of a mineral particle adhesion to a foam bubble surface. They calculated the adhesion characteristics of lignosulfonate macromolecules and adsorption and adhesion work values using the Young equation; the total and partial values of Gibbs energy and the change in Gibbs partial energy for the components of the lignosulfonate-water system. The authors determined the range of changes in the chemical potential and free energy of lignosulfonate systems, the shape and geometric dimensions of molecules. Based on this information the paper introduces the positive assessment of the possibility of using sulfite lignosulfonates to develop formulations of flotation systems at mining and processing plants in Russia.

Keywords: flotation, reagent collector, lignosulfonates, adsorption work, adhesion work, wetting edge angle

For citation: Tepтерева Г.А., Волошин А.И. Possibilities of lignosulfonates for extraction of minerals from natural ores by flotation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 98–106. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4917

Введение

Флотация в общем случае основана на избирательном прилипании пузырька пены к поверхности минерала. Минерал, являясь гидрофобным участником процесса флотации, обволакивается пленкой анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ), при этом гидратная оболочка между частицей и пузырьком флотоагента (например, для лигносульфоната – ЛСТ) разрывается и этим обеспечивается непосредственный контакт частицы минерала с поверхностью пузырька и последующее закрепление частицы на этой поверхности. Следствием закрепления является многократное увеличение эффективности и скорости процесса флотации [1, 2]. Поэтому важным является упрочнение контакта «пузырек–частица» в турбулентных условиях флотации, для чего необходимо определение характеристик релаксационных свойств пленки ЛСТ, которая не только обволакивает частицу, но и частично сорбируется на поверхности пузырька [3–5]. По сути, это является работой адсорбции (А) и может выражаться через величину энергии Гиббса ($-\Delta G$, Дж/моль) как функция сил отрыва пузырька от частиц разной крупности и плотности [4–7]. В работе в качестве твердого тела использовались образцы медьсодержащих минералов природных руд одного из горнообогатительных комбинатов РФ.

Объекты и методы исследования

Объекты:

- лигносульфонаты сульфитного и нейтрально-сульфитного способов лигносульфонаты сульфитного и нейтрально-сульфитного способов химической переработки древесины (делигни-

фикации) делигнификации различных способов;

- модифицированные формы лигносульфонатов (феррохромлигносульфонаты – ФХЛСи ФХЛС-2М).

Методы:

- прибор Майлса-Росса ГОСТ 22567.1-77 для определения пенообразующей способности пенообразующей способности лигносульфонатов как анионных поверхностно-активных веществ
- тонкослойная хроматография для определения компонентного состава углеводной части лигносульфонатов;
- метод «лежащей капли» для определения величин краевых углов смачивания.

Экспериментальная часть

Сравнительная характеристика вспенивающей способности лигносульфонатов и их модифицированных форм (ФХЛС и ФХЛС-2М) получена на приборе Майлса-Росса и графически отражена на рис. 1.

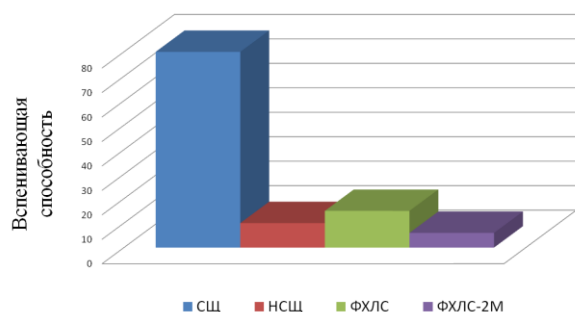
Видно, что лигносульфонат сульфитного способа получения обладает наиболее высокой пенообразующей способностью, по сравнению с другими тестируемыми образцами.

Численно, в объемных величинах (см^3), способность к пенообразованию подтверждена данными табл. 1.

Для успешного решения вопросов флотации требуется невысокая устойчивость пены (15–20 мин), что позволяет избежать ряда технологических трудностей при выделении требуемого минерала методом флотации. Для сульфитного лигносульфоната характера оптимальная величина

устойчивости пены и размера пузырьков (высоко-диспергированные, мелкие).

Способность к образованию пены обусловлена для лигносульфонатов составом их углеводной части, определенным ранее методом тонкослойной хроматографии [8–14] (табл. 2).



Видно, что в составе гемицеллюлоз углеводной части НЛСТ содержание L-рамнозы (компонента сапонинов, от лат «sapo» – мыло)ратно меньше по сравнению с составом гемицеллюлоз углеводной части сульфитных (кислых) лигносульфонатов (рис. 2).

Рис. 1. Сравнительная характеристика вспенивающей способности сульфитного щелока (СЩ) и нейтрально-сульфитного щелока (НСЩ) лигно-сульфонатов, их модифицированных форм – феррохромлигносульфонатов (ФХЛС, ФХЛС-2М)

Fig. 1. Comparative characteristics of the foaming ability of sulfite liquor (SSH) and neutral sulfite liquor (HCL) of lignosulfonates, their modified forms – ferrochromolignosulfonates (PHLS, PHLS-2M)

Таблица 1. Численные результаты определения вспенивающей способности лигносульфонатов и их модифицирующих форм

Table 1. Results of determining the foaming ability of lignosulfonates and their modifying forms

Тип исходного лигносульфоната модифицированной формы Type of initial lignosulfonate/modified form	Объем образующейся пены, см ³ Formed foam volume, cm ³	Параметры высоты (см) и устойчивости (мин) пены Parameters of foam height (cm) and stability (min)
Сульфитный лигносульфонат (ЛСТ) Sulfite Lignosulfonate (LST)	280–200	80/10,3
Нейтрально-сульфитный лигносульфонат (НЛСТ) Neutral Sulfite Lignosulfonate (NLST)	210–200	10/0,7
Феррохромлигносульфонат на основе ЛСТ Ferrochromolignosulfonate based on LST	380–200	180/10,7
Феррохромлигносульфонат на основе НЛСТ Ferrochromolignosulfonate based on NLST	215–200	15/17,2

Таблица 2. Количественный и компонентный состав моносахаридов углеводной части лигносульфонатов

Table 2. Quantitative and component composition of monosaccharides of the carbohydrate part of lignosulfonates

Моносахариды Monosaccharides	Кислая сульфитная варка Acid sulfite cooking		Сульфитная (бисульфитная) варка лиственных Sulfite (bisulfite) cooking of deciduous	Нейтрально-сульфитная (моносультитная) варка хвойных Neutral sulfite (monosulfite) cooking of conifers
	хвойных coniferous	лиственных deciduous		
Манноза/Mannose	48	3	50	2
Ксилоза/Xylose	22	80	19	82
Галактоза/Galactose	10	2	11	5
Глюкоза/Glucose	9	10	15	4
Арабиноза/Pectine sugar	6	3	3	5
Рамноза/Rhamnose	5	2	12	2

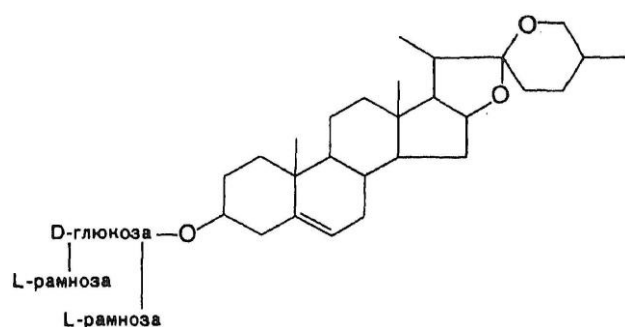


Рис. 2. Фрагмент молекулы сапонины

Fig. 2. Fragment of a saponin molecule

Наличие значительного содержания L-рамнозы (табл. 2) обеспечивает образование пены и возможность флотации, механизм которой заключается в прилипании пузырька пены к частице минерала.

Экспериментальное определение краевого угла смачивания (θ) проводилось по известному методу «лежачей капли», в ходе которого нами была усовершенствована методика применения программы «КОМПАС-3D» и найдено, что с ростом концентрации опстворов (0,1–0,25 %), численные значения краевого угла (θ) увеличиваются для нейтрального и сульфитного лигносульфонатов ($\theta=75–80^\circ$) соответственно [15–25].

Обсуждение результатов

НЛСТ весьма незначительно сорбируются на поверхности частицы по причине специфических особенностей молекул НЛСТ: геометрии макромолекулы, имеющей, в отличие от сульфитных ЛСТ, малую молекулярную массу (4000–7000 г/моль), линейную форму макромолекулы, вертикальную посадку молекулы на поверхности адсорбционного слоя [4, 7]. Принципиальным отличием лигносульфонатов сульфитной (кислой) варки является молекулярная масса 45000–75000 г/моль, что на порядок больше массы лигносульфонатов нейтрально-сульфитной варки, которые получают из листовного (березового) сырья. Сульфитные ЛСТ получают из древесины хвойных пород, и макромолекулы имеют глобулярную форму. В этой связи адсорбционные процессы идут по-разному. В частности, для лигносульфонатов сульфитных характерно наличие «кажущейся» адсорбции, поскольку приоритетным является адсорбция смолистых веществ, образуемых в значительно больших количествах, чем при короткой (35–40 мин) нейтрально-сульфитной варке древесины. Поэтому для разных лигносульфонатов понятия «предельной» и «кажущейся» адсорбции дифференцированы [4, 6, 18, 19]. Модифицированные формы, получаемые на основе разных ЛСТ, также имеют различные ад-

сорбционные характеристики и геометрию макромолекул (табл. 3).

Видно, что изменение химического потенциала как парциальная мольная энергия Гиббса (при p , $T=\text{const}$) не зависит от молекулярной массы системы и находится для всех форм лигносульфонатных систем в одинаковых пределах (1652–708 Дж/моль).

Таким образом, чем больше величина энергии Гиббса, тем сильнее закреплена частица минерала на поверхности пузырька и тем эффективнее флотация минерала.

Гиббсовская адсорбция в физическом смысле характеризует активность компонента в зависимости от его мольной доли в растворе. Важным является и установление связи между величиной удельной адсорбции Γ_i и равновесной активностью компонента (лигносульфоната) в растворе, поскольку указанные понятия непосредственно связаны с понятием химического потенциала μ_i [4, 8–13, 25, 26].

Математически величину активности и молярную долю лигносульфоната в растворе можно выразить через величину химического потенциала μ_i как сумму стандартного химического потенциала μ_0 и логарифмической функции, связанной с молярной долей (x_i) и коэффициентом активности (f_i) лигносульфоната в водном растворе:

$$\mu_i = \mu_0 + R \cdot T \cdot \ln f_i x_i.$$

Таблица 3. Расчетные величины адсорбционных характеристик лигносульфонатов различных способов получения и их модифицированных форм

Table 3. Calculated values of the adsorption characteristics of lignosulfonates of various production methods and their modified forms

Расчетные величины Calculated values	Нейтрально-сульфитный ЛСТ Neutral sulfite LST	Сульфитный ЛСТ Sulfite LST	ФХЛС на основе сульфитного ЛСТ FHLS based on sulfite LST	ФХЛС-2М на основе НЛСТ FHLS-2M based on NLST
Гиббсовская адсорбция $G_{\infty} \cdot 10^{-6}$, моль/м ² Gibbs adsorption $G_{\infty} \cdot 10^{-6}$, mol/m ²	0,72–1,44	1,2–4,97	0,73–2,89	0,93–7,61
Предельная адсорбция A, мг/1 г тв. фазы Adsorption limit A, mg/1 g tv. phases	0,15	0,40	0,6	0,35
Площадь молекулы $S_0 \cdot 10^{-19}$, м ² Molecule area $S_0 \cdot 10^{-19}$, m ²	11,5	3,3	5,7	2,18
Молярная масса M, г/моль Molar mass M, g/mol	4300–6000	45000–75000	60300–82500	5800–6200
Высота мономолекулярного слоя $\delta = (G_{\infty} \cdot M) / \rho$, 10^{-6} м Monomolecular layer height $\delta = (G_{\infty} \cdot M) / \rho$, 10^{-6} m	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$165 \cdot 10^{-3}$	$198 \cdot 10^{-3}$	$39 \cdot 10^{-3}$
Константа адсорбционного равновесия $K_a = (A \cdot G_{\infty}) / \delta$ Adsorption equilibrium constant $K_a = (A \cdot G_{\infty}) / \delta$	45	12	8,75	68,3
$K_a = f_i x_i / f_{i1}$	45	12	8,75	68,3
Работа адсорбции $W = RT \ln K_a$, Дж/моль Adsorption operation $W = RT \ln K_a$, J/mol	9416	6144	5365	10447
Энергия Гиббса $\Delta F = -\Delta G = RT \ln K_a$, Дж/моль Gibbs Energy $\Delta F = -\Delta G = RT \ln K_a$, J/mol	–9416	–6144	–5365	–10447
Химический потенциал μ , Дж/моль Chemical potential μ , J/mol	1652–708	1659–708	1644–703	1656–708

Если принять, что $f_i x_i \rightarrow 1$, то величина химического потенциала μ_i будет стремиться к его стандартному значению μ_0 .

Если в двухкомпонентной системе «лигносульфонат–вода» избыток первого компонента близок к нулю, им можно пренебречь, и тогда

$$d\sigma = -\Gamma d\mu_0 \text{ или } -\Gamma \cdot R \cdot T \cdot \ln f_i x_i.$$

Исходя из этих данных, становится обоснованным при определении гиббсовской адсорбции применение уравнения Гиббса для каждого i -го компонента системы:

$$\Gamma_i = (d\sigma/df_i x_i) \cdot (f_i x_p / RT) \text{ или } \Gamma_i = d\sigma/d \ln f_i x_i \cdot 1/R \cdot T,$$

где Γ_i – гиббсовская (избыточная) удельная адсорбция i -го компонента, или разность между числом молей компонента в объеме и молей, адсорбированных на поверхности.

Склонность макромолекул лигносульфоната к образованию ассоциатов с водой наиболее выражена для высокомолекулярных ЛСТ, имеющих pH 4–5 и получаемых сульфитным способом варки. Низкомолекулярные лигносульфонаты в большей степени подвержены гидролизу. Особенностью лигносульфонатных систем является высокая доля ионизации, поскольку речь идет о натриевой соли лигносульфоновой кислоты (значительно реже используется аммонийное основание или кальциевое). Согласно теории Флори–Штокмайера взаимодействие функциональных групп соседних макромолекул не запрещено, но в высокомолекулярных формах возможно образование внутри- и межмолекулярных ассоциатов. При этом активные центры функциональных групп будут локализованы во внутренней структуре ассоциированных лигносульфонатов. Такая структура придает им повышенную устойчивость. Одновременно эта же способность к образованию ассоциатов усиливает коллоидные свойства растворов.

Полярность молекул воды и наличие в них частично нескомпенсированных зарядов приводит к группировке молекул в укрупненные сообщества – ассоциаты $(H_2O)_n$ (рис. 3).

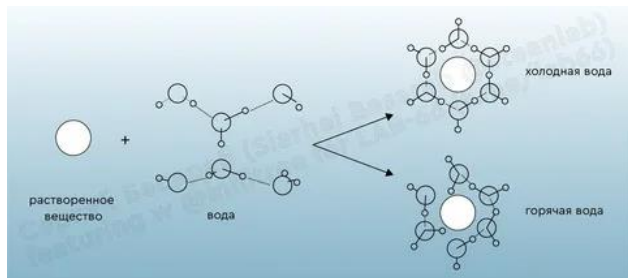


Рис. 3. Условная схема образования ассоциатов вещества с водой

Fig. 3. Conditional scheme of formation of associates of a substance with water

Способность высокомолекулярных разновидностей лигносульфонатов образовывать, особенно в кислых средах, макромолекулярные структуры с локализацией функциональных групп ограничивает одновременно и подвижность, и миграцию ассоциатов в объемной фазе, усиливая их лиофобность и поверхностную активность в растворах (рис. 4).

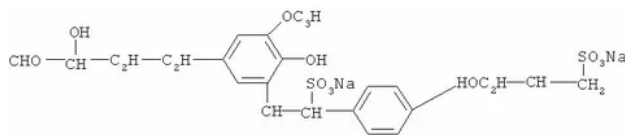


Рис. 4. Фрагмент макромолекулы лигносульфоната натрия

Fig. 4. Fragment of a sodium lignosulfonate macromolecule

В непосредственной близости от активных центров матрицы лигносульфоната оси полярных молекул воды ориентируются перпендикулярно к поверхности активных центров (связанная вода), и по мере их заполнения структура связанной воды будет приближаться к структуре свободной воды. При этом энергетическое поле активных центров ослабевает, а близлежащие молекулы воздействуют на них все больше. Физические свойства воды выравниваются. И в паре «лигносульфонат–вода» ионы ЛСТ способны вытеснять ассоциаты воды.

В случае взаимодействия отдельных функциональных групп лигносульфоната с молекулами воды возможно возникновение ион-дипольного взаимодействия, что становится источником дополнительного уменьшения свободной энергии и стабилизации системы $(-\Delta F_{\text{ЛСТ}}) > (-\Delta F_{\text{воды}})$.

Поскольку при равновесии химические потенциалы свободного компонента системы равны, изменение свободной энергии

$$\Delta F = -\Delta \mu_i^0 = RT \ln f_i x_i / f_i y_i = RT \ln K_{ai} = \text{const}_i,$$

где K_{ai} – константа адсорбционного равновесия для каждого компонента i .

Интересно, что $K_a = f_i x_i / f_i y_i$, следовательно, одновременно $K_a = A \cdot \Gamma / \delta$.

Тогда по методу Гиббса можно считать, что

$$\Delta F = -\Delta G = -\Delta \mu_i^0.$$

Расчеты свободной энергии позволяют получить численные значения и этим предположить численную величину изменения химического потенциала μ_i .

Однако фундаментальное уравнение изотермы адсорбции Гиббса можно применить только при наличии сведений о величине поверхностного натяжения, чем возможно связать через уравнение Гиббса понятия химического потенциала (μ_i) и поверхностной активности (σ) лигносульфонатов,

количественно измерив величины поверхностного натяжения водных растворов лигносульфонатов различными способами варки (делигнификации) [4, 6].

Все вышесказанное коррелирует с характером работы лигносульфонатных систем, особенно нейтральных лигносульфонатных, где небольшая длина молекул соизмерима с полостями клатратных структур воды и снижает влияние спиртовой гидроксильной группы в составе пропановой цепочки фенилпропановой единицы (мономерного звена лигносульфоната) на растворимость. Адсорбция лигносульфоната из водной среды будет избирательной, если $(-\Delta F_{\text{лст}}) > (-\Delta F_{\text{воды}})$. Литературные источники дают величину ΔF воды в пределах $1,96 \pm 2,3$ кДж/моль. Это позволяет, по данным табл. 2, с уверенностью считать, что предпочтительной будет адсорбция ЛСТ [9–16, 26].

Именно энергия растворителя – жидкой воды – определяет структуру ее ассоциатов и их изменение под воздействием растворенных в ней лигносульфонатов. Если, согласно правилу Траубе, в гомологическом ряду органических веществ величина произведения коэффициента распределения (K) вещества между раствором и твердым сорбентом на растворимость вещества C_S есть величина постоянная ($K C_S = \text{const}$), то для лигносульфонатов это правило нарушается. Наиболее видимыми причинами является влияние лигносульфонатов на структуру ассоциатов воды, их переориентацию. Оказывается активное влияние на энергию связи компонентов раствора, что и отражается на равновесном распределении лигносульфоната между твердой фазой и водой не только при концентрациях, близких к растворимости лигносульфонатов, но и в очень разбавленных растворах, когда $C/C_S \ll 1$. При физической молекулярной адсорбции действуют, как известно, вандерваальсовы силы, а взаимодействие функциональных групп молекул лигносульфоната, согласно теории Флори–Штокмайера, осуществляется только с функциональными группами ближайших молекул. Поэтому энергия молекулы, адсорбированной на поверхности раздела, представляет собой сумму энергии взаимодействия молекулы лигносульфоната с окружающими ее молекулами воды, а также энергии ее взаимодействия с поверхностью твердой фазы [16–24].

На поверхности раздела (границе раздела) «твердая фаза – водный раствор лигносульфоната» происходит удерживание молекул обоих компонентов: как воды, так и самого лигносульфоната, при этом важно, что оба компонента имеют различную поверхностную энергию. Это результат различной интенсивности взаимодействия молекул воды и молекул лигносульфоната с поверхностью адсорбента – твердой фазой.

Другой аспект при использовании метода Гиббса для конкретных числовых расчетов величин адсорбции сопряжен с обоснованием выбора разделяющей поверхности, основанием для чего должны быть данные о толщине и структуре мономолекулярных адсорбционных слоев. Важно, чтобы разделяющая поверхность проходила на расстоянии одного вандерваальсового пробега молекулы органического вещества (в данном исследовании – лигносульфоната). ЛСТ сульфитного способа получения обладают достаточно высокой пенообразующей способностью, что подтверждено экспериментальными результатами

Образование пены и ее устойчивость во времени является необходимым условием процесса флотации, поскольку пузырьки пены способны при всплытии уносить с собой частицы минерала и оставлять пустую породу под слоем воды. При этом устойчивость пены должна иметь оптимальные критерии по времени «жизни» пузырьков. Если пена будет слишком устойчивая, возникают существенные технологические трудности при выделении концентрата.

Действующей силой процесса является выигрыш энергии, который может быть оценен как работа адгезии, или прилипания

$$W_{\text{пр (адг)}} = (\sigma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}} - \sigma_{\text{тг}}) \Delta S,$$

где $\sigma_{\text{тж}}$ – поверхностное натяжение на границе «твердое–жидкость»; $\sigma_{\text{жг}}$ – поверхностное натяжение на границе «жидкость–газ»; $\sigma_{\text{тг}}$ – поверхностное натяжение на границе «твердое–газ»; ΔS – площадь поверхности соприкосновения пузырька с твердой частицей, что может быть определено опосредованно через величину поверхностного натяжения на границе «жидкость–газ» ($\sigma_{\text{жг}}$) и угол смачивания θ по уравнению Юнга

$$\sigma_{\text{тг}} - \sigma_{\text{тж}} = \sigma_{\text{жг}} \cos \theta.$$

Тогда энергия, необходимая для закрепления частицы на поверхности пузырька, $W_{\text{пр}} = \sigma_{\text{жг}} (1 - \cos \theta) \Delta S$.

С учетом условия, что флотация возможна только в том случае, если $\cos \theta = 0$, а сам угол смачивания $\theta = 90^\circ$, обоснована возможность использования лигносульфонатов в качестве эффективного и недорогого компонента флотосистемы для выделения минералов гидрофобной природы.

Однако более строгим критерием смачивающей способности ПАВ является энергия взаимодействия ПАВ с поверхностью породы, определяемая как работа адгезии за счет уменьшения поверхности раздела фаз ΔS и за счет уменьшения поверхностного натяжения σ .

Тогда при величинах краевого угла смачивания $\theta = 75\text{--}80^\circ$

$$W_{\text{адг}} = \sigma_{\text{жг}} (1 - \cos \theta) \Delta S$$

- для НЛСТ

$$W_{\text{ад}} = (1 - \cos \theta) \cdot \Delta S = \\ = (1 - 0,2588) \cdot 11,5 \cdot 10^{-19} \cdot 6,2 \cdot 10^{23} = \\ = 528460 \text{ Дж/моль} = 53 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль} = 530 \text{ кДж/моль},$$

- для ЛСТ

$$W_{\text{ад}} = (1 - \cos \theta) \cdot \Delta S = \\ = (1 - 0,1736) \cdot 3,3 \cdot 10^{-19} \cdot 6,2 \cdot 10^{23} = \\ = 169081 \text{ Дж/моль} = 17 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль} = 170 \text{ кДж/моль}.$$

Расчетным путем установлены численные величины работы адсорбции (табл. 2) и адгезии как движущих сил процесса флотации минералов и обоснована возможность применения лигносульфонатных систем в решении вопросов флотации медьсодержащих минералов из состава природных руд.

Таким образом, исследованы адсорбционная и адгезионная способности лигносульфонатов и выявлена приоритетность использования сульфитных лигносульфонатов в качестве эффективного компонента в рецептуре новой флотосистемы.

Выводы

Показаны численные величины количества пены, обосновано наличие вспенивающей способности для сульфитных лигносульфонатов на основании исследований компонентного состава гемицеллюлоз углеводной части, содержащих моносахарид L-рамнозу (компонент сапонинов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 510 с.
2. Абрамзон А.А. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества: справ. / под общ. ред. А.А. Абрамзона, Е.Д. Щукина. – Л.: Химия, 1984. – 392 с.
3. Формирование и разрушение пен при флотации фосфоритовых руд / Ф.Ф. Можейко, И.И. Гончарик, Т.Н. Поткина, А.И. Войтенко, В.В. Шевчук // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2023. – Т. 59. – № 4. – С. 81–86.
4. Тептерева Г.А. Становление и развитие производства и применения лигносульфонатов и их модифицированных производных. – Уфа: УНПЦ «Изд-во УГНТУ», 2023. – 276 с.
5. Ресурсный потенциал шламов горнообогатительных комбинатов России и перспективы их применения в нефтепромысловой химии / Г.А. Тептерева, Л.З. Рольник, И.А. Бахтигареев, И.Ш. Ишкарин // Нефтегазохимия. – 2023. – № 1. – С. 40–44.
6. Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения / Г.А. Тептерева, С.И. Пахомов, И.А. Четвертнева, Э.Х. Каримов, М.П. Егоров, Э.М. Мовсумзаде, Э.И. Евстигнеев, А.В. Васильев, М.В. Севастьянова, А.И. Волошин, Н.Э. Нифантьев, В.В. Носов, В.А. Докичев, Э.Р. Бабаев, С.З. Роговина, А.А. Берлин, А.В. Фахреева, О.А. Баулин, Г.Ю. Колчина, М.С. Воронов // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64. – № 9. – С. 5–122.
7. Болатбаев К.Н., Луговницкая Т.Н., Колосов А.В. Идентификация и физикомеханические свойства лигносульфонатов в растворах // Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 308–312.
8. Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Кузяков Н.Ю. Получение и применение комплексов лигносульфоновых кислот с катионами железа // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 5. – С. 167–187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167
9. Боголицин К.Г. Физико-химические методы анализа. Ч. 2. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – 228 с.
10. Дифференцированное определение констант кислотности структурных фрагментов лигнина / К.Г. Боголицин, Д.С. Косяков, Н.С. Горбова, С.С. Хвиюзов // Химия растительного сырья. – 2007. – № 4. – С. 45–52.
11. Lauten R.A., Myrvold B.O., Gundersen S.A. Developments in the commercial utilization of lignosulfonates. *Surfactants renew* // Resource New. – 2010. – № 3. – P. 269–283. DOI: 10.1002/9780470686607.ch14
12. Xu C., Ferdosian F. Utilization of lignosulfonate as dispersants or surfactants. Ch. 5 // *Conversion of Lignin into Bio-Based Chemicals and Materials*. – 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-54959-9_5.

Получены значения краевых углов смачивания в системе «минерал–жидкость–газ»: для нейтрально-го лигносульфоната $\theta=75^\circ$; для сульфитного лигно-сульфоната $\theta=80^\circ$, что позволило обосновать воз-можность применения лигносульфонатов как ком-понентов флотационной системы.

Рассчитаны численные характеристики работы адгезии ($W_{\text{адг}}$) (прилипания) частицы минерала к поверхности пузырька пены и работы адсорбции ($W_{\text{адс}}$), установлено кратное превышении величины работы адсорбции по отношению к работе адгезии, что позволило обосновать приоритетность процес-сов на границе «гидратная оболочка – частица ми-нерала – стенка пузырька пены», необходимых для разрыва гидратной оболочки и осуществления ад-гезии частицы минерала на поверхности пузырька пены.

Рассчитаны величины парциальной мольной энергии Гиббса как пределы (1652–708 Дж/моль) изменения химического потенциала (μ_i) лигно-сульфонатных систем, что позволило установить отсутствие зависимости химического потенциала от молярной массы лигносульфоната при опреде-лении его концентрации в составе флотосистем.

Установлено, что лигносульфонаты сульфитно-го способа получения способны выполнять функ-ции агента-пенообразователя и одновременно функцию транспорта частиц минерала из рабочей зоны флотации.

13. Pita F., Castilho A.M. Plastics floatability: effect of saponin and sodium lignosulfonate as wetting agents // *Polimeros*. – 2019. – Vol. 29. – № 3. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.01419>.
14. В-О-4'-димеризации кониферилового спирта: ab initio изучение / В.Е. Петренко, Т.В. Богдан, Е.Г. Одинцова, М.Л. Антипова, В.И. Богдан // *Журнал физической химии*. – 2022. – Т. 96. – № 3. – С. 458–462.
15. Конькова Т.В., Рысева А.П., Малькова Ю.О. Кинетика и механизм адсорбции анионных красителей на монтмориллоните, модифицированном метасиликатом натрия // *Журнал физической химии*. – 2021. – Т. 95. – № 1. DOI: 10.31857/S004445372101012X
16. Weigend F., Ahlrichs R. Balanced basis sets of split valence, triple zeta valence and quadruple zeta valence quality for H to Rn: design and assessment of accuracy // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2005. – Vol. 7. – P. 3297. DOI: <https://doi.org/10.1039/b508541a>
17. Модификация технических лигнинов карбоновыми кислотами / Д.Д. Ефрюшин, В.В. Коншин, А.В. Протопопов, А.А. Беушев // *Химия природных соединений*. – 2015. – Т. 51. – № 5. – P. 1007–1018.
18. Inverse vulcanization of elemental sulfur and styrene for polymeric cathodes in Li-S batteries / Y. Zhang, J.J. Griebel, P.T. Dirlam, N.A. Nguyen, R.S. Glass, M.E. Mackay, K. Char, J. Pyun // *Journal of polymer science. P. A. Polymer chemistry*. – 2017. – Vol. 55. – № 1. – P. 107–116. DOI: 10.1002/pola.28266.
19. Углеводы – новый класс «зеленых» ингибиторов солеотложений / В.А. Докичев, Е.И. Коптяева, Ф.Г. Ишмуратов, С.Р. Алимбекова, Ю.В. Томилов, Н.Э. Нифантьев // *Нефтяное хозяйство*. – 2016. – № 5. – С. 92–94.
20. Холматова Ю.Ш., Шайхлисламова Г.Н., Каратаев О.Р. Методы использования флотационной очистки и флотореагенты // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. – 2021. – Т. 39. – С. 1636–1640. URL: <http://e-koncept.ru/2017/970654.htm> (дата обращения 15.01.2025).
21. Усовершенствование методики определения краевого угла смачивания с использованием возможностей программы «КОМПАС» / Г.А. Тептерева, С.Ю. Шавшукова, В.Г. Конесев и др. // *Башкирский химический журнал*. – 2018. – Т. 25. – № 1. – С. 77–82.
22. Ruwoldt J. A Critical review of the physicochemical properties of lignosulfonates: chemical structure and behavior in aqueous solution, at surfaces and interfaces // *Surfaces*. – 2020. – Vol. 3. – P. 622–648. DOI: <https://doi.org/10.3390/surfaces3040042>.
23. Effects of pH on aggregation behavior of sodiumlignosulfonate (NaLS) in concentrated solutions / Q. Tang, M. Zhou, D. Yang, X. Qiu // *Journal of Polymer Research*. – 2015. – Vol. 22. – № 4. – 50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10965-015-0689-3>.
24. Güçlü-Üstündağ Ö., Mazza G. Saponins: properties, applications and processing // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2007. – Vol. 47. – P. 231–258. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>.
25. Ge Y., Li D., Li Z. Effects of lignosulfonate structure on the surface activity and wettability to a hydrophobic powder // *BioResources*. – 2014. – Vol. 9. – № 4. – P. 7119–7127. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7119-7127>.
26. Yu L., Yu P., Bai S. A critical review on the flotation reagents for phosphate ore beneficiation // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14. – № 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14080828>

Информация об авторах

Галина Алексеевна Тептерева, доктор технических наук, профессор кафедры общей, аналитической и прикладной химии Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. teptereva.tga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2328-6761>

Александр Иосифович Волошин, доктор химических наук, старший эксперт ООО «РН-БашНИПИнефть», Россия, 450006, г. Уфа, ул. Ленина, 86, корп. 1; старший научный сотрудник лаборатории биоорганической химии и катализа, Уфимский институт химии РАН, Россия, 450054, г. Уфа, пр. Октября, 71. voloshina3@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2717-5930>

Поступила в редакцию: 02.12.2024

Поступила после рецензирования: 16.12.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Abramov A.A. *Processing, enrichment and integrated use of solid minerals*. Moscow, Moscow State University Publ. house, 2004. 510 p. (In Russ.)
2. Abramzon A.A. *Surface phenomena and surfactants*. Eds. A.A. Abramzon, E.D. Shchukin. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 392 p. (In Russ.)
3. Mozheyko F.F., Goncharik I.I., Potkina T.N., Voitenko A.I., Shevchuk V.V. Formation and destruction of foams during flotation of phosphorite ores. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. A series of chemical sciences*, 2023, vol. 59, no. 4, pp. 81–86. (In Russ.)
4. Teptereva G.A. *Formation and development of production and application of lignosulfonates and their modified derivatives*. Ufa, UNPC Publ. House, 2023. 276 p. (In Russ.)
5. Teptereva G.A., Rolnik L.Z., Bakhtigareev I.A., Ishkarin I.S. Resource potential of sludge from mining and processing plants in Russia and prospects for their application in oilfield chemistry. *Petrochemistry*, 2023, no. 1, pp. 40–44. (In Russ.)
6. Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.Kh., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantiev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhrueva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S. Renewable natural raw materials, structure, properties, application prospects. *News of higher educational institutions. Series: chemistry and chemical technology*, 2021, vol. 64, no. 9, pp. 5–122. (In Russ.)

7. Bolatbaev K.N., Lugovitskaya T.N., Kolosov A.V. Identification and physico-mechanical properties of lignosulfonates in solutions. *Polzunovsky vestnik*, 2009, no. 3, pp. 308–312. (In Russ.)
8. Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Kuzyakov N.Yu. Preparation and application of complexes of lignosulfonic acids with iron cations. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2019, no. 5, pp. 167–187. (In Russ.) DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.167
9. Bogolitsyn K.G. *Physico-chemical methods of analysis*. P. 2. Arkhangel'sk, AGTU Publ. house, 2003. 228 p. (In Russ.)
10. Bogolitsyn K.G., Kosyakov D.S., Gorbova N.S., Khviyuzov S.S. Differentiated determination of the acidity constants of lignin structural fragments. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2007, no. 4, pp. 45–52. (In Russ.)
11. Lauten R.A., Myrvold B.O., Gundersen S.A. Developments in the Commercial Utilization of Lignosulfonates. *Surfactants Renew. Resource New*, 2010, no. 3, pp. 269–283.
12. Xu C., Ferdosian F. Utilization of lignosulfonate as dispersants or surfactants. Ch 5. *Conversion of Lignin into Bio-Based Chemicals and Materials*. 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-54959-9_5.
13. Pita F., Castilho A.M. Plastics floatability: Effect of saponin and sodium lignosulfonate as wetting agents. *Polímeros*, 2019, vol. 29. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.01419>.
14. Petrenko V.E., Bogdan T.V., Odintsova E.G., Antipova M.L., Bogdan V.I. B-O-4'-dimerization of coniferyl alcohol: ab initio studies. *Journal of Physical Chemistry*, 2022, vol. 96, no. 3, pp. 458–462 (In Russ.)
15. Konkova T.V., Ryseva A.P., Malkova Yu.O. Kinetics and mechanism of adsorption of anionic dyes on montmorillonite modified with sodium metasilicate. *Journal of Physical Chemistry*, 2021, vol. 95, no. 1. (In Russ.) DOI: 10.31857/S004445372101012X
16. Weigend F., Ahlrichs R. Balanced basis sets of split valence, triple zeta valence and quadruple zeta valence quality for H to Rn: design and assessment of accuracy. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005, vol. 7, pp. 3297. DOI: <https://doi.org/10.1039/b508541a>
17. Efryushin D.D., Konshin V.V., Protodopov A.V., Beushev A.A. Modification of technical lignins by carboxylic acids. *Chemistry of natural compounds*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 1007–1008. (In Russ.)
18. Zhang Y., Griebel J.J., Dirlam P.T., Nguyen N.A., Glass R.S., Mackay M.E., Char K., Pyun J. Inverse vulcanization of elemental sulfur and styrene for polymeric cathodes in Li-S batteries. *Journal of polymer science. P. A. Polymer chemistry*, 2017, vol. 55, no. 1, pp. 107–116. DOI: 10.1002/pola.28266.
19. Dokichev V.A., Koptyaeva E.I., Ishmuratov F.G., Alimbekova S.R., Tomilov V., Nifantiev N.E. Carbohydrates are a new class of "green" inhibitors of salt deposition. *Oil industry*, 2016, no. 5, pp. 92–94. (In Russ.)
20. Kholmatova Yu.Sh., Shaikhislamova G.N., Karataev O.R. Methods of using flotation purification and flotation reagents. *Scientific and methodological electronic journal "Concept"*, 2021, vol. 39, pp. 1636–1640. (In Russ.) Available at: <http://e-koncept.ru/2017/970654.htm> (accessed 15 January 2025).
21. Teptereva G.A., Shavshukova S.Yu., Konesev V.G. Improvement methods for determining the wetting edge angle using the capabilities of the COMPASS program. *Bashkir Chemical Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 77–82. (In Russ.)
22. Ruwoldt J. A Critical review of the physicochemical properties of lignosulfonates: chemical structure and behavior in aqueous solution, at surfaces and interfaces. *Surfaces*, 2020, vol. 3, pp. 622–648. DOI: <https://doi.org/10.3390/surfaces3040042>.
23. Tang Q., Zhou M., Yang D., Qiu X. Effects of pH on aggregation behavior of sodiumlignosulfonate (NaLS) in concentrated solutions. *Journal of Polymer Research*, 2015, vol. 22, no. 4, 50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10965-015-0689-3>.
24. Güçlü-Üstündağ Ö., Mazza G. Saponins: properties, applications and processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2007, vol. 47, pp. 231–258. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390600698197>
25. Ge Y., Li D., Li Z. Effects of lignosulfonate structure on the surface activity and wettability to a hydrophobic powder. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 7119–7127. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7119-7127>.
26. Yu L., Yu P., Bai S. A critical review on the flotation reagents for phosphate ore beneficiation. *Minerals*, 2024, vol. 14, no. 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14080828>

Information about the authors

Galina A. Teptereva, Dr. Sc., Professor, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russian Federation. teptereva.tga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2328-6761>

Alexander I. Voloshin, Dr. Sc., Senior Expert, RN-BashNIPIneft, 86, bld. 1, Lenin street, Ufa, 450006, Russian Federation; Senior Researcher, Ufa Institute of Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 71, Oktyabrya avenue, Ufa, 450054, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-2717-5930>

Received: 02.12.2024

Received: 16.12.2024

Accepted: 19.03.2025

УДК 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

Шифр специальности ВАК: 2.8.5

Обоснование конструкции опоры надземных магистральных трубопроводов, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи

А.М. Батыров^{1✉}, М.И. Королев¹, А.А. Красников²

¹ Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ batyrovartur@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* определяется необходимостью понимания механизмов взаимодействия трубопроводного транспорта нефти и газа в условиях морозного пучения грунта в регионах Крайнего Севера для решения целого ряда научных и инженерных задач как в настоящее время, так и в перспективе. Причиной, приводящей к аварийным ситуациям и разрушению магистральных трубопроводов, является морозное пучение грунта. В процессе эксплуатации надземных магистральных трубопроводов, проложенных в мерзлых грунтах, морозное пучение вызывает движение опорной части, что приводит к возникновению опасных нагрузок на трубопроводе и, как следствие, к появлению дефектов. Основным методом устранения таких дефектов является применение различных опор, защищающих трубопровод от геологических процессов. В связи с этим необходимо разработать новый тип опорной части для магистральных трубопроводов, которые способны снизить негативное влияние морозного пучения грунта, а также разработать алгоритм расчета данной конструкции. **Цель:** определить эффективность применения клина опоры для защиты от воздействия морозного пучения грунта и разработать алгоритм расчета данной конструкции. **Методы:** статистические методы, рассчитывающие элементы конструкции опоры и определяющие опасные нагрузки линейных участков надземного магистрального трубопровода; оценка вертикальных выдергивающих сил сваи при воздействии сил морозного пучения грунта; оценка нагрузки на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта. **Результаты и выводы.** Предложен клин в конструкции опоры надземного магистрального трубопровода, потенциально уменьшающий воздействия сил морозного пучения грунта; предложена последовательность расчета, обеспечивающая подбор предлагаемых конструкций опоры; выполнен расчет нагрузок на линейном участке надземного магистрального трубопровода при условии морозного пучения грунта с клином опоры и без клина.

Ключевые слова: надземный магистральный трубопровод, силы морозного пучения, нагрузки на трубопроводе, вертикальная выдергивающая сила сваи, клин опоры

Для цитирования: Батыров А.М., Королев М.И., Красников А.А. Обоснование конструкции опоры надземных магистральных трубопроводов, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 107–116. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

UDC 622.692.4.053

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

Substantiation of design of the aboveground main pipeline support reducing frost heaving effect on piles

A.M. Batyrov^{1✉}, M.I. Korolev¹, A.A. Krasnikov²

¹ Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

² Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ batyrovartur@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to understand the mechanisms of interaction between pipeline transport of oil and gas in conditions of frost heaving in the regions of the Far North in order to solve a number of scientific and engineering problems both now and in the future. The reason leading to emergency situations and the destruction of main pipelines is soil frosty heaving. During the operation of aboveground main pipelines laid in frozen soils, frost heaving causes movement of the supporting part, which leads to dangerous loads on the pipeline and, as a result, to the appearance of defects. The main method of eliminating such defects is the use of various supports that protect the pipeline from geological processes. In this regard, it is necessary to develop a new type of support part for the main pipelines that can reduce the negative impact of frost heaving, as well as develop an algorithm for calculating this design. **Aim.** To determine the effectiveness of using a support wedge to protect against the effects of frost heaving and to develop an algorithm for calculating this design. **Methods.** Statistical methods that calculate the parameters of individual support elements that determine the dangerous loads of linear sections of an aboveground main pipeline; assessment of vertical pile pulling forces under the impact of frost heaving forces; assessment of the load on the pipeline under the effect of frost heaving forces. **Results and conclusions.** The authors have proposed the wedge in the support structure of an aboveground main pipeline, potentially reducing the effects of frost heaving forces, the calculation sequence that ensures the selection of proposed support structures, calculated the loads on a linear section of an aboveground main pipeline under the condition of frost heaving with a support wedge and without a wedge.

Keywords: above-ground main pipeline, frost heaving forces, pipeline loads, vertical pile pulling force, support wedge

For citation: Batyrov A.M., Korolev M.I., Krasnikov A.A. Substantiation of design of the aboveground main pipeline support reducing frost heaving effect on piles. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 107–116. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4937

Введение

В статье представлены результаты исследования, посвященные влиянию морозного пучения грунта на надземные магистральные нефтегазопроводы, расположенные на многолетнемерзлых грунтах. Разработан алгоритм расчета опорных конструкций для надземных трубопроводов с учетом нагрузок, вызванных морозным пучением грунта [1]. По итогам исследования запатентованы новые конструкции опор для надземных магистральных трубопроводов [2].

Направление развития транспортировки нефти и газа активно осваивается в северных районах [3, 4]. В процессе эксплуатации надземных магистральных трубопроводов возникает множество дефектов в теле трубы и на ее поверхности [5]. Опоры надземных магистральных трубопроводов подвергаются нагрузкам со стороны грунта из-за морозного пучения, что опасно для целостности трубопровода и окружающей среды [6, 7].

Ежегодно в северных регионах России регистрируется порядка 8 тысяч отказов магистральных трубопроводов, причиной которых становится выдергивание свай опор из-за морозного пучения грунта. На месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа происходит около 2000 аварий ежегодно. На трассе газопровода Ямбург–Ныда доля аварий составляет примерно 6 % от общей протяженности магистрального трубопровода. Кроме того, в первые годы эксплуатации газопровода Мессояха–Норильск было зафиксировано около 130 аварий [8].

При строительстве нефтегазопроводов на сезонно-мерзлых грунтах традиционные опоры теряют свою устойчивость, поскольку повышаются выдергивающие силы свай (рис. 1). Потеря устойчивости

влияет на проектное положение трубопроводов, что приводит к экологическим ущербам, человеческим жертвам и экономическим потерям [9].



Рис. 1. Последствия морозного выпучивания опор надземного трубопровода

Fig. 1. Consequences of frosty heaving of aboveground pipeline supports

На данный момент при морозном пучении грунта применяют опоры с термостабилизаторами, появившиеся в XIX в. Изначально данный метод считался самым простым и эффективным, поскольку требовалось лишь заморозить грунт за счет циркулирующего хладагента в трубках стабилизаторов. Но спустя десятки лет на практике обнаружено, что такие опоры не всегда справляются со своей задачей, а иногда способствуют авариям. К недостаткам таких свай можно отнести то, что они сильно подмораживают грунт, тем самым увеличивается давление, оказываемое морозным пучением на опоры, также необходимо дорогостоящее обслуживание. Один из

известных мировых случаев негативного применения таких свай обнаружен на трассе Трансаляскинского нефтепровода, где эксплуатация термостабилизаторов привела к авариям [10, 11].

До сих пор во всем мире в северных регионах при эксплуатации магистральных нефтегазопроводов происходят аварии из-за морозного пучения грунта, очевидно, что спустя десятки лет проблема выпучивания опор не решена [12, 13]. Также отсутствует последовательность расчета опор надземных магистральных трубопроводов в условиях морозного пучения грунта. В этой связи появилась необходимость разработки конструкции опоры, снижающей влияние морозного пучения грунта на сваи. Предложена последовательность расчетов опор, обеспечивающих эффективный подбор предлагаемых элементов конструкций [14].

Предлагается устройство – опора надземного магистрального трубопровода, способное защитить трубопровод от воздействий сил морозного пучения грунта (рис. 2).

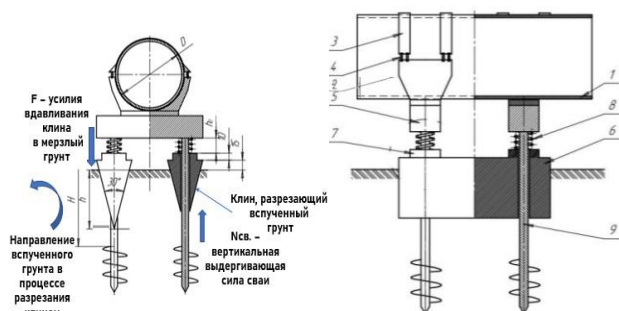


Рис. 2. Разработанная опорная конструкция надземного трубопровода: 1 – трубопровод; 2 – ложемент; 3 – полухомут; 4 – болтовое соединение; 5 – стол ростверк; 6 – опорная плита; 7 – шайба; 8 – демпфер; 9 – винтовая свая

Fig. 2. Developed support structure of the above-ground pipeline: 1 – pipeline; 2 – base; 3 – half-mast; 4 – bolted connection; 5 – grillwork table; 6 – base plate; 7 – washer; 8 – damper; 9 – screw pile

Опора надземного магистрального трубопровода работает следующим образом.

Наиболее важным элементом конструкции опоры, который позволяет защитить надземный трубопровод от воздействий сил морозного пучения, является клин, который начинает противодействовать грунту за счет усилий вдавливания и благодаря своей геометрии разрезает вспученный мерзлый грунт. Характеристики клина: материал клина железобетон марки М450, длина 2,2 м, ширина 0,6 м, высота 1,1 м, угол 30 градусов. Вспученный грунт расходуется в разные стороны, таким образом уменьшается опасная нагрузка на опору [14].



Рис. 3. Последовательность расчета опор трубопроводов при условии морозного пучения грунта. Для определения силы резания грунта воспользуемся формулой доктора технических наук профессора А.Н. Зеленина, который разработал теорию резания грунтов на основе результатов экспериментальных исследований, для определения жесткости пружин воспользуемся законом Гука

Fig. 3. Sequence of calculation of pipeline supports under the condition of soil frost heaving. To determine the cutting force of the soil, we will use the formula of A.N. Zelenin, Dr. Sc., Professor, who developed the theory of soil cutting based on the results of experimental studies, the Hooke's law is used to determine the stiffness of springs

При проектировании предлагаемых опор предложен алгоритм расчета (рис. 3), учитывающий нагрузки морозного пучения грунта на трубопровод. Данный алгоритм позволяет определить напряжения в линейных участках надземного магистрального трубопровода в условиях морозного пучения с учетом выбранных опор, а также рассчи-

тать вертикальные выдергивающие силы свай, оптимальную длину клина и жесткость пружин демпфера опоры.

Для начала необходимо рассчитать общую силу на опору от трубопровода и веса самой трубы с учетом флюида (углеводорода), транспортируемого по трубопроводу, по формуле (1) [15]:

$$F_{\text{тр.}} = q_{\text{тр}} + q_{\text{погоды}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{тр}}$ – нагрузка трубопровода; $q_{\text{погоды}}$ – нагрузка на трубопровод в зависимости от погодных условий.

Следующим этапом определяется сила морозного пучения грунта, действующая на сваи опоры, по СП 22.13330.2016 и [16].

Чтобы зафиксировать необходимую силу для резания грунтов, которая должна быть больше общей нагрузки на опору, воспользуемся формулой (2) [17]:

$$F_p = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} \cdot (1 + 2,6 \cdot \ell) \times \\ \times (1 + 0,0075 \cdot \alpha) \cdot (1 + 0,03 \cdot b) \cdot v \cdot \mu, \quad (2)$$

где C – коэффициент крепости; h – глубина резания; ℓ – длина периметра; α – угол резания град; b – толщина боковых стенок клина; v – величина, учитывающая угол заострения боковых стенок; μ – коэффициент, учитывающий влияние способа резания.

Для безопасной эксплуатации опоры рассчитываем силы F_{rf} , кН, удерживающей сваи от выпучивания, по формуле (3) [18]:

$$F_{\text{rf}} = u \sum_{i=1}^n f_i h_i, \quad (3)$$

где u – периметр сечения поверхности сдвига, м, принимаемый равным периметру сечения свай; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя талого грунта сдвигу по поверхности свай, кПа; h_i – толщина i -го слоя талого грунта, расположенного ниже подошвы слоя промерзания, м.

Для понимания, на какое расстояние возможно смещение опоры, рассчитываем подъем основания от пучения по формуле (4) [19]:

$$h_{\text{с.п}} = e \cdot d, \quad (4)$$

где e – относительная деформация пучения грунта; d – глубина сезонномерзлого грунта.

В связи с использованием в предлагаемой опоре пружинного демпфера для компенсации нагрузок, возникающих от колебаний клина, требуется определить нагрузку на демпфер с применением формулы (5) [20]:

$$F_{\text{пр}} = y \cdot 0,5 \cdot (l_1 + l_2) + j \cdot Y, \quad (5)$$

где y – вес трубопровода, кгс/м; l_1 и l_2 – пролеты опоры, м; Y – вес ростверка опоры, кгс; j – доля веса арматуры, передаваемая на эту опору.

Для расчета жесткости пружин демпфера, которые передают нагрузку от трубопровода к клину опоры с учетом подъема основания из-за морозного пучения грунта, используется формула (6) [21]:

$$K = F_{\text{тр}} / (L - h_{\text{с.п}}), \quad (6)$$

где $h_{\text{с.п}}$ – подъем основания опоры, м; L – длина пружин, м; $F_{\text{тр}}$ – нагрузка на пружины от трубопровода, Н.

Поскольку на трубопровод влияет сила морозного пучения грунта через сваи опоры, необходимо рассчитать вертикальные выдергивающие силы формуле (7) [22]:

$$N = \tau_{\text{пуч.}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H, \quad (7)$$

где r – радиус свай, м; H – длина свай в толщине сезонномерзлого грунта с учетом защищающей части свай клином опоры; $\tau_{\text{пуч.}}$ – касательные силы морозного пучения грунта.

Заключительным этапом предлагаемого алгоритма является определение возникающих нагрузок на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта. Для расчета необходимой нагрузки разработана эпюра с силами, которые оказывают воздействие на трубопровод (рис. 4), с последовательностью уравнений по формулам (8)–(10):

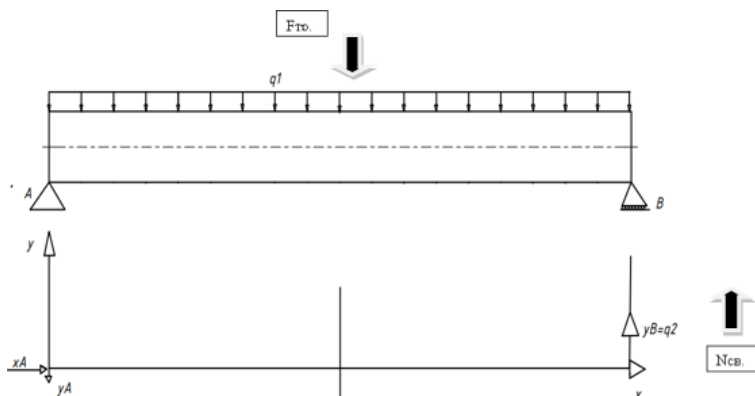


Рис. 4. Нагрузки на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта
Fig. 4. Loads on the pipeline under the impact of frost heaving forces

Находим y_b через момент силы

$$\Sigma M_a = -q_1 \cdot 1 \cdot 1/2 + y_b \cdot 1 + q_2 \cdot 1 \cdot 1/2, \quad (8)$$

$$y_b = (q_1 \cdot 1/2 - q_2 \cdot 1/2),$$

где q_1 и q_2 – распределенная нагрузка, действующая со стороны трубы и со стороны грунта, Н/м.

Перепишем это уравнение следующим образом:
Так как

$$Q = q \cdot l. \quad (9)$$

Уравнение примет следующий вид:

$$y_b = (Q_1/2 - Q_2/2), \quad (10)$$

где Q_1 и Q_2 – сосредоточенная нагрузка, действующая со стороны трубы и со стороны грунта, соответственно, Н; $y_b = (Q_1/2 - Q_2/2)$ – определяемая нагрузка на трубопроводе.

Для расчета нагрузки на трубопроводе заменим Q_1 на $F_{тр}$, а вместо Q_2 подставим $N_{св}$ и получим необходимую формулу (11):

$$Q = (F_{тр} - N)/2, \quad (11)$$

где N – вертикальная выдергивающая сила сваи, равнозначная удельной нагрузке Q_2 ; $F_{тр}$ – нагрузка трубопровода, равнозначная удельной нагрузке Q_1 .

Данная последовательность расчета позволяет вычислить вертикальные выдергивающие силы сваи и нагрузки, возникшие на трубопроводе, вызванные морозным пучением грунта, а также подобрать необходимые длину клина и жесткость пружин демпфера опорной конструкции трубопровода.

В качестве примера рассчитаем необходимую жесткость пружин и определим длину клина за счет вычислений вертикальных выдергивающих сил сваи при воздействии сил морозного пучения грунта.

Для вычислений нам потребуются следующие данные: нагрузка трубопровода на одну сваю 150 кН; радиус сваи 0,1 м; длина пружины 1 м; подъем основания опоры 0,05 м; длина сваи в толщине сезонно-мерзлого грунта 2,5 м; длина сваи без перекрытой части клином в толщине сезонно-мерзлого грунта (при разной длине клина в мерзлом слое грунта); удерживающая способность сваи 136 кН; касательные силы морозного пучения грунта при условии сезонного промерзания и несливающейся мерзлоты 70, 90, 110, 140, 150 кПа. Для расчета жесткости пружин демпфера воспользуемся формулой (6):

$$K = 150 / (1 - 0,05) = 157,8 \text{ кН/м.}$$

Для конструкции опоры достаточно подобрать пружины с минимальной жесткостью 157,8 кН/м, поскольку при такой жесткости пружина не будет сжиматься от вертикальных нагрузок.

Для эффективности применения опоры при максимальной силе морозного пучения грунта необхо-

димо подобрать длину клина так, чтобы выполнялись условия: удерживающая способность сваи была больше выдергивающей силы и нагрузки на трубопроводе имели положительные значения. Полученные нагрузки с отрицательным знаком означают появление опасных изгибающих напряжений стенки трубопровода, которые приводят к деформации.

Для оценки вертикальных выдергивающих сил и нагрузок, возникших на трубопроводе вследствие влияния морозного пучения грунта, предлагается сравнить силы, оказываемые на сваи как без учета предлагаемой конструкции, так и с учетом опоры с клином, используя формулы (7) и (11).

Результаты расчетов представлены в виде диаграмм, на которых показана зависимость вертикальных выдергивающих сил сваи от наличия защитного элемента в конструкции опоры и длины клина при воздействии морозного пучения грунта (рис. 5–8). Нагрузки на трубопровод при этом напрямую зависят от величины выдергивающих сил сваи.

Диаграмма расчетов с длиной клина 0,5 м представлена на рис. 5.

По полученным результатам видно, что клин длиной 0,5 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 90 кПа, поскольку вертикальная выдергивающая сила сваи меньше удерживающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением только в диапазоне от 31 до 6 кН при вертикальных выдергивающих силах сваи до 138 кН, в остальных случаях нагрузка принимает отрицательное значение. Так как выполняется только одно условие, эффективность длины клина 0,5 м возможна только при силах морозного пучения до 90 кПа.

Диаграмма расчетов с длиной клина 0,7 м представлена на рис. 6.

По полученным результатам видно, что клин длиной 0,7 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 110 кПа, поскольку вертикальная выдергивающая сила сваи меньше удерживающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением только в диапазоне от 35,5 до 13 кН при вертикальных выдергивающих силах сваи до 124 кН, в остальных случаях нагрузка принимает отрицательное значение. Так как выполняется только одно условие, эффективность длины клина 0,7 м возможна только при силах морозного пучения до 110 кПа.

Диаграмма расчетов с длиной клина 1 м представлена на рис. 7.

По полученным результатам видно, что клин длиной 1 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 140 кПа, поскольку вертикальная выдергивающая сила сваи меньше удержи-

вающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением только в диапазоне от 42 до 4,5 кН при вертикальных выдергивающих силах сваи до 141 кН, в остальных случаях нагрузка принимает отрицательное значение.

Так как выполняется только одно условие, эффективность длины клина 1 м возможна только при силах морозного пучения до 140 кПа.

Диаграмма расчетов с длиной клина 1,1 м представлена на рис. 7.

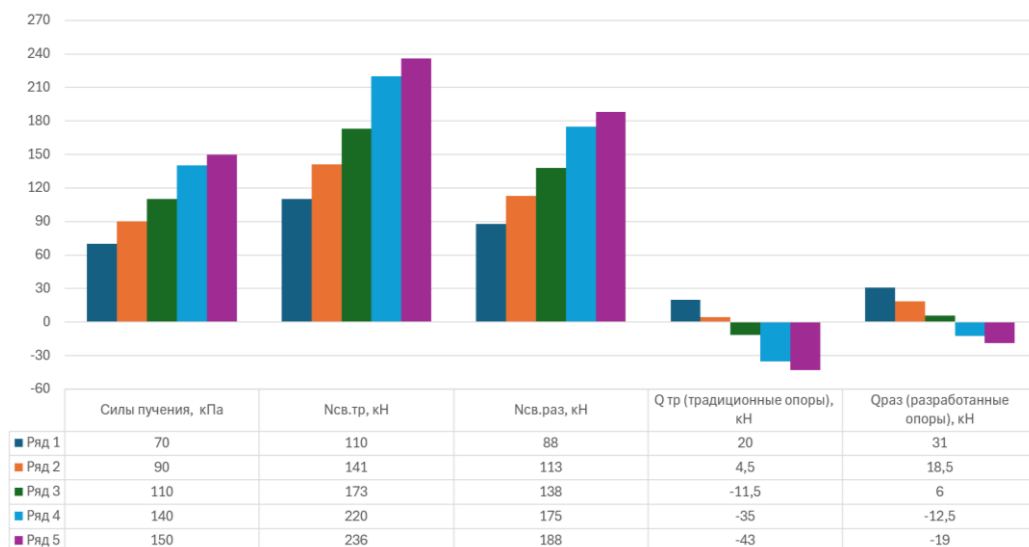


Рис. 5. Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдергивающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 88 до 188 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до -43 кН и с клином в интервале от 31 до -19 кН

Fig. 5. Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 88 to 188 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to -43 kN and with a wedge in the range from 31 to -19 kN

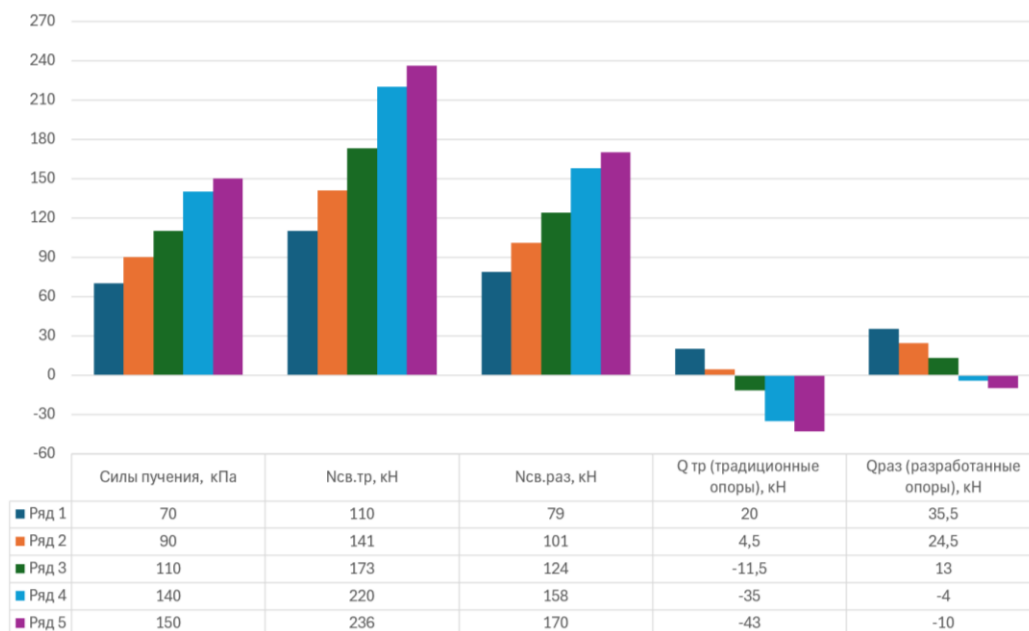


Рис. 6. Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдергивающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 79 до 170 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до -43 кН и с клином в интервале от 35,5 до -10 кН

Fig. 6. Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 79 to 170 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to -43 kN and with a wedge in the range from 35.5 to -10 kN

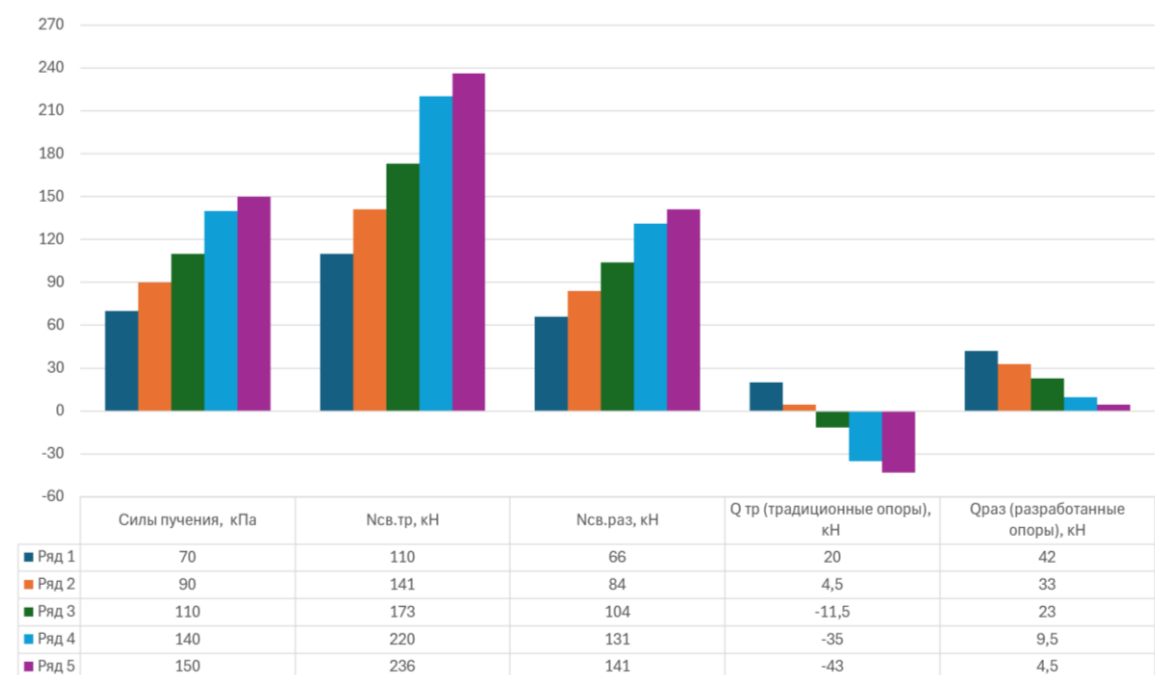


Рис. 7. Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдерживающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 66 до 141 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до –43 кН и с клином в интервале от 42 до 4,5 кН

Fig. 7. Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 66 to 141 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to –43 kN and with a wedge in the range from 42 to 4.5 kN

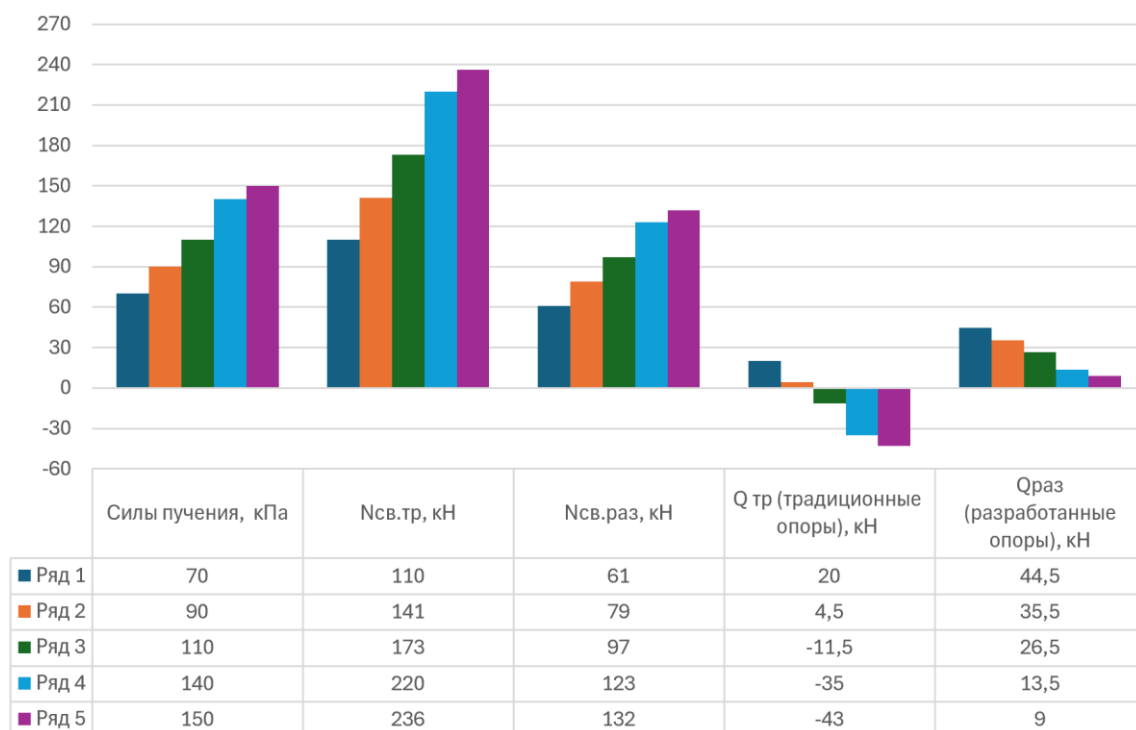


Рис. 8. Диаграмма морозного пучения грунта в интервале от 70 до 150 кПа, вертикальных выдерживающих сил сваи без клина в интервале от 110 до 236 кН и с клином в интервале от 61 до 132 кН, нагрузки на трубопроводе с опорами без клина в интервале от 20 до –43 кН и с клином в интервале от 44,5 до 9 кН

Fig. 8. Diagram of soil frost heaving in the range from 70 to 150 kPa, vertical pulling forces of a pile without a wedge in the range from 110 to 236 kN and with a wedge in the range from 61 to 132 kN, loads on a pipeline with supports without a wedge in the range from 20 to –43 kN and with a wedge in the range from 44.5 to 9 kN

По полученным результатам видно, что клин длиной 1,1 м справляется при силе морозного пучения в интервале от 70 до 150 кПа, поскольку вертикальная выдерживающая сила сваи меньше удерживающей способности. На трубопроводе наблюдаются нагрузки с положительным значением в диапазоне от 44,5 до 9 кН при вертикальных выдерживающих силах сваи до 132 кН. Выполняется два условия, следовательно, эффективность длины клина 1,1 м возможна при максимальной силе морозного пучения 150 кПа.

Таким образом, клин опоры с длиной 1,1 м за счет своей длины перекрывает необходимую площадь сваи, чтобы обеспечить устойчивость опоры, тем самым сохранить проектное положение трубопровода. Данный расчет показывает потенциальную возможность снижения влияния морозного пучения на трубопровод путем уменьшения вертикальных выдерживающих сил свай.

По результатам вычислений выявлено:

1. Вертикальные выдерживающие силы сваи снижаются в зависимости от длины клина опоры.
2. Нагрузки на трубопроводе начинают возрастать в зависимости от сил морозного пучения грунта.
3. Нагрузки на трубопроводе, возникающие при морозном пучении грунта, напрямую зависят от вертикальных выдерживающих сил сваи, что в свою очередь позволяет спрогнозировать рост или падение опасных нагрузок в зависимости от длины клина опоры.

Заключение

Основная часть современной научной литературы фокусируется на изучении процессов пучения грунта при эксплуатации трубопроводов в северных регионах. В то же время в доступных источниках отсутствуют работы, посвященные исследованию устойчивости опор надземных магистральных трубопроводов под воздействием сил морозного пучения грунта.

Для обеспечения надежной эксплуатации надземных магистральных нефтепроводов на сезонномерзлых грунтах необходимо учитывать воздействие морозного пучения грунта. Для различных типов грунтов с разной степенью морозного

пучения длина клина опоры должна быть выбрана так, чтобы минимизировать контакт вспученного грунта со сваями. Таким образом, необходимо подобрать оптимальные размеры клина опоры, чтобы снизить влияние морозного пучения на магистральный трубопровод. Стоит добавить, что для эффективного подбора элементов конструкции опоры, особенно клина, важным является определение нужной длины в зависимости от сил морозного пучения и глубины промерзания грунта, так как при сильном морозном пучении грунта клин с недостаточной длиной не полностью справится со своей задачей и вертикальная выдерживающая сила сваи начнет оказывать негативное воздействие на трубопровод. В этой связи предложена последовательность расчета опор надземных магистральных трубопроводов. Также в предлагаемой опорной конструкции предусмотрен демпфер, который необходим для передачи нагрузки от трубопровода на клин для усилий вдавливания клина в грунт в момент оказываемой нагрузки грунта в процессе морозного пучения. Для определения оптимальной жесткости пружин предложен расчет, который предусмотрен в предлагаемом алгоритме.

Предложенный алгоритм расчета для разработанной опоры надземного магистрального трубопровода позволяет на стадии проектирования рассчитать опасные нагрузки на трубопроводе при воздействии сил морозного пучения грунта, исключить возможные дефекты и аварии, также аргументирует применение разработанных конструкций опор в отличие от традиционных. На основании полученных результатов на текущем этапе можно сделать вывод:

1. Результаты расчетов опоры, выполненные для разработанного алгоритма, подтверждают потенциальную возможность использования клина в качестве основания для надземной опоры при условиях морозного пучения грунта.
2. При проектировании надземных магистральных трубопроводов, прокладываемых в условиях Крайнего Севера, используя разработанные конструкции опор с клином, следует применить данный алгоритм для эффективного расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № RU 2023663247 Российская Федерация. Программа расчета опор надземных магистральных трубопроводов, проложенных на многолетнемерзлых грунтах в условиях морозного пучения. № 2023661892: заявл. 08.06.2023, дата регистрации: 21.06.2023 / 194 кб.
2. Патент РФ на изобретение № 2781733 C1. Опора надземного магистрального трубопровода / МПК F16L 3/10, F16L 3/205. Оpubл. 17.10.2022.
3. Fetisov V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a compressor station to reduce CO₂ emissions // Scientific Reports. – 2024. – 10605. – P. 1–21. DOI: 10.1038/s41598-024-61361-3
4. Wong P.K., Thevaragavan M. Lateral deformation and stability of embankments supported on controlled modulus columns // International Conference on Ground Improvement & Ground Control. – 2012. – P. 1–6. DOI: 10.3850/978-981-07-3559-3_02-0226
5. Основания и фундаменты сооружений на вечноммерзлых грунтах. 2-е изд. доп. и перераб. / С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева, А.В. Кажарский и др. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – 43 с.

6. Оптимизация проектных решений при прокладке магистральных трубопроводов в условиях островной и прерывистой мерзлоты / Х.Ш. Шамилов, Р.М. Каримов, А.К. Гумеров, А.Р. Валеев, Р.Р. Ташбулатов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – № 11 (2). – С. 136–144.
7. Suebsuk J., Horpibulsuk S., Liu D. Modified structured cam clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays // Computers and Geotechnics. – 2010. – Vol. 37 (7). – P. 956–968.
8. Новичков А.В., Токарев А.П., Гаррис Н.А. Улучшение условий эксплуатации трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 4 (138). – С. 76–88.
9. Оценка потенциального ущерба почвам от аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на территории Арктического региона / М.А. Невская, В.В. Беляев, С.Н. Пастернак, В.В. Виноградова, Д.И. Шагидулина // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2024. – № 3. – С. 107–122. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007
10. Ruixia He, Jin Huijun. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai–Tibet Plateau and their mitigation // Cold Regions Science and Technology. – 2014. – Vol. 64. – P. 279–288.
11. Shakeel M., Ng C.W.W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay // Computers and Geotechnics. – 2018. – Vol. 96. – P. 55–72.
12. Comparison of coupled flow-deformation and drained analyses for road embankments on CMC improved ground / H. Mahdavi1, B. Fatahi, H. Khabbaz, P. Vincent, R. Kelly // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 143. – P. 462–469. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.058
13. Nguyen L.D., Fatahi B., Khabbaz H. A constitutive model for cemented clays capturing cementation degradation // International Journal of Plasticity. – 2014. – Vol. 56. – P. 1–18.
14. Батыров А.М. Разработка опорных конструкций надземных магистральных трубопроводов, снижающих влияние морозного пучения грунта: дис. ... канд. тех. наук. – СПб, 2024. – 128 с.
15. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85* Актуализированная редакция / Минрегион России. Введ. 01.01.2013. – М., 2012. – 92 с.
16. СП 22.13330.2016. Свод правил по основаниям зданиям и сооружениям. – М.: Минрегион России, 2016. – 160 с.
17. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. – 198 с.
18. СП 24.13330.2021. Свод правил по свайным фундаментам. – М.: Минстрой России, 2022. – 82 с.
19. Алексеев А.Г., Виноградов С.А. Проектирование оснований фундаментов на пучинистых грунтах. – М.: Изд-во АО «КТБ ЖБ», АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсегонова, 2019. – 56 с.
20. РТМ 24.038.12-72. Руководящий технический материал по выбору упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. – М.: Минтяжмаш, 1973. – 26 с.
21. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines / I.A. Shammazov, A.M. Batyrov, D.I. Sidorkin, T. Van Nguyen // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – P. 1–18. DOI: 10.3390/app13053139.
22. ОДМ 218.3.103-2018. Отраслевой дорожный методический документ рекомендации по применению винтовых свай на автомобильных дорогах. – М.: 2018. – 105 с.

Информация об авторе

Артур Магомедович Батыров, кандидат технических наук, доцент Высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; batyrovartur@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9864-2475>

Максим Игоревич Королев, кандидат технических наук, руководитель Высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; m_korolev@ugrasu.ru

Антон Андреевич Красников, аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия 2; anton.krasnikov.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3632-9345>

Поступила в редакцию: 24.12.2024

Поступила после рецензирования: 14.01.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Batyrov A.M., Sidorkin D.I., Boikov A.V. A program for calculating the supports of aboveground main pipelines laid on permafrost soils under conditions of frost heaving. No. 2023661892, 2023. (In Russ.)
2. Shammazov I.A., Sidorkin D.I., Batyrov A.M. Aboveground main pipeline support. Patent RF, no. 2781733, 2022. (In Russ.)
3. Fetisov V. Analysis of numerical modeling of steady-state modes of methane–hydrogen mixture transportation through a compressor station to reduce CO₂ emissions. *Scientific Reports*, 2024, 10605, pp. 1–21. DOI: 10.1038/s41598-024-61361-3
4. Patrick W., Thevaragavan M. Lateral deformation and stability of embankments supported on controlled modulus columns. *International Conference on Ground Improvement & Ground Control*, 2012, pp. 1–6. DOI: 10.3850/978-981-07-3559-3_02-0226
5. Kudryavtsev S.A., Vyaltseva T.Y., Kozharsky A.V. *Foundations and bases of structures on permafrost soils*. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2015. 43 p. (In Russ.).
6. Shamilov H.S., Karimov R.M., Gumerov A.K., Valeev A.R., Tashbulatov R.R. Optimization of design solutions for laying main pipelines in conditions of island and intermittent permafrost. *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 136–144. (In Russ.) DOI: 10.28999/2541-9595-2021-11-2-136-144.

7. Suebsuk J., Horpibulsuk S., Liu M. Modified structured cam clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays. *Computers and Geotechnics*, 2010, vol. 37 (7), pp. 956–968. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.08.002
8. Novikov A.V., Tokarev A.P., Harris N.A. Improving the operating conditions of pipelines on permafrost soils. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products*, 2022, no. 4 (138), pp. 76–88. DOI: 10.17122/ntj-oil-2022-4-76-8
9. Nevskaya M.A., Belyaev V.V., Pasternak S.N., Vinogradova V.V., Shagidullina D.I. Assessment of potential damage to soils from accidental oil and petroleum product spills in the Arctic region. *North and market: the formation of an economic order*, 2024, no. 3, pp. 107–122. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007
10. Ruixia H., Huijun J. Permafrost and cold-region environmental problems of the oil product pipeline from Golmud to Lhasa on the Qinghai–Tibet Plateau and their mitigation. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, vol. 64, pp. 279–288.
11. Shakeel M., Ng W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay. *Computers and Geotechnics*, 2018, vol. 96, pp. 55–72.
12. Mahdavi H., Fatahi B., Khabbaz H., Vincent P., Kelly R. Comparison of coupled flow-deformation and drained analyses for road embankments on CMC improved ground. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 462–469. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.058.
13. Nguyen L., Fatahi B., Khabbaz H. A constitutive model for cemented clays capturing cementation degradation. *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 56, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.007
14. Batyrov A.M. *Development of support structures of aboveground main pipelines that reduce the effect of frost heaving of soil*. Cand. Dis. St. Petersburg, 2024. 128 p. (In Russ.)
15. SP 36-13330-2012. *Code of rules for main pipelines*. Moscow, Standartinform of Russia Publ., 2012. 92 p. (In Russ.)
16. SP 22-13330-2016. *Code of rules for foundations of buildings and structures*. Moscow. Standartinform of Russia Publ., 2019. 160 p. (In Russ.)
17. Zelenin A.N. *Fundamentals of soil destruction by mechanical methods*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 375 p. (In Russ.)
18. SP 24-13330-2021. *Set of rules on pile foundations*. Moscow, Ministry of Regional Development Publ., 2022. 82 p. (In Russ.)
19. Alekseev A.G., Vinogradov S.A. *Designing the foundations of foundations on deep soils*. Moscow, KTB ZhB Publ., 2019. 56 p. (In Russ.)
20. RTM 24.038-12-72. *Technical guidance on the selection of elastic supports for pipelines of thermal and nuclear power plants*. Moscow, Ministry of Heavy, Energy and Transport Engineering of Russia Publ., 1973. 26 p. (In Russ.)
21. Shammazov I.A., Batyrov A.M., Sidorkin D.I., Van Nguyen T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, DOI: 10.3390/app13053139.
22. ODM 218.3-103-2018. *Industry Road guidance document recommendations for the use of screw piles on highways*. Moscow, Rosavtodor of Russia Publ., 2018. 105 p. (In Russ.)

Information about the author

Artur M. Batyrov, Cand. Sc., Associate Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; batyrovartur@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-9864-2475>

Maxim I. Korolev, Cand. Sc., Head of the High Oil School, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; m_korolev@ugrasu.ru

Anton A. Krasnikov, Post-graduate Student, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, Vasilyevsky Island, 21 line, 2, St. Petersburg, 199106, Russian Federation; anton.krasnikov.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3632-9345>

Received: 24.12.2024

Revised: 14.01.2024

Accepted: 19.03.2025

УДК 553.982
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4693
Шифр специальности ВАК: 2.5.21

Исследование особенностей процессов фильтрации осадкогелеобразующих составов через пористые среды

М.Я. Хабибуллин✉

Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Октябрьский),
Россия, г. Октябрьский

✉ m-hab@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности обработок призабойных зон скважин за счет снижения проницаемости промытых зон призабойной части пласта и уменьшения степени его неоднородности путем применения осадкогелеобразующих составов на основе водорастворимых полимеров и щелочей. *Цель:* разработать и предложить метод применения для обработки призабойных зон скважин осадкогелеобразующих составов за счет реакции между полимерами и щелочами, чем избежать повторов реакций. *Объекты.* Исследования проводились на несцементированных пористых средах. В качестве модели пористой среды использовался кварцевый песок. Проницаемость пористой среды составляла 1,2 мкм². При приготовлении осадкогелеобразующих составов использованы технический полиакриламид молекулярной массой 1,35·10⁶ и гидроксид натрия. Осадкогелеобразующие составы готовились на дистиллированной и пресной воде с общей минерализацией 2,64 мг-экв. Концентрации полиакриламида и гидроксида натрия в осадкогелеобразующих составах изменялись соответственно от 0,05 до 0,15 % и от 0,1 до 0,75 %. *Методы.* Характер фильтрации осадкогелеобразующих составов в пористых средах определяется конформационными изменениями макромолекул полимера, зависящими от концентрации щелочи и полимера в составе, от минерализации растворителя и вод, насыщающих пористую среду, от скорости фильтрации и от взаимодействия осадкогелеобразующих составов с пористой средой. Кроме того, как отмечается в работах, эффективность применения осадкогелеобразующих составов на основе водорастворимых полимеров и щелочей существенно повышается благодаря присутствию полимера, обладающего флокулирующими свойствами и позволяющего связывать отдельные образующиеся в пласте дисперсные частицы между собой и с породой пласта. *Результаты.* Поведение осадкогелеобразующих составов в пористых средах определяется по конформационным изменениям макромолекул полимера, которые зависят от содержания щелочи и полимера в составе, от минерализации растворителя и вод, насыщающих пористую среду, от скорости фильтрации и взаимодействия осадкогелеобразующих составов с пористой средой (результаты экспериментов убедительно показаны графически, согласно проведенным экспериментам). Уменьшение фактора сопротивления для осадкогелеобразующих составов как на дистиллированной, так и на пресной воде с увеличением концентрации щелочи в растворе может быть объяснено снижением размеров макромолекул и их ассоциаций.

Ключевые слова: осадкогелеобразующий состав, гидроксид натрия, фильтрационные характеристики, скорость фильтрации, дистиллированная вода, пресная вода, полиакриламид

Для цитирования: Хабибуллин М.Я. Исследование особенностей процессов фильтрации осадкогелеобразующих составов через пористые среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 117–126. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4693

UDC 553.982
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4693

Features of filtration of sediment-gelling compositions through porous media

M.Ya. Khabibullin✉

Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky), Oktyabrsky, Russian Federation

✉ m-hab@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to improve the efficiency of treatments of the bottomhole zones of wells by reducing the permeability of the washed zones of the bottomhole formation and its heterogeneity degree through the use of sediment-gelling compositions based on water-soluble polymers and alkalis. **Aim.** To develop and propose a method for using sediment-gelling compounds for treating the bottomhole zones of wells due to the reaction between polymers and alkalis, thereby avoiding repetitions of reactions. **Objects.** The studies were conducted on uncemented porous media. Quartz sand was used as a model of the porous medium. The permeability of the porous medium was $1.2 \mu\text{m}^2$. Technical polyacrylamide with a molecular weight of $1.35 \cdot 10^6$ and sodium hydroxide were used in the preparation of sediment-gelling compositions. The sediment-gelling compositions were prepared on distilled and fresh water with a total mineralization of 2.64 mg-eq. The concentrations of polyacrylamide and sodium hydroxide in the sediment-gelling compositions varied from 0.05 to 0.15% and from 0.1 to 0.75%, respectively. **Methods.** The nature of the filtration of sediment-gelling compositions in porous media is determined by conformational changes in the polymer macromolecules, depending on the concentration of alkali and polymer in the composition, on the mineralization of the solvent and waters saturating the porous medium, on filtration rate and on the interaction of sediment-gelling compositions with the porous medium. In addition, as noted in the works, the efficiency of using sediment-gelling compositions based on water-soluble polymers and alkalis is significantly increased due to the presence of a polymer that has flocculating properties and allows individual dispersed particles formed in the formation to be bound together and by the formation rock. **Results.** The behavior of sediment-gelling compositions in porous media is determined by conformational changes in polymer macromolecules, which depend on the alkali and polymer content in the composition, on the mineralization of the solvent and waters involved in the saturation of the porous medium, on filtration rate and interaction of sediment-gelling compositions with the porous medium (the results of the experiments are convincingly shown graphically, according to the experiments conducted). The decrease in the resistance factor for sediment-gelling compositions both on distilled and fresh water with an increase in alkali concentration in the solution can be explained by a decrease in the size of macromolecules and their associations.

Keywords: sediment-gelling composition, sodium hydroxide, filtration characteristics, filtration rate, distilled water, fresh water, polyacrylamide

For citation: Khabibullin M.Ya. Features of filtration of sediment-gelling compositions through porous media. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 117–126. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4693

Введение

Одним из решений для увеличения эффективности обработки призабойных зон скважины является снижение проницаемости промытых зон призабойной части пласта при использовании осадкогелеобразующих составов (ОГС) в нефтедобывающей промышленности. Процесс снижения проницаемости происходит за счет образования осадка в порах пласта, который закупоривает их и препятствует фильтрации воды в призабойную зону. Это позволяет улучшить поток нефти и газа, а также увеличить объем извлекаемых углеводородов.

Снижение проницаемости промытых зон призабойной части пласта является сложным процессом, который требует тщательной оптимизации ОГС и условий его введения. Эффективное снижение проницаемости может значительно улучшить эффективность добычи нефти и газа, снизить затраты на добычу и уменьшить негативное влияние на окружающую среду [1–3].

К примеру, об основании вискозиметрических исследований можно сделать вывод, что осадочные гелеобразующие соединения обладают псевдопластичными свойствами, обусловленными сдвиговой деформацией макромолекул и их ассоциаций [4]. На высоких скоростях фильтрации количество удерживаемого осадка будет меньше, чем на низких. Именно эти два фактора определяют псевдопластический характер течения ОГС через пористые среды [5–7].

Результаты плодотворности применения ОГС на основе водорастворимых полимеров и щелочей были доказаны многими экспериментальными и полевыми исследованиями. Например, исследования показали, что применение таких составов может увеличить нефтеотдачу на 10–40 % в зависимости от свойств пласта и условий эксплуатации скважины. Кроме того, эти составы могут снизить водоотдачу и улучшить фазовую проницаемость нефти, что также способствует повышению нефтеотдачи [8–10].

Эффективность обработки призабойных зон скважин ОГС будет зависеть не только от объема получаемого продукта реакции, перекрывающего каналы фильтрации, но и от реологических и фильтрационных характеристик ОГС [11, 12].

Методы и материалы

Присутствие ионов поливалентных металлов в пресной воде приводит к сшиванию макромолекул полиакриламида и образованию крупных ассоциаций [13–15]. При фильтрации крупных сшитых ассоциаций через пористую среду возникают дополнительные сопротивления, что приводит к увеличению коэффициента стойкости осадочных гелеобразующих композиций в пресной воде по сравнению с дистиллированной водой [16–18]. Кроме того, в пресной воде может происходить сужение просвета и закупорка поровых каналов в результате осаждения частиц гидрата оксида кальция [19], свя-

занных полимерными макромолекулами в крупные агрегаты, образующиеся при взаимодействии щелочи, содержащейся в композиции, с ионами поливалентных металлов, содержащимися в пресной воде, насыщающей кварцевый песок [20–22].

Исследования фильтрационных характеристик ОГС проводились с помощью специальных приборов, называемых фильтр-прессами. В процессе эксперимента измерялся объем фильтрата, прошедшего через образец гелеобразующего состава за определенное время при заданном давлении. Исследования проводились в специальных средах: несцементированных и пористых [23–25]. Моделью пористой среды был кварцевый песок. Проницаемость среды составила $1,2 \text{ мкм}^2$.

При создании ОГС использовались полиакриламид технического применения с молекулярной массой $1,35 \cdot 10^6$ и гидроксид натрия (NaOH). ОГС готовились на дистиллированной и пресной воде с общей минерализацией 2,64 мг-экв [26–28]. Концентрации полиакриламида и NaOH в ОГС изменялись соответственно от 0,05 до 0,15 % и от 0,1 до 0,75 %.

Характеристики фильтрации ОГС в кварцевом песке, который был насыщен водой так, что и средство для растворения (пресная или дистиллированная вода), на основе которого приготовлен исследуемый ОГС с концентрацией полиакриламида 0,05% и гидроксида натрия 0,1; 0,12; 0,25; 0,75 %, от скорости фильтрации, представлены в табл. 1. Получена зависимость фактора сопротивления (R) от скорости фильтрации [29].

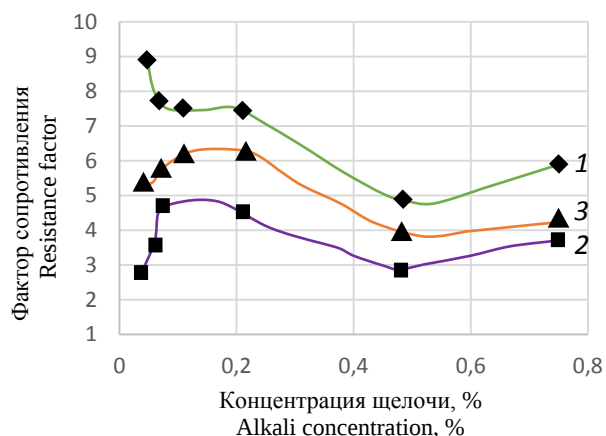


Рис. 1. Зависимость фактора сопротивления от концентрации щелочи в осадкогелеобразующих составах при постоянной скорости фильтрации с концентрацией полиакриламида, %: 1 – 0,05; 2 – 0,075; 3 – 0,15

Fig. 1. Dependence of the resistance factor on alkali concentration in sediment-gelling compositions at a constant filtration rate with a concentration of polyacrylamide, %: 1 – 0,05; 2 – 0,075; 3 – 0,15

Рассмотрим значения фактора сопротивления в зависимости от концентрации щелочи на рис. 1. Они получены при одинаковой скорости фильтрации через кварцевый песок ОГС с концентрацией полиакриламида 0,05–0,15 % и гидроксид натрия NaOH 0,1–0,75 % [30–33].

Мы видим, что на рис. 1 зависимость фактора сопротивления от концентрации щелочи и полимера в ОГС при одинаковой скорости фильтрации имеет характер нелинейности.

Результаты и обсуждения

Полученные выводы обработки экспериментальных данных в виде зависимости фактора сопротивления R от скорости фильтрации также приведены в табл. 1.

После проведенных опытов мы видим, что ОГС, которые приготовили на дистиллированной воде, проходили фильтрацию через пористую часть без остановки фильтрации как псевдопластические жидкости при всех увиденных концентрациях щелочи (R уменьшается с увеличением скорости фильтра, столбцы 2–5, а также результаты обработки экспериментальных данных, табл. 1). С увеличением концентрации щелочи в ОГС R снижается (столбцы 2–5, табл. 1).

ОГС, которые приготовили на основе пресной воды, двигались также через пористые среды как псевдопластические жидкости (R уменьшается с увеличением скорости фильтрации, столбцы 6–9, а также результаты обработки экспериментальных данных табл. 1). R у ОГС на пресной воде при тех же концентрациях щелочи выше, чем у ОГС на дистиллированной воде (столбцы 2–5, 6–9, табл. 1), и с ростом концентрации щелочи в составе уменьшается.

После проведения эксперимента были вычислены кривые течения в виде зависимости напряжения сдвига (τ) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$), впоследствии обработанные по степенному закону Освальда-Де Вала [34–36]. Скорость сдвига при перемещении ОГС в пористой среде находили по формуле (1) [37]:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{r}, \quad (1)$$

где v – скорость фильтрации ОГС в призабойной зоне, м/с [38]; r – радиус порового канала, мкм, который находили по формуле (2) [39]:

$$r = \frac{2}{7 \cdot 10^5} \sqrt{\frac{k\varphi}{m}}, \quad (2)$$

где k – проницаемость пористой среды, мкм^2 ; φ – структурный коэффициент [40]; m – пористость пласта, % [41].

Таблица 1. Зависимость фактора сопротивления для осадкогелеобразующих составов (полиакриламида – 0,05 %, гидроксид натрия NaOH – 0,1; 0,12; 0,25; 0,75 %, растворитель) от скорости фильтрации

Table 1. Dependence of the resistance factor for sediment-gelling compositions (polyacrylamide – 0,05%, sodium hydroxide NaOH – 0,1; 0,12; 0,25; 0,75%, solvent) on filtration rate

Скорость фильтрации, 10 ⁻⁴ м/с Filtration speed, 10 ⁻⁴ m/s	Тип растворителя/Solvent type							
	Дистиллированная вода/Distilled water				Пресная вода/Fresh water			
	Концентрация щелочи/Alkali concentration							
	0,1	0,12	0,25	0,75	0,1	0,12	0,25	0,75
	Фактор сопротивления/Resistance factor							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,15	–	–	–	–	–	–	–	12
0,3	–	–	–	–	–	17	–	10
0,5	5,5	5,16	4,5	4,09	–	–	18	7,75
0,7	–	–	–	–	21,5	12,5	–	–
0,85	–	–	–	–	16,75	11,2	14,25	7,25
1	5	4,82	4,12	3,8	–	–	12	–
1,2	4,62	4,46	3,85	3,6	13,25	9,25	8,75	–
1,6	–	–	–	–	11	8	6,75	6,25
2	4,36	4,18	3,62	3,4	9	7	–	–
2,6	4,13	4	3,46	3,26	8	6	–	–
2,8	–	–	–	–	8	–	5,05	6,25
3,2	4	3,82	3,3	3,09	–	–	–	–
3,7	–	–	–	–	–	5,2	4,5	6,25
4,2	3,82	3,6	3,13	3	–	–	–	–
4,5	3,75	3,58	3,1	2,9	–	4,75	–	6,25
5,5	3,7	3,52	3,03	2,89	–	–	–	–
5,9	3,7	3,5	3,01	2,88	–	–	–	–
6	–	3,5	3	2,88	–	–	–	–
7	–	–	3	2,87	–	–	–	–

Результаты, представленные в виде кривых течения и кажущейся вязкости, демонстрируются на рис. 2–4, а результаты обработки, основанные на степенном законе ОГС, – в табл. 2 [42–44].

Как показал анализ полученных данных (рис. 2–4, табл. 2), ОГС в пористой зоне похожи на псевдопластические жидкости ($n < 1$ см, табл. 2).

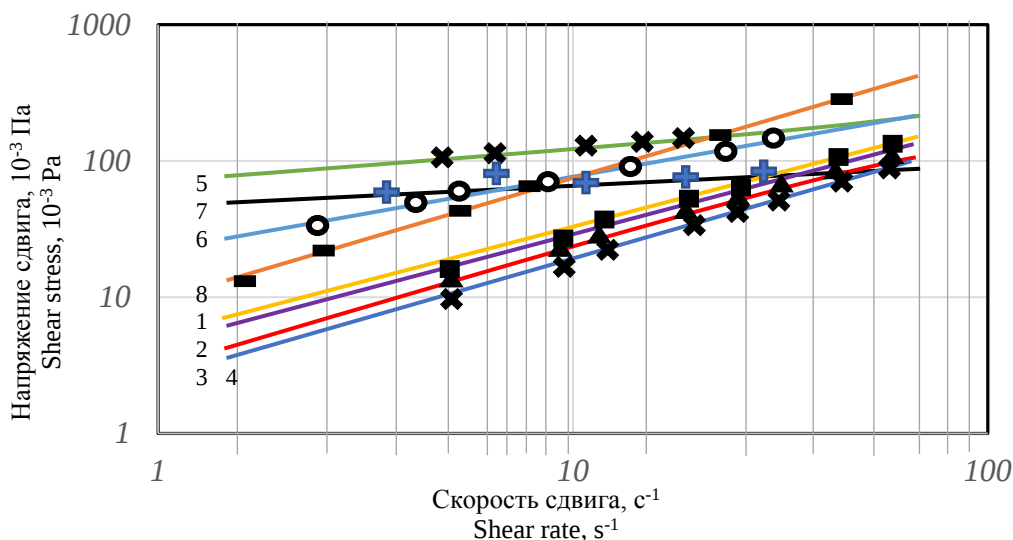


Рис. 2. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для осадкогелеобразующих составов на основе полиакриламида концентрацией 0,05 % и NaOH в различных растворителях при их движении через пористые среды: а) в дистиллированной воде с концентрацией NaOH, %: 1 – 0,1; 2 – 0,12; 3 – 0,25; 4 – 0,75; б) в пресной воде с концентрацией NaOH, %: 5 – 0,1; 6 – 0,12; 7 – 0,25; 8 – 0,75

Fig. 2. Dependence of shear stress on shear rate for sediment-gelling compositions based on polyacrylamide with a concentration of 0,05% and NaOH in various solvents during their movement through porous media: а) in distilled water with NaOH concentration, %: 1 – 0,1; 2 – 0,12; 3 – 0,25; 4 – 0,75; б) in fresh water with NaOH concentration, %: 5 – 0,1; 6 – 0,12; 7 – 0,25; 8 – 0,75

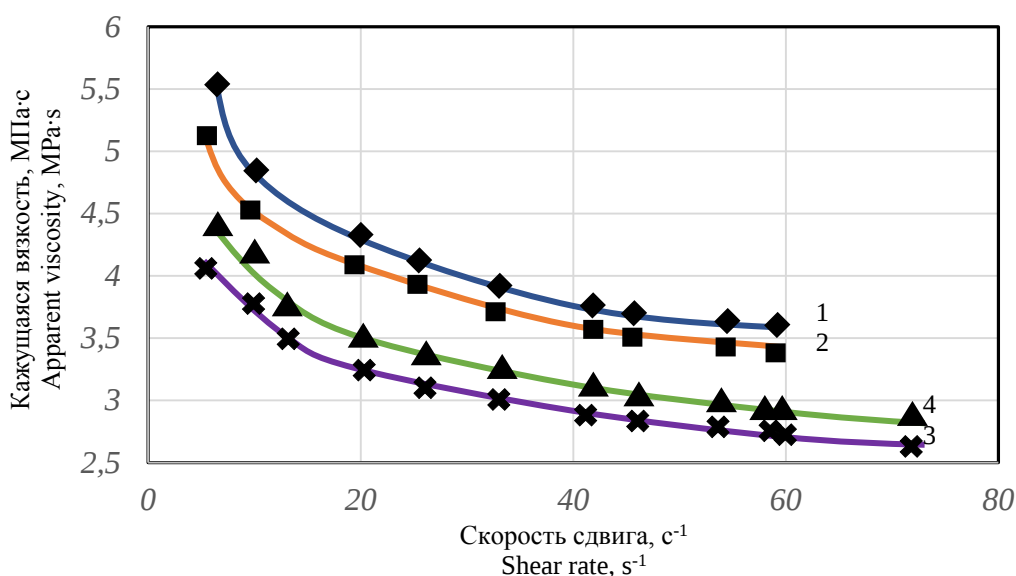


Рис. 3. Зависимость кажущейся вязкости осадкогелеобразующих составов на дистиллированной воде от скорости сдвига при фильтрации через пористую среду и содержании в его составе полиакриламида 0,05 % и едкого натра, %: 1 – 0,1; 2 – 0,12; 3 – 0,25; 4 – 0,75

Fig. 3. Dependence of the apparent viscosity of sediment-gelling compositions in distilled water on the shear rate during filtration through a porous medium and the content of polyacrylamide 0,05% and caustic soda in its composition, %: 1 – 0,1; 2 – 0,12; 3 – 0,25; 4 – 0,75

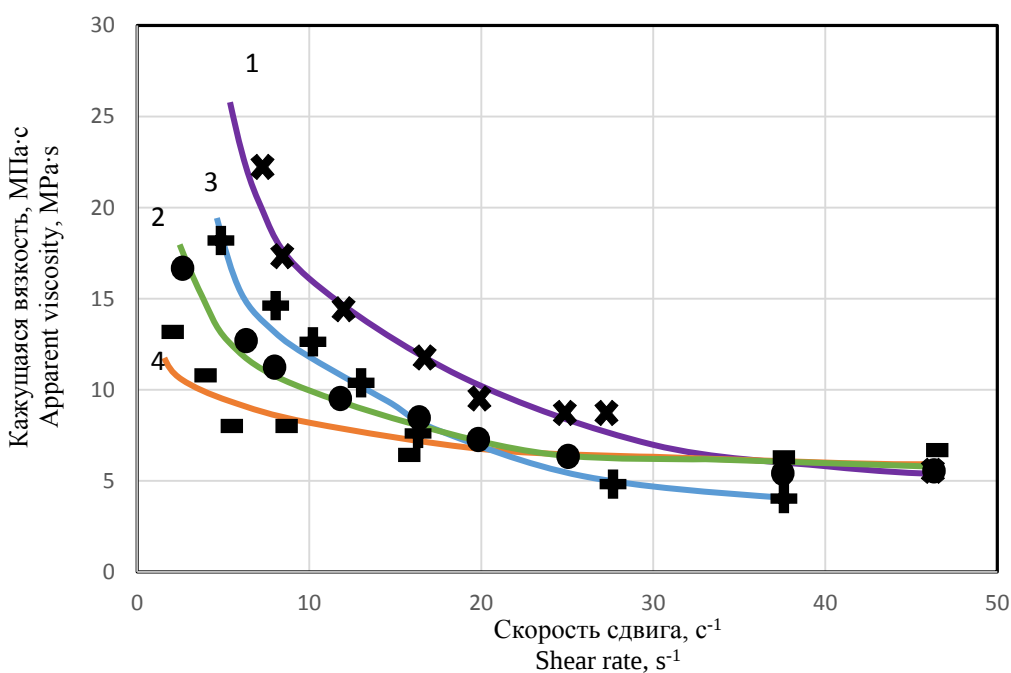


Рис. 4. Зависимость кажущейся вязкости осадкогелеобразующих составов на пресной воде от скорости сдвига при фильтрации через пористую среду и содержании в его составе полиакриламида 0,05 % и едкого натра, %: 1 – 0,1; 2 – 0,12; 3 – 0,25; 4 – 0,75

Fig. 4. Dependence of the apparent viscosity of sediment-gelling compositions in fresh water on the shear rate during filtration through a porous medium and the content of polyacrylamide 0,05% and caustic soda in its composition, %: 1 – 0,1; 2 – 0,12; 3 – 0,25; 4 – 0,75

Таблица 2. Зависимость характера течения осадкогелеобразующих составов (полиакриламида, NaOH, растворитель) в пористой среде от концентрации полимера, щелочи и типа растворителя

Table 2. Dependence of the nature of the flow of sediment-gelling compositions (polyacrylamide, NaOH, solvent) in a porous medium on the concentration of the polymer, alkali, and type of solvent

Осадкогелеобразующие составы Sediment-gelling compounds		Тип растворителя Solvent type			
Концентрация Concentration, %		Дистиллированная вода Distilled water		Пресная вода Fresh water	
Полиакриламид Polyacrylamide	NaOH	Реологические константы Rheological constants			
		<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
0,05	0,1	7,1819	0,8331	79,377	0,2951
	0,12	6,849	0,8337	31,092	0,508
	0,25	5,8957	0,8354	62,282	0,2531
	0,75	5,2206	0,8538	11,756	0,8108

При сопоставлении полученных данных (рис. 3) видно, что кажущаяся вязкость ОГС в пористой среде будет выше, чем вискозиметрическая при одинаковых скоростях сдвига [45, 46].

Сдвиговые деформации определяются изменениями концентрации щелочи и полимера в осадочных гелеобразующих соединениях. Характер взаимодействия осадочных гелеобразующих соединений с пористой средой играет существенную роль в определении особенностей течения [47].

Более высокий коэффициент стойкости осадочных гелеобразующих композиций в пресной воде по сравнению с дистиллированной водой виден из табл. 2, а более высокая кажущаяся вязкость видна из рис. 3, 4.

Проведенные исследования в работах [48–51] показали, что увеличение коэффициента стойкости препаратов на основе полимеров и щелочей в пресной воде связано с конформационными изменениями макромолекул полимера.

Уменьшение фактора сопротивления для ОГС как на дистиллированной, так и на пресной воде с увеличением концентрации щелочи в растворе может быть объяснено снижением размеров макромолекул и их ассоциаций [52–55].

Заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований особенностей фильтрации осадкообразующих составов через пористые среды и дополнительной литературы показал, что особенности течения осадочных гелеобразующих соединений через пористые среды связаны с конформационными изменениями макромолекул и их ассоциаций, вызванными сдвиговыми деформациями. При фильтрации этих соединений через пористую среду необходимо соблюдать динамическое равновесие между количеством удерживаемого осадка и осадка, вымываемого из пористой среды. Причем это равновесие будет поддерживаться с неравномерным количеством удерживаемого осадка в зависимости от скорости фильтрации.

После проведенных исследований можно отметить, что поведение осадкогелеобразующих составов в пористых средах определяется по конформационным изменениям макромолекул полимера, которые зависят от содержания щелочи и полимера в составе, от минерализации растворителя и вод, насыщающих пористую среду, от скорости фильтрации и взаимодействия осадкогелеобразующих составов с пористой средой (результаты экспериментов убедительно показаны графически, согласно проведенным экспериментам). По нашим предположениям уменьшение фактора сопротивления для осадкогелеобразующих составов как на дистиллированной, так и на пресной воде с увеличением концентрации щелочи в растворе может быть объяснено снижением размеров макромолекул и их ассоциаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Revisiting the development of oil deposits with low permeability reservoirs / S.N. Zakirov, A.A. Barenbaum, E.S. Zakirov, I.M. Indrupskiy, V.A. Serebryakov, D.S. Klimov // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – № 42. – P. 104219. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i42/104219.
2. Сулейманов Б.А., Гурбанов А.Г., Тапдыгов Ш.З. Изоляция водопритока в скважину термоактивной гелеобразующей композицией // SOCAR Proceedings. – 2022. – № 4. – С. 21–26. DOI: 10.5510/OGP20220400779.
3. Challenges in characterization of residual oils. A review / D. Stratiev, I. Shishkova, A. Pavlova, I. Tankov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 178. – P. 227–250.
4. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs, Canada / F.F. Chang, T. Love, C.J. Affeld, J.B. Blevins, R.L. Thomas, D.K. Fu // Annual Technical Journal and Exhibition. – 2021. – Vol. 11. – P. 37–48.
5. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology, Canada // Journal of petroleum technology. – 2022. – Vol. 121. – P. 457–458.
6. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique, Texas // Journal of Drilling&Completion. – 2022. – Vol. 12. – P. 77–89.
7. Taylor D., Kumar P.S. Viscoelastic surfactant based selfdiverting acid for enhanced stimulation in carbonate reservoirs, India // The latest ways to increase oil production. – 2018. – Vol. 58. – P. 667–668.

8. Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861.
9. He J.G., Song K.P., Yang J. Study on experiment of advance water injection an example from low permeability oil reservoir of Fuyu oil reservoir in an oil field // Science Technology and Engineering. – 2014. – Vol. 14. – № 11. – P. 181–183.
10. Кондаков А.П., Гусев С.В., Нарожный О.Г. Результаты большеобъемных обработок призабойной зоны нагнетательных скважин месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 74–77.
11. Результаты и перспективы применения осадкогелеобразующих составов для увеличения нефтеотдачи пласта АС 4-8 Федоровского месторождения / Ф.Ю. Алдакимов, С.В. Гусев, В.Ю. Огорельцев, Е.О. Гребенкина // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 5. – С. 87–89.
12. Демьяненко Н.А., Повжик П.П., Ткачев Д.В. Технологии интенсификации добычи нефти. Перспективы и направления развития. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2021. – 288 с.
13. Investigating the Necessity of Developing the Self-Diverting Emulsified Acid (SDEA) system for stimulation of a middle-eastern carbonate reservoir / H. Jafarpour, J. Moghadasi, D.G. Petrakov, A. Khormali // Conference Paper, the 8th EAGE international conference and exhibition, Saint Petersburg. – 2018. – P. 1–5. URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91543> (дата обращения 30.04.2024).
14. Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
15. Nsoga V.N., Hona J., Pemha E. Numerical simulation of heat distribution with temperature-dependent thermal conductivity in a two-dimensional liquid flow // International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation. – 2017. – Vol. 18. – № 6. – P. 507–513.
16. Leong Van Hong, Hisham Ben Mahmud. A preliminary screening and characterization of suitable acids for sandstone matrix acidizing technique: a comprehensive review // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2019. – № 9. – P. 753–778.
17. Albuquerque M., Smith Ch. Eight success cases of VDA application in large limestone reservoir in the Caspian region, Texas // Journal of Petroleum and Mining Engineering. – 2018. – Vol. 21. – P. 171–175.
18. Alleman D., Qi Qu, Keck R. The development and successful field use of viscoelastic surfactant-based diverting agents for acid stimulation, Texas // International Journal of Oilfield Chemistry. – 2020. – Vol. 01. – P. 45–48.
19. Хабибуллин М.Я., Сулейманов Р.И. Повышение надежности сварных соединений трубопроводов в системе поддержания пластового давления // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 93–98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98.
20. Acid placement: an effective VES system to stimulate high-temperature carbonate formations, Qatar / A.M. Goma, J. Cutler, Qu Qi, E. Cawiezel Kay // International Production and Operations Exhibition. – 2019. – Vol. 558. – P. 6–18.
21. Zhou Fujian, Liu Yuzhang, Zhang Shaoli. A novel diverting acid stimulation treatment technique for carbonate reservoirs, China // Oil industry development prospects China. – 2019. – Vol. 912. – P. 1637–1668.
22. Wenye S., Mun-Hong H. Forecasting and uncertainty quantification for naturally fractured reservoirs using a new dataspace inversion procedure // 15th Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR). – Amsterdam, Netherlands: European Assoc. Geoscientists & Engineers Computational geosciences. – 2017. – Vol. 21. – № 5–6. – P. 1443–1458.
23. Хабибуллин М.Я. Метод термодисперсионного импульсирования для увеличения нефтеотдачи // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 58–64. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-58-64.
24. Лесин В.И. Фрактальная теория вязкости неньютоновской нефти, основанная на учете взаимодействия коллоидных частиц: обзор и новые результаты // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2021. – Вып. 1 (32). – С. 26–46. DOI: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-32.art3>.
25. Effect of chemical additives on dynamic capillary pressure during waterflooding in low permeability reservoirs / H. Li, Y. Li, K. Wang, H. Luo, S. Chen, J. Guo // Energy and Fuels. – 2016. – № 9. – P. 7082–7093.
26. Rogachev M., Kondrashev A. Experiments of fluid diversion ability of a new waterproofing polymer solution // Shiyu Kantan Yu Kaifa. – 2015. – Vol. 42. – № 4. – P. 507–511.
27. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Novosibirsk, 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024.
28. Experimental study on the mechanism of enhancing oil recovery by polymer – surfactant binary flooding / W. Liu, Y. Wei, W. Jiang, L. Luo, G. Liao, L. Zuo // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – Vol. 44. – № 4. – P. 636–643.
29. Гумерова Г.Р., Ярковская Н.Р. Анализ эффективности применения вязкоупругого поверхностно-активного состава на месторождениях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 19–25.
30. Effect of emulsification on surfactant partitioning in surfactant-polymer flooding / J. Li, R. Jia, W. Liu, L. Sun, S. Cong, Y. Yang, J. Zhang // Journal of Surfactants and Detergents. – 2019. – Vol. 22. – № 6. – P. 1387–1394.
31. Rogachev M.K., Kondrashev A.O. Rheological studies of waterproof polymeric compounds under high pressure and temperature // Life Science Journal. – 2014. – Vol. 11. – № 6. – P. 294–296.
32. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054.
33. Свалов А.М. О правомерности существующего теоретического обоснования технологии циклического заводнения продуктивных пластов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 6 (354). – С. 57–60. DOI: [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-6\(354\)-57-60](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-6(354)-57-60).

34. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В. Прогноз прорыва воды при заводнении в условиях неустойчивости фронта вытеснения нефти водой // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 3. – С. 58–67. DOI: 10.5510/OGP20230300887.
35. On modeling of non-stationary two-phase filtration / V.A. Korotenko, S.I. Grachev, N.P. Kushakova, S.A. Leontiev, M.I. Zaboeva, M.A. Aleksandrov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – P. 012016.
36. Фильтрация жидкостей в аномальных коллекторах / С.И. Грачев, В.А. Коротенко, Н.П. Кушакова, А.Б. Кряквин, О.П. Зотова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 104–113.
37. Khabibullin M.Ya. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013.
38. Грачев С.И., Коротенко В.А., Кушакова Н.П. Исследование влияния трансформации двухфазной фильтрации на формирование зон невыработанных запасов нефти // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 68–82.
39. Махад А.О. Особенности осадкогелеобразующих технологий увеличения нефтеотдачи пластов // Научный журнал. – 2016. – № 11 (12). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-osadkogeleobrazuyuschih-tehnologiy-uvelicheniya-nefteotdachi-plastov> (дата обращения: 16.02.2023).
40. Брудник И.М., Латыпов А.Г. Физико-химическая совместимость неионогенных поверхностно-активных веществ и минеральных масел как критерий образования стабильных эмульсий прямого типа // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 2. – С. 99–103. DOI: 10.5510/OGP20230200851.
41. Корчагин М.С., Иванчишин В.В. Гидродинамические методы увеличения нефтеотдачи // Молодой ученый. – 2021. – № 15 (357). – С. 72–75.
42. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding // Journal of Physics: Conference Series. Information Technologies in Business and Industry: International Conference. 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. – 2019. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
43. Подопригра Д.Г., Бязров Р.Р., Христич Е.А. Текущий уровень и перспективы развития технологий большеобъемных закачек с использованием полимеров для повышения нефтеотдачи // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. DOI: 10.15862/37NZVN222 URL: <https://esj.today/PDF/37NZVN222.pdf> (дата обращения 30.04.2024).
44. Davarpanah A., Nassabeh M.M. Recommendations for optimizing the efficiency of polymer flooding techniques in production operation of an oilfield // Electronic Journal of Biology. – 2017. – Vol. 13 (3). – P. 210–213.
45. Decision making during treatment of bottomhole zone by polymeric systems on the basis of indefinite cluster analysis / T.Sh. Salavatov, A.S. Strekov, M.K. Karazhanova, B.N. Koylibayev // International conference on soft computing, computing with words and perceptions, ICSCCW. – Hungary, Budapest, 2017, 24–25 August. – P. 22–23.
46. Эффективное применение потокоотклоняющей технологии на основе гелеполимерных составов в горизонтальных скважинах / Т.А. Исмагилов, И.М. Ганиев, А.В. Сорокин, Н.С. Резник, С.И. Эдель // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 117–121.
47. Khabibullin M.Ya. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes // Journal of Physics: Conference Series. Information Technologies in Business and Industry: International Conference. – 2019. – P. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012.
48. Galimullin M.L., Khabibullin M.Ya. Experience with sucker-rod plunger pumps and the latest technology for repair of such pumps // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 55. – № 11–12. – P. 896–901. DOI: 10.1007/s10556-020-00710-1.
49. Zhou Fujian, Liu Yuzhang, Zhang Shaoli. A novel diverting acid stimulation treatment technique for carbonate reservoirs, China // Oil industry development prospects China. – 2019. – Vol. 912. – P. 1637–1668.
50. Рогов Е.А. Исследование проницаемости призабойной зоны скважин при воздействии технологическими жидкостями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 169–174. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.169 EDN: RPCFXR.
51. Increasing the stimulation efficiency of heterogeneous carbonate reservoirs by developing a multi-batched acid system / H. Jafarpour, J. Moghadasi, A. Khormali, D.G. Petrakov, R. Ashena // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – № 172. – P. 50–59. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410518307897> (дата обращения 30.04.2024).
52. Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
53. Rady A. Iron precipitation in calcite, dolomite and sandstone cores // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/176574-MS> (дата обращения: 24.12.2020).
54. Rabie A.I. Sodium gluconate as a new environmentally friendly iron-controlling agent for HP/HT acidizing treatments // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/172640-MS> (дата обращения: 24.12.2020).
55. Поурморад С., Аббаси С., Моханти А. Геохимический анализ осадочных отложений юго-западной части Ирана: происхождение и влияние на окружающую среду // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 4. – С. 13–30. DOI: 10.5510/OGP20230400912.

Информация об авторе

Марат Яхиевич Хабибуллин, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Октябрьский), Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а. m-hab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2565-0088>

Поступила в редакцию: 13.05.2024

Поступила после рецензирования: 25.11.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Zakirov S.N., Barenbaum A.A., Zakirov E.S., Indrupskiy I.M., Serebryakov V.A., Klimov D.S. Revisiting the development of oil deposits with low permeability reservoirs. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, no. 42, pp. 104219. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i42/104219.
2. Suleymanov B.A., Gurbanov A.G., Tapdygov Sh.Z. Isolation of water inflow into a well with a thermoactive gel-forming composition. *SOCAR Proceedings*, 2022, no. 4, pp. 21–26. (In Russ.) DOI: 10.5510/OGP20220400779.
3. Stratiev D., Shishkova I., Pavlova A., Tankov I. Challenges in characterization of residual oils. A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 178, pp. 227–250.
4. Chang F.F., Love T., Affeld C.J., Blevins J.B., Thomas R.L., Fu D.K. Case study of a novel acid-diversion technique in carbonate reservoirs. *Annual Technical Journal and Exhibition*, 2021, vol. 11, pp. 37–48.
5. Paccaloni G., Tambini M. Advances in matrix stimulation technology. *Journal of petroleum technology*, 2022, vol. 121, pp. 457–458.
6. Paccaloni G. A new, effective matrix stimulation diversion technique. *Journal of Drilling & Completion*, 2022, vol. 12, pp. 77–89.
7. Taylor D., Kumar P.S., Fu D. Viscoelastic surfactant based selfdiverting acid for enhanced stimulation in carbonate reservoirs. *The latest ways to increase oil production*, 2018, vol. 58, pp. 667–668.
8. Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861.
9. He J.G., Song K.P., Yang J. Study on experiment of advance water injection an example from low permeability oil reservoir of Fuyu oil reservoir in an oil field. *Science Technology and Engineering*, 2014, vol. 14, no. 11, pp. 181–183.
10. Kondakov A.P., Gusev S.V., Narozhnyi O.G. Results of large-volume treatments of the bottom-hole zone of injection wells of Surgutneftegaz fields. *Oil industry*, 2016, no. 9, pp. 74–77. (In Russ.)
11. Aldakimov F.Iu., Gusev S.V., Ogoreltsev V.Iu., Grebenkina E.O. Results and prospects of using sedimentary rock-forming compounds to increase oil recovery of the AC 4-8 formation of the Fedorovskoye field. *Oil industry*, 2014, no. 5, pp. 87–89. (In Russ.)
12. Demyanenko N.A., Povzhik P.P., Tkachev D.V. *Technologies for intensifying oil production. Prospects and directions of development*. Gomel, GGTU im. P.O. Sukhoi Publ., 2021. 288 p. (In Russ.)
13. Jafarpour H., Moghadasi J., Petrakov D.G., Khormali A. Investigation of the need to develop a self-guided emulsified acid system (With DEA) for the development of a carbonate reservoir in the Middle East. *Conference Paper, the 8th EAGE international conference and exhibition*. St Petersburg, 2018. pp. 1–5. Available at: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91543> (accessed 30 April 2024).
14. Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoir fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
15. Nsoga V.N., Hona J., Pemha E. Numerical simulation of heat distribution with temperature-dependent thermal conductivity in a twodimensional liquid flow. *International Journal of nonlinear sciences and numerical simulation*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 507–513.
16. Leong Van Hong, Hisham Ben Mahmud. A preliminary screening and characterization of suitable acids for sandstone matrix acidizing technique: a comprehensive review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, no. 9, pp. 753–778.
17. Albuquerque M., Smith Ch. Eight success cases of VDA application in large limestone reservoir in the Caspian region. *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 21, pp. 171–175.
18. Alleman D., Qu Qi., Keck R. The Development and successful field use of viscoelastic surfactant-based diverting agents for acid stimulation. *International Journal of Oilfield Chemistry*, 2020, vol. 01, pp. 45–48.
19. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Improving the reliability of pipeline welded joints in the reservoir pressure maintenance system. *Oil and Gas Business*, 2019, vol. 17, no. 5, pp. 93–98. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2019-5-93-98.
20. Gomaa A.M., Cutler J., Qu Qi., Cawiezel K.E. Acid placement: an effective VES system to stimulate high-temperature carbonate formations. *International Production and Operations Exhibition*, 2019, vol. 558, pp. 6–18.
21. Zhou Fujian, Liu Yuzhang, Zhang Shaoli. A novel diverting acid stimulation treatment technique for carbonate reservoirs, China. *Oil industry development prospects China*, 2019, vol. 912, pp. 1637–1668.
22. Wenye S., Mun-Hong H. Forecasting and uncertainty quantification for naturally fractured reservoirs using a new data-space inversion procedure. *15th Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR)*. Amsterdam, Netherlands, European Assoc. Geoscientists & Engineers Computational geosciences, 2017. Vol. 21, no. 5–6, pp. 1443–1458.
23. Khabibullin M.Ya. The method of thermal acid pulse for increasing oil recovery. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 58–64. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2020-4-58-64.
24. Lesin V.I. Fractal theory of viscosity of non-Newtonian oil, based on taking into account the interaction of colloidal particles: review and new results. *Current problems of oil and gas*, 2021, no. 1 (32), pp. 26–46. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-32.art3>
25. Li H., Li Y., Wang K., Luo H., Chen S., Guo J. Effect of chemical additives on dynamic capillary pressure during waterflooding in low permeability reservoirs. *Energy and Fuels*, 2016, no. 9, pp. 7082–7093.
26. Rogachev M., Kondrashev A. Experiments of fluid diversion ability of a new waterproofing polymer solution. *Shiyu Kantan Yu Kaifa*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 507–511.
27. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, 2019. pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024.
28. Liu W., Wei Y., Jiang W., Luo L., Liao G., Zuo L. Experimental study on the mechanism of enhancing oil recovery by polymer – surfactant binary flooding. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 44, no. 4, pp. 636–643.
29. Gumerova G.R., Iarkeeva N.R. Analysis of the effectiveness of the use of viscoelastic surfactant in the fields of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 19–25. (In Russ.)
30. Li J., Jia R., Liu W., Sun L., Cong S., Yang Y., Zhang J. Effect of emulsification on surfactant partitioning in surfactant-polymer flooding. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2019, vol. 22, no. 6, pp. 1387–1394.
31. Rogachev M.K., Kondrashev A.O. Rheological studies of waterproof polymeric compounds under high pressure and temperature. *Life Science Journal*, 2014, vol. 11, no. 6, pp. 294–296.

32. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering*, 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054.
33. Svalov A.M. On the validity of the existing theoretical justification of the technology of cyclic flooding of productive formations. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2021, no. 6 (354), pp. 57–60. (In Russ.) Available at: [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-6\(354\)-57-60](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-6(354)-57-60)
34. Shakhverdiev A.Kh., Arefiev S.V. Forecast of water breakthrough during flooding in conditions of instability of the front of oil displacement by water. *SOCAR Proceedings*, 2023, no. 3, pp. 58–67. (In Russ.) DOI: 10.5510/OGP20230300887.
35. Korotenko V.A., Grachev S.I., Kushakova N.P., Leontiev S.A., Zaboeva M.I., Aleksandrov M.A. On modeling of non-stationary two-phase filtration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, pp. 012016.
36. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P., Kriakvin A.B., Zotova O.P. Filtration of liquids in abnormal reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 104–113. (In Russ.)
37. Khabibullin M.Ya. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013.
38. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P. Investigation of the effect of the transformation of two-phase filtration on the formation of zones of unprocessed oil reserves. *Notes of the Mining Institute*, 2020, vol. 241, pp. 68–82. (In Russ.)
39. Mahad Abdi Osman. Features of sedimentary gel-forming technologies for enhanced oil recovery. *Scientific journal*, 2016, no. 11 (12). (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-osadkogeobrazuyuschih-tehnologiy-uvelicheniya-nefteotdachi-plastov> (accessed 16 February 2023).
40. Brudnik I.M., Latypov A.G. Physico-chemical compatibility of nonionic surfactants and mineral oils as a criterion for the formation of stable direct-type emulsions. *SOCAR Proceedings*, 2023, no. 2, pp. 99–103. (In Russ.) DOI: 10.5510/OGP20230200851.
41. Korchagin M.S., Ivanchishin V.V. Hydrodynamic methods for enhanced oil recovery. *Young scientist*, 2021, no. 15 (357), pp. 72–75. (In Russ.)
42. Khabibullin M.Ya. Managing the reliability of the tubing string in impulse non-stationary flooding. *In the collection: Journal of Physics: Conference Series. International Conference. Information Technologies in Business and Industry. 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives*, 2019, pp. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052012.
43. Podoprigora D.G., Byazrov R.R., Khristich E.A. The current level and prospects for the development of technologies for pumping large volumes of oil using polymers to enhance oil recovery. *Bulletin of Eurasian Science*, 2022, vol. 14, no. 2. (In Russ.) Available at: <https://esj.today/PDF/37NZVN222.pdf> DOI: 10.15862/37NZVN222 (accessed 30 April 2024).
44. Davarpanah A., Nassabeh M.M. Recommendations for optimizing the efficiency of polymer flooding techniques in production operation of an oilfield. *Electronic Journal of Biology*, 2017, vol. 13 (3), pp. 210–213.
45. Salavatov T.Sh., Strekov A.S., Karazhanova M.K., Koylibayev B.N. Decision making during treatment of bottomhole zone by polymeric systems on the basis of indefinite cluster analysis. *International conference on soft computing, computing with words and perceptions, ICSCCW*. Budapest, Hungary, 2017, 24–25 August. pp. 22–23.
46. Ismagilov T.A., Ganiev I.M., Sorokin A.V., Reznik N.S., Edel S.I. Efficient application of flow-diverting technology based on gel-polymer compositions in horizontal wells. *Neftianoe khoziaistvo*, 2017, no. 12, pp. 117–121. (In Russ.)
47. Khabibullin M.Ya. Managing the processes accompanying fluid motion inside oil field converging-diverging pipes. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference. Information Technologies in Business and Industry*, 2019, pp. 042012. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042012.
48. Galimullin M.L., Khabibullin M.Ya. Experience with sucker-rod plunger pumps and the latest technology for repair of such pumps. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, vol. 55, no. 11–12, pp. 896–901. DOI: 10.1007/s10556-020-00710-1.
49. Zhou Fujian, Liu Yuzhang, Zhang Shaoli. A novel diverting acid stimulation treatment technique for carbonate reservoirs in China. *Oil industry development prospects China*, 2019, vol. 912, pp. 1637–1668.
50. Rogov E.A. Investigation of the permeability of the bottomhole zone of wells under the influence of process fluids. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 242, pp. 169–174. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2020.2.169 EDN: RPCFXR.
51. Jafarpour H., Moghadasi J., Khormali A., Petrakov D.G., Ashena R. Increasing the effectiveness of exposure to heterogeneous carbonate reservoirs through the development of a multicomponent acid system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, no. 172, pp. 50–59. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410518307897> (accessed 30 April 2024).
52. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Oil and Gas Business*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. (In Russ.) DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
53. Rady A. Iron deposition in calcite, dolomite and sandstone cores. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/176574-MS> (accessed 24 December 2020).
54. Rabie A.I. Sodium gluconate is a new environmentally friendly agent that controls the iron content for acidifying treatments of HP/HT. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.2118/172640-MS> (accessed: 24 December 2020).
55. Pourmorad S., Abbasi S., Mohanty A. Geochemical analysis of sedimentary deposits of the southwestern part of Iran: origin and impact on the environment. *SOCAR Proceedings*, 2023, no. 4, pp. 13–30. (In Russ.) DOI: 10.5510/OGP20230400912.

Information about the author

Marat Ya. Khabibullin, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky), 54a, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452607, Russian Federation. m-hab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2565-0088>.

Received: 13.05.2024

Revised: 25.11.2024

Accepted: 19.03.2025

УДК 550.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5013
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Влияние акустических характеристик горных пород на ёмкостные параметры коллектора

М.О. Коровин^{1✉}, А.О. Алеева^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² АО «ТомскНИПИнефть», Россия, г. Томск

✉ korovinmo@hw.tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости продолжить изучение закономерностей распределения физических свойств горных пород по площади и сопоставить с ранее проведёнными исследованиями по анализу распределения плотности горных пород. Общепринятые подходы подразумевают осреднение констант, которые являются ключевыми при расчёте фильтрационно-ёмкостных свойств. Небольшое количество фактических данных, малый вынос керна, упрощения приводят к менее детальному учёту параметров, хотя компьютерные мощности позволяют это делать. В дальнейшем это сказывается на фильтрационной модели, когда уже отсутствует понимание, где могут появиться ошибки и неточности при сопоставлении модельных и исторических данных добычи. *Цель:* создать карту распределения интервального времени пробега продольных волн по данным лабораторных исследований керна. Сформировать представление о закономерностях распределения интервального времени по площади. Обозначить области пониженных и повышенных значений. Охарактеризовать степень вариации коэффициента пористости при сопоставлении со значениями коэффициента пористости. *Объект:* нефтенасыщенный пласт терригенного состава месторождения Томской области. *Методы.* Дополнение базы распределённых зависимостей новыми параметрами позволяет сформировать более полное и детальное представление о продуктивных пластах. Производится анализ керновых исследований по скважинам, а также сравнение с распределением ранее выявленных закономерностей. Взаимосвязь между данными по общему объёму скважин также формируется для выявления степени дисперсии выборки. В итоге демонстрируется карта распределения интервального времени пробега ультразвуковых волн для наглядного представления о результатах исследования, и в дополнение приводится карта распределения плотности скелета из предыдущих исследований. Анализируются распределения не только отдельных физических характеристик, но и их взаимная дифференциация по площади.

Ключевые слова: петрофизические зависимости, скорость пробега упругих волн, интервальное время пробега, коэффициент пористости, карта распределения петрофизического параметра, вариативность параметров

Для цитирования: Коровин М.О., Алеева А.О. Влияние акустических характеристик горных пород на ёмкостные параметры коллектора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 127–135. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5013

UDC 550.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5013

Rock acoustic properties impact on reservoir capacity

M.O. Korovin^{1✉}, A.O. Aleeva^{1,2}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² TomskNIPIneft JSC, Tomsk, Russian Federation

✉ korovinmo@hw.tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to continue studying the patterns of distribution of physical properties of rocks by area and compare with previously conducted studies on the analysis of the distribution of rock density. Generally accepted approaches imply averaging constants, which are key in calculating the filtration-capacitive properties. A small amount of actual data,

small core removal, simplifications lead to less detailed accounting of parameters, although computer power allows this to be done. In the future, this affects the filtration model, when there is no longer an understanding of where errors and inaccuracies can appear when comparing model and historical production data. **Aims.** To create a map of the distribution of the interval travel time of longitudinal waves based on laboratory core studies. To form an idea of the patterns of interval time distribution by area. To designate areas of low and high values. To characterize the degree of variation of the porosity coefficient when compared with the values of the porosity coefficient. **Object.** Oil-saturated formation of terrigenous composition of the field in the Tomsk region. **Methods.** Supplementing the distributed dependency database with new parameters allows us to form a complete and more detailed picture of productive formations. Core analysis is performed by wells, as well as a comparison with the distribution of previously identified patterns. The relationship between the data on the total volume of wells is also formed to identify the degree of dispersion of the sample. Ultrasonic waves interval time distribution resulted in map and in addition matrix density from previous study is also provided for comparison. Individual physical characteristics distribution is analyzed in parallel with their mutual interrelations.

Keywords: petrophysical dependencies, elastic wave speed, travel time, porosity coefficient, petrophysical parameter distribution map, parameter variability

For citation: Korovin M.O., Aleeva A.O. Rock acoustic properties impact on reservoir capacity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 127–135. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5013

Введение

Лабораторные исследования керна являются источником ценной информации для дальнейших этапов моделирования, и самое главное – для понимания закономерностей между параметрами.

Сложность строения и состава продуктивных пластов приводит к необходимости выявления дополнительных взаимосвязей между физическими и коллекторскими свойствами пород. Целесообразно начать анализ изменения фильтрационно-ёмкостных свойств с коэффициента пористости как с ключевого параметра, который используется при расчёте остальных фильтрационно-ёмкостных свойств пластов-коллекторов [1–4].

Геологические особенности объекта исследования

Как показывает практика, петрофизические расчёты целесообразно проводить с учётом геологических особенностей строения пластов. Из априорной информации о месторождении известно, что песчано-алевритовые толщи составляют основной целевой пласт. Наблюдается различная степень сортировки, глинизации, карбонатизации. Также в пределах контура нефтеносности отмечены линзы, осложнённые литологическими и капиллярными особенностями строения. Само месторождение относится к категории сложнопостроенных с неоднородностью по площади. Пласт Ю₁^{1–2} в составе надугольной пачки верхневасюганской подсвиты является непосредственным объектом исследования [5].

Предпосылки формирования петрофизических взаимосвязей типа «кern–кern»

С внутренним строением вещества связан параметр упругости. При этом саму упругость можно охарактеризовать через скорость распространения упругих волн. А в дальнейшем через упругость переходят к механическому сопротивлению формы

(твёрдые тела) и объёма или же только объёма (газы, жидкости) под влиянием механических напряжений. Первое вступление импульсной ультразвуковой волны служит маркером, по которому определяют скорость упругих продольных волн. Для этого образец прозвучивается с двух торцов аксиально-поляризованными датчиками. Либо проводится профилирование по разным поверхностям образца, либо используется резонансная частота колебаний образца. К торцам образца (2) при прозвучивании прижимают излучатель и приёмник (1) (рис. 1) [6].

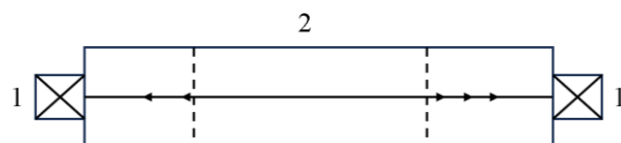


Рис. 1. Схема расположения пьезоэлементов при измерении скоростей упругих волн и поглощения способами многократных отражений: 1 – излучатель и приёмник, 2 – горная порода [6]

Fig. 1. Schematic diagram of the arrangement of piezoelectric elements when measuring the velocities of elastic waves and absorption by multiple reflection methods: 1 – signal source and receiver, 2 – rock sample [6]

Скорость распространения продольной волны можно вычислить, если известна длина образца и время пробега ультразвуковой волны через образец

$$V_p = S_p / t,$$

где V_p – скорость продольной ультразвуковой волны (м/с); S_p – расстояние, пройденное продольной ультразвуковой волной (м); t – время, за которое продольная волна прошла от источника до приёмника (с).

В минералах диапазон изменения скорости пробега продольных волн очень широк (2000–18000 м/с). Изменения могут быть также существенными в случае наличия двух и более элементов в составе минералов. При этом взаимосвязь между скоростью и массой атомов, а также структурным фактором продолжает существовать. Исследователи также отмечают влияние анизотропии скорости волн, которая обусловлена неоднородностью сил связей между молекулами и атомами [7].

Динамическая теория насыщенных жидкостью деформируемых пористых пластов с жёстким скелетом является основной при выявлении закономерностей распространения упругих волн в пористых средах и изучается многими исследователями [8–15].

В осадочных породах, особенно если они насыщены жидким флюидом, на скорость влияют изменение объёма флюида от напряжения и коэффициент пористости. Стартовые значения влияющих факторов определяют степень изменения скорости. Дополнительно влияние оказывает компонентный состав скелета, или сжимаемость твёрдой фазы. При уменьшении пористости породы влияние сжимаемости усиливается.

Для осадочных пород характерен широкий диапазон изменения скорости прохождения волн в зависимости от разуплотнённых песчано-глинистых пород (300 м/с) до хорошо сцементированных или карбонатных отложений (6000–7000 м/с).

Акустические параметры кернового материала

Акустические исследования образцов керна позволяют сформировать модели различного направления и сложности. В текущем наборе данных присутствует только скорость пробега продольных волн. Эти данные можно использовать для определения взаимосвязи между скоростью и коэффициентом пористости. Рассмотрим наглядный пример (рис. 2).

В данном случае скорость пробега продольной волны в матрице, исходя из уравнения, будет составлять 4,7825 км/с, а интервальное время пробега продольной волны в матрице – 209,1 мкс/м ($1000/4,7825=209,1$). Получившееся значение говорит о небольшой степени разуплотнённости породы, если сравнивать с теоретическим значением для песчаника, равным 170 мкс/м. Таким образом, при стандартной интерпретации для всего пласта будет применяться единое значение для предварительного анализа свойств пород и вычисления коэффициента пористости. Возможные риски такого подхода – отсутствие учёта изменчивости литолого-минералогического состава пород в пространстве. Упрощённые, синтетические или однородные среды – самые подходящие для дальнейшего использования единых коэффициентов. При детальном рассмотрении ситуация немного видоизменяется (рис. 3).

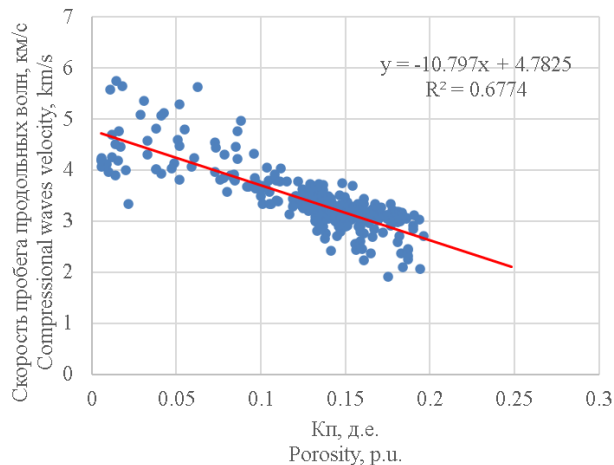


Рис. 2. Зависимость скорости пробега продольных волн от коэффициента пористости по керну. Данные по всем скважинам

Fig. 2. Compressional waves velocity vs core porosity. All wells datasets

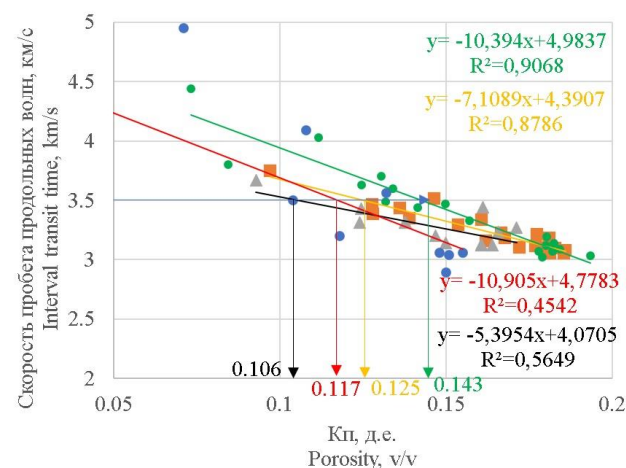


Рис. 3. Зависимость интервального времени пробега продольных волн от коэффициента пористости по керну. Данные по отдельным скважинам (каждый цвет соответствует одной скважине)

Fig. 3. Interval transit time vs core porosity. Separate wells datasets (each color fits one well)

При анализе рис. 3 получается, что пористость, вычисляемая через сформированные уравнения, составляет 0,106; 0,117; 0,125 и 0,143 д. е. Наблюдаются довольно большие различия в значениях. Необходимо заметить, что интервальное время пробега во флюиде в данных расчётах не используется. Этот параметр зависит от минерализации пластовой воды, пластовой температуры и пластового давления и варьируется приблизительно от 500 до 750 мкс/м, тем самым может значительно влиять на коэффициент пористости.

Интервальное время пробега волны в безпористой породе варьируется от 150 до 190 мкс/м

(рис. 3). При уменьшении этого параметра и неизменных величинах интервального времени в породе и жидкости наблюдается увеличение коэффициента пористости. Если использовать усреднённое значение интервального времени пробега в безпористой породе, эквивалентное 170 мкс/м, и при вариации этой величины до 150 и 190 мкс/м коэффициент пористости изменяется от 14 до 21,3 %, соответственно. Такие значения будут формироваться при интервальном времени пробега в жидкости,

равном 620 мкс/м, и уравнении вычисления коэффициента пористости (таблица, рис. 4):

$$K_p = (\Delta t - \Delta t_m) / (\Delta t_f - \Delta t_m), \quad (1)$$

где K_p – коэффициент пористости, д. е.; Δt_m – интервальное время продольной волны в идеализированной непористой моно- или поликристаллической породе, мкс/м; Δt_f – интервальное время продольной волны в поровой жидкости, мкс/м (принято равным 620); Δt – интервальное время продольной волны в породе, мкс/м (принято равным 250).

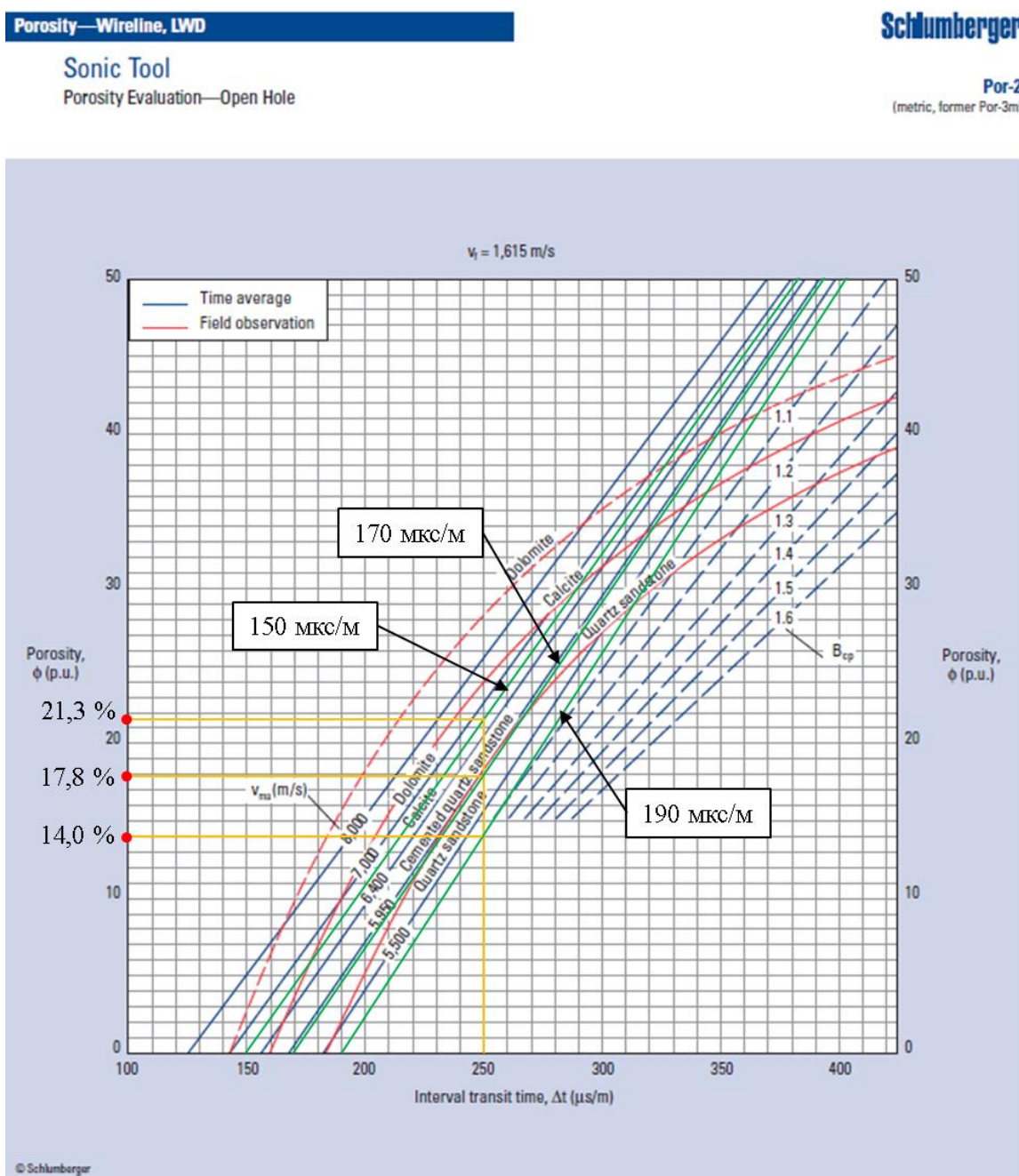


Рис. 4. Вычисление коэффициента пористости (палетка Por-2 Schlumberger)

Fig. 4. Porosity coefficient calculation (chart Por-2 Schlumberger)

Таблица. Сопоставление полученных значений коэффициента пористости

Table. Porosity coefficients comparison

Δt_m , мкс/м ($\mu\text{s}/\text{m}$)	Δt , мкс/м ($\mu\text{s}/\text{m}$)	K_p , д.е. Porosity, v/v	Δ , %
200	250	0,119	0,220
210	250	0,098	0
215	250	0,086	0,114

На стадии изучения лабораторных исследований керна становится видно, что акустические параметры и связанные с ними фильтрационно-ёмкостные характеристики варьируются в довольно большом диапазоне для разных скважин.

Деформации вида «растяжение–сжатие» в газах, жидкостях, твёрдых телах формируют упругие волны, которые характеризуются скоростью, а в дальнейшем и временем пробега.

Интервальное время пробега в скелете (Δt_m) используется в качестве настроечной константы. С помощью неё можно контролировать расчёты, и, как правило, она неизменна в пределах одного пласта [6]. Через экспериментальные данные, как правило, определяются усреднённые значения для набора литотипов пород. При этом используются не минералы, так как с литотипом определиться гораздо проще, чем с минеральным составом. Вместе с тем алевролиты, рыхлые и сцементированные песчаники зачастую охарактеризованы временным диапазоном от 170 до 182 мкс/м, а минералы в их составе при этом могут быть идентичные. В итоге используется усреднённое значение интервального времени пробега, с помощью которого в дальнейшем вычисляется коэффициент пористости.

Взаимосвязь интервального времени пробега и коэффициента пористости описывается различными уравнениями. Это зависит от наличия исходных данных [16–20]. В классическом подходе применяется уравнение среднего времени, или уравнение Вилли (1). Так происходит по причине наличия исходных данных, особенно если их немного или приходится использовать допущения. Уравнение используют на глубинах 2,5–3,5 км для пород с хорошей степенью цементированности, а также насыщенных нефтью или водой [21].

Состав породы, тип цемента, глубина залегания – это основные факторы, влияющие на скорость при условии зафиксированных значений пористости. Возраст пород также влияет на скорость и это дополнительно осложняется диагенетическими изменениями и процессами образования складок. Если рассматривать один регион, то у более молодых, но однотипных отложений, скорость упругих волн меньше, а с увеличением возраста скорость повышается [22].

Термодинамический режим осадконакопления и глубина залегания также оказывают влияние на

скорость пробега акустических волн. Учитывая повышение температуры и давления с глубиной, необходимо принимать во внимание, что изменяется состав пород, структура, а вместе с ними и физические свойства. Тип насыщающего флюида, поровый объём и стартовая упругость скелета горной породы определяют диапазон вариации скорости упругих волн. Упругость скелета, в свою очередь, зависит от пористости, сжимаемости пор и твёрдой фазы [7, 8]. Упругость скелета повышается с понижением сжимаемости пор при увеличении давления, а значит, растёт скорость. При повышенных значениях пористости диапазон вариации плотности скелета увеличивается при повышенном давлении и пониженной сжимаемости пор. А при пониженных значениях пористости и сжимаемости состав породы (сжимаемость твёрдой фазы) играет всё более важную роль [23, 24].

Разный состав цемента и породообразующих минералов формирует обширный скоростной диапазон для песчаных пород. Структура цемента и минеральный состав определяют закономерности пород при деформациях. В условиях увеличения давления наибольшее значение скорости фиксируется в глинистых породах, а наименьшее – в породах обломочного типа с цементом кремнистого или кварцевого типа [25].

В более плотных породах скорость будет больше при одинаковых значениях пористости за счёт более твёрдых породообразующих минералов в составе и более высоких упругих модулей. Скоростной диапазон расширяется благодаря наличию примесей в составе, а также из-за структурной неоднородности [26].

Если рассматривать группу сцементированных пород, то глины среди них будут обладать наибольшим интервальным временем пробега волн. Это происходит из-за тонкодисперсных зёрен глинистых минералов [27].

Построенные графики типа «кern–кern» показывают, что параметры акустических свойств иногда кардинально отличаются от скважины к скважине [28].

Акустические свойства очень тесно связаны с целым набором влияющих факторов: структурой порового пространства, типом цемента, сжимаемостью, давлением, температурой, степенью деформации. Выявление неоднородности распределения акустических свойств пород сопряжено с закономерностями распределения плотностных характеристик [29].

Разумеется, акустические характеристики связаны с плотностными. Тем не менее, как видно на картах (рис. 5), да и в общей массе проведённых исследований по фонду скважин, количество замеров может сильно различаться. Так, например, в

части скважин могут быть проведены измерения плотности по керну, а в другой части скорости пробега продольных волн. Комплексирова эти виды исследований можно расширить зону охвата и анализа диапазонов вариации физических параметров, а вместе с ними и коэффициента пористости.

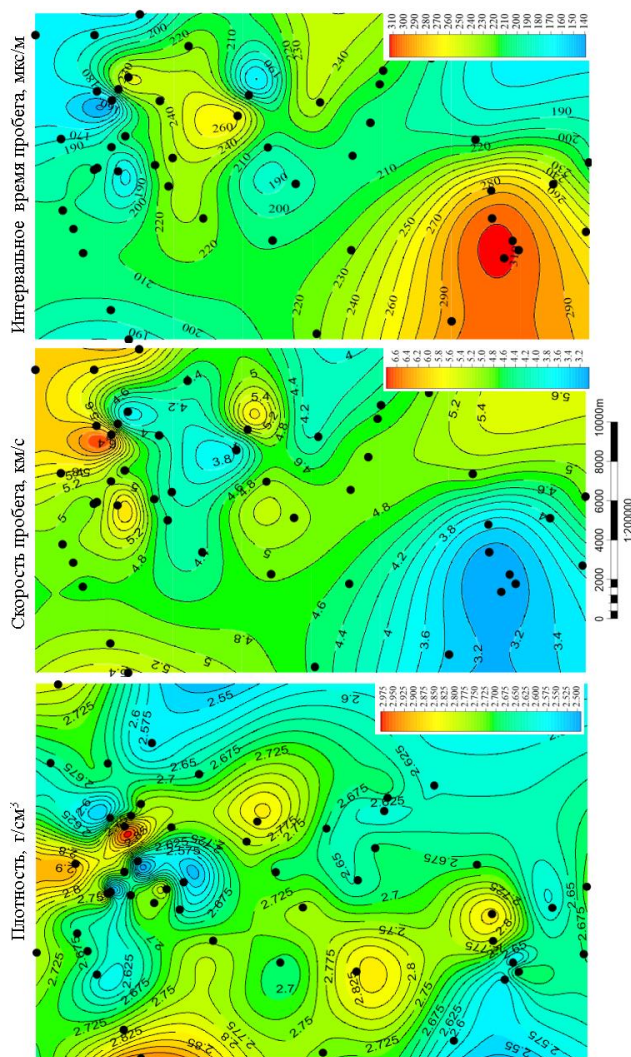


Рис. 5. Карта распределения плотности скелета, скорости пробега, интервального времени пробега
Fig. 5. Matrix density, matrix velocity, matrix interval transit time distribution map

На рис. 5 отображено распределение величин скорости пробега в скелете, интервального времени пробега в скелете, по скважинам изучаемого пласта. Для сопоставления добавлена карта распределения плотности [30]. На карте выделяются области пониженных и повышенных значение скоростей и интервальных времён. Скорость варьируется от 3 до 6,8 км/с, интервальное время, соответственно, – от 140 до 310 мкс/м. Отсюда явно выделяются области дифференциации коэффициента пористо-

сти. При увеличении скорости в скелете коэффициент пористости будет уменьшаться, как и при уменьшении времени пробега (рис. 4), при учёте постоянства остальных коэффициентов. Сформированные карты дают представление о дифференциации плотности и скорости по площади пласта.

Несомненно, на детализацию картографического материала влияет количество скважин. Особенно это заметно при сопоставлении карты плотности и карт скорости (интервального времени). Области построения немного разнятся из-за разного количества скважин с целевыми исследованиями. Хотя общая конфигурация на первый взгляд сохраняется, наблюдаются некоторые различия. Так, например, в юго-западной области на картах скорости и времени наблюдаются менее выраженные аномалии. А в восточной части картина немного изменяется, видны резкие вариации значений скорости. В дальнейшем это приведёт к тому, что коэффициенты пористости, вычисленные по разным геофизическим методам, будут различаться и, разумеется, будет вопрос о том, каким методом коэффициент пористости получился более достоверным.

Заключение и выводы

Детальное изучение акустических свойств образцов керна приводит к необходимости рассматривать не только общий объём точек в сводной выборке по месторождению или даже по отдельным пластам, а непосредственно по скважинам. В таком случае удаётся выявить менее масштабные изменения не только фильтрационно-ёмкостных свойств, а непосредственно физических откликов параметров. В дальнейшем это способствует эффективности построения гидродинамической модели с точки зрения процесса фильтрации флюидов.

С помощью декомпозиции выборки исследований керна по специфичным уравнениям:

- по скважинам определены количественные критерии интервального времени пробега акустических волн;
- сформировано представление о вариации физических свойств;
- определены направления изменения фильтрационно-ёмкостных свойств;
- обозначены зоны повышенных и пониженных значений интервального времени пробега акустических волн;
- определены предпосылки неоднородного распределения интервального времени пробега волн.

По результатам анализа фактических данных становится очевидно наглядно понятно, что интервальное время пробега акустических волн изменяется по площади распространения пласта. В текущих условиях наличия большого количества дан-

ных и компьютерных мощностей для их аккумуляции и обработки становится возможным углубиться в детализацию создания петрофизической, а вместе с тем и геологической модели пласта для дальнейшего анализа процессов разработки. Физические и фильтрационно-ёмкостные параметры тесно взаимосвязаны друг с другом, и, даже если скважины находятся на небольшом расстоянии друг от друга, структура порового пространства может изменяться в довольно широком диапазоне. Как оказалось, ранее проведённые исследования пространственного изменения плотности находят своё подтверждение и при анализе распределения

другого физического параметра – интервального времени пробега упругих волн. И тот и другой параметр связаны с одним из самых важных коэффициентов в петрофизической модели – коэффициентом пористости, от которого в свою очередь зависят все другие петрофизические параметры, а также вычисляемые запасы углеводородов. Необходимо продолжать исследования и включить изучение распределения других подгрупп физических свойств пород. Направления вариации свойств необходимо учитывать при вычислении и распределении фильтрационно-ёмкостных свойств пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский С.И. Динамические режимы осадконакопления. Циклогенез. – Л.: Недра, 1985. – 263 с.
2. Петрофизические методы исследования кернового материала (терригенные отложения) / М.К. Иванов, Ю.К. Бурлин, Г.А. Калмыков, Е.Е. Карнюшина, Н.И. Коробова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – Кн. 1. – 112 с.
3. Петрофизические методы исследования кернового материала. Кн. 2: Лабораторные методы петрофизических исследований кернового материала / М.К. Иванов, Г.А. Калмыков, В.С. Белохин, Д.В. Корост, Р.А. Хамидуллин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 113 с.
4. Тиаб Дж., Доналдсон Эря Ч. Петрофизика: теория и практика изучения свойств горных пород и движения пластовых флюидов / пер. с англ. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2009. – 868 с.
5. Кравченко Г.Г. Модель формирования продуктивных пластов горизонта Ю1 Крапивинского месторождения нефти: юго-восток Западной Сибири: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2010. – 157 с.
6. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / В.В. Федынский, И.И. Гурвич, Д.И. Дмитриев, Н.Б. Дортман, В.М. Запорожец, Н.Я. Кунин, Е.А. Мудрецова, В.Е. Никитский, В.П. Номоконов, А.Г. Тархов, Н.П. Добрынина, Е.Г. Першина / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1976. – 527 с.
7. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. – М.: Наука, 1970. – 276 с.
8. Авчян Г.М., Матвеев А.А. Влияние насыщающей жидкости на скорость распространения продольных волн в осадочных породах при высоких давлениях и температурах // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1965. – № 3. – С. 65–70.
9. Добрынин В.М. Деформация и изменение физических свойств коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1970. – 239 с.
10. Zappone A., Kissling E. SAPHYR: Swiss Atlas of Physical Properties of Rocks: the continental crust in a database // Swiss J Geosci. – 2021. – Vol. 114. – Iss. 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s00015-021-00389-3>
11. Geophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework / M. Dentith, R.J. Enkin, W. Morris, C. Adams, B. Bourne // Geophysical Prospecting. – 2020. – Vol. 68. – P. 178–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12882>
12. Кнеллер Е.Л., Гайфуллин Я.С., Рындин В.Н. Автоматизированное определение коллекторских свойств, нефтегазонасыщенности по данным каротажа (петрофизические модели и методы). – М.: ВИЭМС, 1990. – 73 с.
13. Гаранин В.А. О поглощающих и упругих свойствах сцементированных двухфазных пористых сред // Прикладная геофизика. – 1970. – Т. 60. – С. 44–52.
14. Золотарёв П.П. Об уравнениях термоупругости для насыщенных жидкостью или газом пористых сред // Инженерный журнал АН СССР. – 1965. – Т. 4. – № 3. – С. 3–12.
15. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluidsaturated porous solid // J. Acoust. Soc. of America. – 1956. – Vol. 28. – P. 168–191.
16. Distribution of petrophysical properties for sandy-clayey reservoirs by fractal interpolation / M. Lozada-Zumaeta, R.D. Arizabalo, G. Ronquillo-Jarillo, E. Coconi-Morales, D. Rivera-Recillas, F. Castrejon-Vacio // Nonlin. Processes Geophys. – 2012. – Vol. 19 – P. 239–250. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-19-239-2012>
17. Hamd-Allah S.M., Abbas O.S., Dhaidan M.K. Distribution of petrophysical properties based on conceptual facies model, Mishrif Reservoir/South of Iraq // Journal of Petroleum Research and Studies. – 2022. – Vol. 12. – P. 51–70. DOI: <https://doi.org/10.52716/jprs.v12i3.556>
18. Alkersan H. Depositional environment and geological history of the Mishrif formation in the south of Iraq // 9th Arab petroleum Congress. – 1975. – Vol. 121. – P. 1–18.
19. Quinto S., Torino P., Weltje G.J. How to integrate basin-scale information into reservoir models // Annual EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE Europec. – 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/164830-MS>
20. Al-Khalifa M.A., Payenberg T.H.D., Lang S.C. Overcoming the challenges of building 3D stochastic reservoir models using conceptual geological models – a case study // SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. – 2007. DOI: <https://doi.org/10.2118/104496-MS>
21. Петкевич Г.И., Вербицкий Т.З. Акустические исследования горных пород в нефтяных скважинах. – Киев: Наукова Думка, 1970. – 126 с.
22. Озёрская М.Л., Подоба Н.В. Физические свойства осадочного покрова территории СССР / под ред. М.Л. Озёрской. – М.: Недра, 1967. – 772 с.

23. Pickett G.R. The use of acoustic logs in the evaluation of sandstone reservoirs // *Geophysics*. – 1960. – Vol. 25. – P. 250–267.
24. Ardebili P.N., Jozanikohan G., Moradzadeh A. Estimation of porosity and volume of shale using artificial intelligence, case study of Kashafrud Gas Reservoir, NE Iran // *J Petrol Explor Prod Technol*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01729-9>
25. Gassman F. Elastic waves through a packing of spheres // *Geophysics*. – 1951. – Vol. 16. – P. 673–685.
26. Leisi A., Aftab S., Manaman N.S. Poro-Acoustic Impedance (PAI) as a new and robust seismic inversion attribute for porosity prediction and reservoir characterization // *Journal of Applied Geophysics*. – 2024. – Vol. 223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105351>
27. Simultaneous prediction of petrophysical properties and formation layered thickness from acoustic logging data using a modular cascading residual neural network (MCARNN) with physical constraints / W. Zhan, Y. Chen, Q. Liu, J. Li, M.D. Sacchi, M. Zhuang, Q.H. Liu // *Journal of Applied Geophysics*. – 2024. – Vol. 224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105362>
28. Ali S., Ma S., Al-Ofi S. Relationships between rock acoustic dispersion and petrophysical properties for enhanced formation evaluation // *International Petroleum Technology Conference*. – Dhahran, Saudi Arabia, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-23747-MS>
29. Investigation of thermal and acoustic properties of sandstone / P.K. Kaj, P. Vardon, H. Abels, A. Barnhoorn // *Fifth EAGE Global Energy Transition Conference & Exhibition (GET 2024)*. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202421230>
30. Коровин М.О., Алеева А.О. Формирование петрофизических взаимосвязей типа «керна–керна» для создания модели свойств коллекторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 73–79. DOI: [10.18799/24131830/2024/4/4539](https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4539)

Информация об авторах

Михаил Олегович Коровин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. korovinmo@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3270-2408>

Анна Олеговна Алеева, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ведущий инженер отдела геологического сопровождения бурения и ЗБС АО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72. rastorguewa90@tpu.ru

Поступила в редакцию: 18.02.2025

Поступила после рецензирования: 05.03.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Romanovskiy S.I. *Dynamic sedimentation regimes. Cyclogenesis*. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 263 p. (In Russ.)
2. Ivanov M.K., Burlin Y.K., Kalmikov G.A., Karniyshina E.E., Korobova N.I. *Petrophysical methods for studying core material (Terrigenous deposits)*. Moscow, Moscow University Publ., 2008. B. 1, 112 p. (In Russ.)
3. Ivanov M.K., Kalmikov G.A., Belokhin V.S., Korost D.V., Khamidullin R.A. *Petrophysical methods for studying core material. B. 2: Laboratory methods for petrophysical studies of core material*. Moscow, Moscow University Publ., 2008. 113 p. (In Russ.)
4. Tiab J., Donaldson E.C. *Petrophysics theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Kidlington, Gulf Professional Publ., 2009. 918 p.
5. Kravchenko G.G. *Model of formation of productive layers of horizon J1 of Krapivinskoye oil field: south-east of Western Siberia*. Cand. Diss. Tomsk, 2010. 157 p. (In Russ.)
6. Fedynskiy V.V., Gurvich I.I., Dmiriev D.I. *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Geophysics handbook*. Moscow, Nedra Publ., 1976. 527 p. (In Russ.)
7. Belikov B.P., Alexandrov K.S., Ryzhova T.V. *Elastic properties of rock-forming minerals and rocks*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 276 p. (In Russ.)
8. Avchan G.M., Matveenko A.A. The influence of saturating liquid on the velocity of propagation of longitudinal waves in sedimentary rocks at high pressures and temperatures. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Physics of the Earth*, 1965, no. 4, pp. 65–70. (In Russ.)
9. Dobrynin V.M. *Deformation and change in physical properties of oil and gas reservoirs*. Moscow, Nedra Publ., 1970. 239 p. (In Russ.)
10. Zappone A., Kissling E. SAPHYR: Swiss Atlas of Physical Properties of Rocks: the continental crust in a database. *Swiss J Geosci*, 2021, vol. 114. DOI: <https://doi.org/10.1186/s00015-021-00389-3>
11. Dentith M., Enkin R.J., Morris W., Adams C., Bourne B. Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework. *Geophysical Prospecting*, 2020, vol. 68, pp. 178–199. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12882>
12. Kneller L.E., Gaifullin Y.S., Ryndin V.N. *Automated determination of reservoir properties, oil and gas saturation based on well logging data (petrophysical models and methods)*. Moscow, VIEMS Publ., 1990. 73 p. (In Russ.)
13. Garanin V.A. On the absorption and elastic properties of cemented two-phase porous media. *Applied Geophysics*, 1970, vol. 60, pp. 44–52. (In Russ.)
14. Zolotarev P.P. On the equations of thermoelasticity for porous media saturated with liquid or gas. *Engineering Journal of the USSR Academy of Sciences*, 1965, vol. 4, no. 3, pp. 3–12. (In Russ.)

15. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluidsaturated porous solid. *J. Acoust. Soc. of America*, 1956, vol. 28, pp. 168–191.
16. Lozada-Zumaeta M., Arizabalo R.D., Ronquillo-Jarillo G., Coconi-Morales E., Rivera-Recillas D., Castrejon-Vacio F. Distribution of petrophysical properties for sandy-clayey reservoirs by fractal interpolation. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2012, vol. 19, pp. 239–250. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-19-239-2012>
17. Hamd-Allah S.M., Abbas O.S., Dhaidan M.K. Distribution of petrophysical properties based on conceptual facies model, Mishrif Reservoir/South of Iraq. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 2022, vol. 12, pp. 51–70. DOI: <https://doi.org/10.52716/jprs.v12i3.556>
18. Alkersan H. Depositional environment and geological history of the Mishrif formation in the south of Iraq. *9th Arab petroleum Congress*, 1975, vol. 121, pp. 1–18.
19. Quinto S., Torino P., Weltje G.J. How to integrate basin-scale information into reservoir models. *Annual EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE Europec*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2118/164830-MS>
20. Al-Khalifa M.A., Payenberg T.H.D., Lang S.C. Overcoming the challenges of building 3d stochastic reservoir models using conceptual geological models – a case study. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2118/104496-MS>
21. Petkevich G.I., Verbitskiy T.Z. *Acoustic studies of rocks in oil wells*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1970. 126 p. (In Russ.)
22. Ozerskaya M.L., Podoba N.V. *Physical properties of the sedimentary cover of the territory of the USSR*. Moscow, Nedra Publ., 1967. 772 p. (In Russ.)
23. Pickett G.R. The use of acoustic logs in the evaluation of sandstone reservoirs. *Geophysics*, 1960, vol. 25, pp. 250–267.
24. Ardebili P.N., Jozanikohan G., Moradzadeh A. Estimation of porosity and volume of shale using artificial intelligence, case study of Kashafrud Gas Reservoir, NE Iran. *J Petrol Explor Prod Technol*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01729-9>
25. Gassman F. Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, 1951, vol. 16, pp. 673–685.
26. Leisi A., Aftab S., Manaman N.S. Poro-Acoustic Impedance (PAI) as a new and robust seismic inversion attribute for porosity prediction and reservoir characterization. *Journal of Applied Geophysics*, 2024, vol. 223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105351>
27. Zhan W., Chen Y., Liu Q., Li J., Sacchi M.D., Zhuang M., Liu Q.H. Simultaneous prediction of petrophysical properties and formation layered thickness from acoustic logging data using a modular cascading residual neural network (MCARNN) with physical constraints. *Journal of Applied Geophysics*, 2024, vol. 224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105362>
28. Ali S., Ma S., Al-Ofi S. Relationships between rock acoustic dispersion and petrophysical properties for enhanced formation evaluation. *International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, Saudi Arabia, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2523/IPTC-23747-MS>
29. Kaj P.K., Vardon P., Abels H., Barnhoorn A. Investigation of thermal and acoustic properties of sandstone. *Fifth EAGE Global Energy Transition Conference & Exhibition (GET 2024)*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202421230>
30. Kоровин М.О., Алеева А.О. “Core–core” petrophysical relationships generation for reservoir modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 73–79. DOI: [10.18799/24131830/2024/4/4539](https://doi.org/10.18799/24131830/2024/4/4539)

Information about the authors

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. korovinmo@hw.tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3270-2408>

Anna O. Aleeva, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Leading Engineer, TomskNIPIneft JSC, 72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russian Federation. rastorguewa90@tpu.ru

Received: 18.02.2025

Revised: 05.03.2025

Accepted: 19.03.2025

УДК 622.276:681.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4933
Шифр специальности ВАК: 2.3.1, 2.3.3

Программное регулирование производительности нефтяной скважины с электроцентробежным насосом при интервальной неопределенности параметров притока

О.И. Лапик[✉], И.Г. Соловьев, Д.А. Говорков, Н.В. Лапик

Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

[✉]x-rax2@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* продиктована необходимостью совершенствования методов и инструментов оперативного контроля и частотного регулирования производительности нефтяной скважины с электроцентробежным насосом. Типичная задача обеспечения плановых показателей производительности скважины по командам сверху осложнена необходимостью сохранения устойчивой работы насоса в условиях плохо предсказуемой изменчивости объекта управления. При этом наличие и надежность непрерывного контроля глубинных режимных состояний для реализации замкнутых законов управления в практике нефтедобычи не всегда обеспечены. **Цель.** Дополнение представленной ранее методики программного частотного регулирования производительности скважины с одновременным контролем функциональных ограничений по газовому фактору и динамическому уровню над приемом насоса учетом возможной неопределенности в параметрическом описании гидродинамической модели объекта. **Методы.** Решение прямых и обратных задач, программного регулирования, материального баланса, гидростатики. **Результаты и выводы.** Результаты определяют методику синтеза программных регуляторов с автоконтролем близости границ функциональной устойчивости системы на основе решения обратных задач по отношению к исходным уравнениям гидродинамической модели скважины с электроцентробежным насосом второго порядка. Учет неопределенности в виде интервальных оценок возможного изменения ключевых параметров модели, в данном случае подпора пласта и обводненности притока, заметно не «утяжеляет» расчетные схемы, повышая надежность доставляемых решений. Результаты вычислительного эксперимента по формированию программы частотного управления для выполнения плана-графика предписанной производительности демонстрируют невозможность гарантировать строгого выполнения плана и снижения регулировочного потенциала системы на всем горизонте планирования при наличии неопределенности. Но и в этих условия достигается максимально возможное исполнение плановых поручений.

Ключевые слова: модели, алгоритм, нефтяная скважина, электроцентробежный насос, частотное регулирование, осложняющие факторы, границы функциональной устойчивости, неопределенность

Для цитирования: Программное регулирование производительности нефтяной скважины с электроцентробежным насосом при интервальной неопределенности параметров притока / О.И. Лапик, И.Г. Соловьев, Д.А. Говорков, Н.В. Лапик // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 136–145. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4933

UDC 622.279:681.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4933

Program regulation of performance of the oil well with an electric submersible pump under interval uncertainty of inflow parameters

O.I. Lapik[✉], I.G. Solovyev, D.A. Govorkov, N.V. Lapik

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

[✉]x-rax2@yandex.ru

Abstract. Relevance. The need to improve the methods and tools for operational control and frequency regulation of performance of the oil well with an electric submersible pump. The typical task of the oil production operator is ensuring of the target well productivity by commands from above is complicated by the need to maintain stable pump operation in conditions of poorly predictable variability of the control object. At the same time, in oil production practice the availability and reliability of downhole monitoring for realization of closed-loop control are not always provided. **Aim.** To supplement the previously presented method of program frequency regulation of well productivity with auto control of functional limitations on gas factor and working level, taking into account the possible uncertainty in the parametric description of the hydrodynamic model. **Methods.** Solution of direct and inverse problems, program control, material balance, hydrostatics. **Results and conclusions.** The results define the method of synthesis of program controllers with auto control of functional stability limits of the system based on solving inverse problems in relation to the initial equations of the hydrodynamic model of an oil well with electric submersible pump. A possible uncertainty in the form of interval estimates of possible changes in the key parameters of a hydrodynamic model, in this case the reservoir pressure and water cut, do not complicate the calculation algorithm and increasing the reliability of the solutions. The results of the frequency control program computation demonstrate the impossibility to guarantee strict adherence of the prescribed productivity schedule and decrease of the regulating potential of the system over the entire planning horizon in the presence of uncertainty. But even in these conditions, the maximum possible fulfillment of plan assignments is achieved.

Keywords: models, algorithm, oil well, electric submersible pump, frequency control, complicating factors, limits of functional stability, uncertainty

For citation: Lapik O.I., Solovyev I.G., Govorkov D.A., Lapik N.V. Program regulation of performance of the oil well with an electric submersible pump under interval uncertainty of inflow parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 136–145. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4933

Вводный анализ

Контроль и частотная стабилизация плановой производительности скважин непрерывного фонда, обустроенных электроцентробежным насосом (ЭЦН), в условиях кратковременных возмущений режимов работы по программам квотирования или компенсации недоборов – одна из главных функций диспетчерского оперативного регулирования [1–5]. Конструирование траектории частотного сигнала управления – $\omega_p(k)$ [ед.] по заданному плану-графику производительности – $q_p(k)$ [м³/сут], может быть алгоритмизировано на основе использования комплексной гидродинамической модели скважины [6], устанавливающей связь между режимными состояниями работающей системы в ключевых точках подъёмника от забоя до устья, включая ЭЦН (функциональная схема приведенной к вертикали скважины представлена на рис. 1). Здесь $k \in K = \{0, 1, 2, \dots, k_F\}$ – координата дискретного времени с горизонтом планирования k_F .

Подобная схема синтеза программной траектории управления [7] по модели объекта состоятельна лишь в том случае, если заданный план-график – $q_p(k)$ – удовлетворяет функциональным ограничениям работы системы по динамическому уровню $h(4, k) \geq h^{LIM}$ над приёмом насоса [м] и объемной доле газа $\beta_{GN}(k) \leq \beta_G^{LIM}$ [ед.] у первой ступени насоса [8–11]. В случае, если заданный план – $q_p(k)$ – выводит режимное состояние системы за границы функциональной устойчивости, алгоритм управления стабилизирует ближайшую к плану-графику траекторию по границе критического ограничения. В результате имеем:

$$q(k) = \min \{q_p(k), q_\beta(k), q_h(k)\},$$

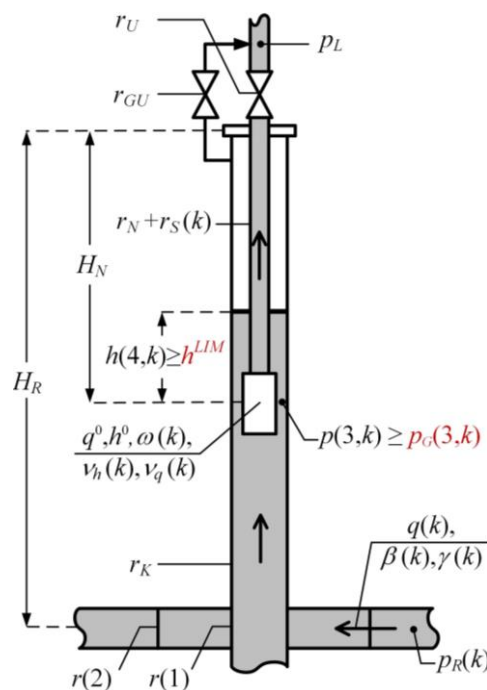


Рис. 1. Функциональная схема нефтяной скважины с ЭЦН
Fig. 1. Functional chart of an oil well with electric submersible pump (ESP)

где

$$q_\beta(k) = \arg \{ \beta_{GN}(k) = \beta_G^{LIM} \},$$

$$q_h(k) = \arg \{ h(4, k) = h^{LIM} \},$$

а управляющее воздействие определяется условием:

$$\omega(k) = \min \{ \omega_p(k), \omega_\beta(k), \omega_h(k) \},$$

в котором компоненты выбора рассчитываются по технологии решения обратных задач [12, 13] для барометрической модели скважины и моделей ограничений по газу и уровню:

$$\omega_p(k) = \arg \{q(k) = q_p(k)\},$$

$$\omega_\beta(k) = \arg \{q(k) = q_\beta(k)\},$$

$$\omega_h(k) = \arg \{q(k) = q_h(k)\}.$$

Именно такое решение обсуждалось в работе [14].

Технологии программного регулирования, основанные на полном знании модели объекта управления, удобны в применении, так как воспроизводят любые допустимые и желаемые режимы управления без использования дополнительных контрольно-измерительных средств. Однако в условиях, когда ключевые параметры системы, например, давление пласта $p_R(k)$ [МПа], уровень обводнённости флюида $\beta(k)$ [доли ед.] и прочие характеристики, дрейфуют с плохо прогнозируемой динамикой, результаты программного регулирования становятся менее надёжными. В данной статье упомянутая схема программного регулирования обобщается на барометрическую модель скважины с расширяющейся параметрической неопределённостью [15–18], которая вводится интервальными оценками изменения средне-пластового давления и обводнённости:

$$p_R(k) \in [\underline{p}_R(k) = (1 - \alpha_R k) \underline{p}_R(0); \bar{p}_R(k) = \bar{p}_R(0)], \quad (1)$$

$$\beta(k) \in [\underline{\beta}(k) = \underline{\beta}(0); \bar{\beta}(k) = (1 + \alpha_\beta k) \bar{\beta}(0)] \quad (2)$$

в виде линейных корреляций между граничными значениями параметров в начальный и конечные моменты формирования программы частотного управления и мультипликаторами динамики роста неопределённости [ед.]:

$$\alpha_R = \frac{1}{k_F} \left(1 - \frac{\underline{p}_R(k_F)}{\underline{p}_R(0)} \right), \quad \alpha_\beta = \frac{1}{k_F} \left(\frac{\bar{\beta}(k_F)}{\bar{\beta}(0)} - 1 \right).$$

Схематичное изображение «расширяющейся неопределённости», формируемой по законам (1), (2) представлено на рис. 2 и описывает типовую ситуацию естественной выработки притока с ростом обводнённости добываемой жидкости и падением средне-пластового давления [19, 20].

Алгоритм программного регулирования в условиях неопределённости

Основой для формирования программных траекторий управления выступает гидродинамическая модель нефтяной скважины с ЭЦН [6, 14], сведенная к системе трех уравнений $\mathcal{P} = \langle \mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \mathcal{P}_3 \rangle$ соответствующих функциональных блоков:

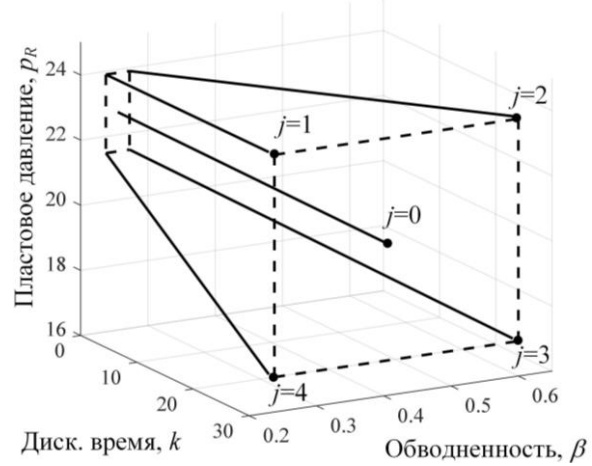


Рис. 2. Модель расширяющейся неопределённости динамики выработки залежи

Fig. 2. Model of expanding uncertainty in the dynamics of reservoir depletion

Модель «низа» – устанавливающая связь между потерями напора в интервале от среднепластового давления на контуре питания $p_R(k)$ до приема насоса $p(3, k)$ [МПа] и объемным притоком $q(k)$ [м³/сут], приведенным к нормальным термобарическим условиям (НТБ):

$$\mathcal{P}_1: p(3, k) = p_R(k) - (r(1) + r(2))q(k) - c\Upsilon_G(k)q(k)^2 - \frac{\gamma(k)}{b_\beta(3, k)}(H_R - H_N + r_K q(k)^2), \quad (3)$$

где $\Upsilon_G(k) = (1 - \beta(k))\chi_G p_0 G$ – составляющая потеря напора по газовому фактору нефти G [м³/м³] с обводненностью $\beta(k)$, атмосферным давлением p_0 [МПа] и параметрической настройкой χ_G [м⁻¹] [21, 22]; $\gamma(k) = (1 - \beta(k))\gamma_O + \beta(k)\gamma_W$ – удельный вес жидкости, образуемый долями удельных весов нефти γ_O и воды γ_W [МПа/м];

$$b_\beta(3, k) = 1 + (1 - \beta(k))\alpha_b G \left(1 - \alpha_G(3) \frac{p_{G0} - p(3, k)}{p_{G0} - p_0} \right)$$

– объемный коэффициент жидкой фазы в условиях давления $p(3, k)$ с настроечными коэффициентами α_b и $\alpha_G(3)$ [ед.] и давлением насыщения p_{G0} [МПа]; $r(1) + r(2)$ – сумма гидросопротивлений переходов «призабойная зона – забой» и «пласт – призабойная зона» [м³/(МПа·сут)], соответствующая коэффициенту продуктивности $w_R = 1/(r(1) + r(2))$ динамической модели притока; c – параметрическая настройка квадратичной модели притока [сут²/м⁵]; r_K – гидросопротивление колонны [сут²/м⁵] в интервале от глубины забоя H_R до уровня подвески ЭЦН H_N [м].

Модель «верха» – объединяющая в виде балансового равенства «напор=нагрузка» потери давления от приема насоса $p(3, k)$ до устьевого штуцера с

контролируемым противодавлением p_L [МПа] и универсальную квадратичную аппроксимацию паспортной напорной характеристики ЭЦН:

$$\mathcal{P}_2: \frac{\gamma(k)v_h(k)h^0}{b_{\beta}(3,k)} \begin{pmatrix} \omega(k)^2 \lambda_0 - \\ -\omega(k)\lambda_1 \frac{q(k)}{v_q(k)q^0} - \\ -\lambda_2 \left(\frac{q(k)}{v_q(k)q^0} \right)^2 \end{pmatrix} =$$

$$= p_L + \frac{\gamma(k)}{b_{\beta L}(k)} (H_N + (r_U + r_N + r_S(k))q(k)^2) - p(3,k), \quad (4)$$

где $b_{\beta L}(k) = 1 + (1 - \beta(k))\alpha_b G \left(1 - \frac{p_{G0} - p_L}{p_{G0} - p_0} \right)$ – объем-

ный коэффициент жидкости в условиях устьевого давления [ед.]; q^0 и h^0 – номинал подачи [$\text{м}^3/\text{сут}$] и напора [м] выбранного типоразмера ЭЦН с соответствующими мультипликаторами деградации $v_q(k)$ и $v_h(k)$ вследствие засорения и абразивного износа [ед.] [23, 24]; $\langle \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \rangle$ – параметры квадратичной аппроксимации нормированной напорной характеристики ЭЦН [ед.]; $\omega(k)$ – регулируемая относительная частота питающего напряжения [ед.] с заданным диапазоном допустимых вариаций $\omega(k) \in [\omega_L, \omega_R]$; r_U и r_N – гидросопротивления устьевого штуцера и насосно-компрессорной трубы [$\text{сут}^2/\text{м}^5$]; $r_S(k)$ – дополнительное гидросопротивление подъёмника вследствие осадконакоплений [$\text{сут}^2/\text{м}^5$].

Модель «затруба» – описывающая изменение динамического уровня жидкости над приемом насоса $h(4,k)$ [м] за счет снижения давления $p(3,k)$ и дополнительного подпора при сбросе отсепарированного газа в затрубное пространство:

$$\mathcal{P}_3: p(3,k) = p_L + r_{GU}\omega(k)a_{GU}(k) \times$$

$$\times (p_{G0} - p(3,k))^2 q(k)^2 + \frac{\gamma(k)}{b_{\beta L}(k)} h(4,k), \quad (5)$$

где

$$a_{GU}(k) = \frac{p_L}{\chi_G} (k_S \mu_R(3,k))^2,$$

при

$$\mu_R(3,k) = (1 - \beta(k)) G \frac{\alpha_G(3)p_0}{p_{G0} - p_0}$$

и коэффициенте сепарации k_S [ед.].

Подробнее с описанием каждого блока модели можно ознакомиться в [14]. Как и прежде, расчет траекторий программного управления проводится для статических режимов работы системы.

Фактор неопределенности, связанный с вариацией среднепластового давления и обводненности по законам (1), (2) для каждого k -го момента времени формирования программы частотного управления, можно представить в пространстве параметров в виде прямоугольника с пронумерованными вершинами и центром $j \in J = \{0, 1, 2, 3, 4\}$, как это изображено на рис. 3.

В условиях неопределенности строгое выполнение плановых поручений становится невозможным из-за «размытости» состояний системы при вариациях $j \in J = \{0, 1, 2, 3, 4\}$. В этой связи рассмотрим случай, когда основная программа частотного управления для заданной функции плана $q_p(k)$ рассчитывается по траектории средней точки области параметрической неопределенности, обозначенной на рис. 3 индексом $j=0$, что соответствует условию:

$$\omega_p(k) = \omega_p(k, 0) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k, 0), \beta(k, 0) | q_p(k)).$$

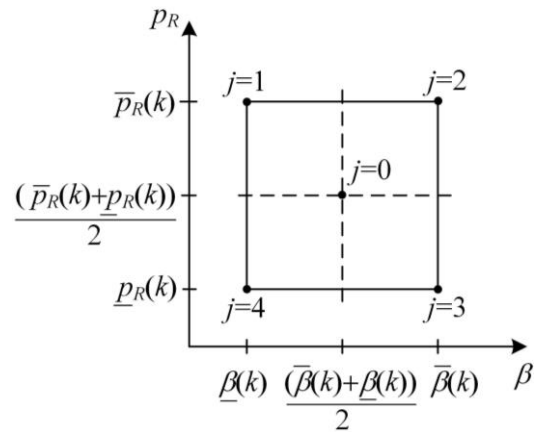


Рис. 3. Область параметрической неопределенности
Fig. 3. Area of parametric uncertainty

Реализация полученной частоты в условиях перебора в вершинах области неопределенности модели объекта устанавливает границы «размытости» производительности системы, отличающейся от плана:

$$\hat{q}(k, j) = \mathcal{P}_2(p_R(k, j), \beta(k, j) | \omega_p(k)),$$

для которых должны быть выполнены функциональные ограничения по объемной доле газа у первой ступени $\beta_{GN}(k) \leq \beta_G^{LIM}$ и динамическому уровню $h(4,k) \geq h^{LIM}$ над приёмом насоса, что для каждого $j \in J$ соответствует отношению:

$$\hat{q}(k, j) \leq q^{LIM}(k, j) = \min\{q_{\beta}(k, j), q_h(k, j)\}, \quad (6)$$

где $q_{\beta}(k, j)$ и $q_h(k, j)$ – граничные производительности областей функциональной устойчивости для j -й вершины.

Предел производительности $q_{\beta}(k,j)$ по газовому фактору с соответствующей ему частотой $\omega_{\beta}(k,j)$ для каждой пары $\langle p_R(k,j), \beta(k,j) \rangle$ оценивается по условию $p(3,k,j)=p_G(3,k,j)$ на решениях (3), (4) системы уравнений вида:

$$q_{\beta}(k) = \mathcal{P}_1(p_R(k, j), \beta(k, j) | p_G(3, k, j)),$$

$$\omega_{\beta}(k, j) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k, j), \beta(k, j) | q_{\beta}(k), p_G(3, k, j))$$

с рекуррентной балансировкой частоты $\omega_{\beta}(k,j)$.

Соответствующая пара предельной производительности и частоты $\langle q_h(k,j), \omega_h(k,j) \rangle$ по границе динамического уровня $h(4,k,j)=h^{LIM}$ определяется на решениях (3), (5) системы уравнений:

$$q_h(k) = \mathcal{P}_1(p_R(k, j), \beta(k, j) | p(3, k, j)),$$

$$p(3, k, j) = \mathcal{P}_3^{-1}(p_R(k, j), \beta(k, j) | \omega_h(k, j), h^{LIM})$$

с начальным приближением $\omega_h(k,j)$ и последующей рекуррентной балансировкой получаемого на основе (4) равновесного значения частоты:

$$\omega_h(k, j) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k, j), \beta(k, j) | q_h(k, j), p(3, k, j)).$$

Итоговое управляющее воздействие для каждого k -го момента времени определяется условием:

$$\omega(k) = \arg \{q(k) = \min \{q_{\beta}(k), q^{LIM}(k)\}\}, \quad (7)$$

где $q^{LIM}(k) = \min_j \{q^{LIM}(k, j)\}$ – предельно допустимый уровень производительности по условию (6).

Комплексная блок-схема алгоритма расчета управляющего воздействия $\omega(k)$ по заданному план-графику предписанной производительности $q_P(k)$ на горизонте планирования $k \in K = \{0, 1, 2, \dots, k_F\}$ при наличии интервальной неопределенности представлена на рис. 4.

Подробнее логика выбора управляющего воздействия будет рассмотрена в ходе вычислительно-го эксперимента.

Вычислительный анализ

Параметрические настройки модели, характерные для скважин Среднего Приобья, представлены в таблице. Рассматриваемые далее примеры носят иллюстративный характер и направлены на демонстрацию работы алгоритма.

Сравниваются два случая формирования программы частотного управления по заданному план-графику предписанной производительности:

- когда динамика пластовых условий априорно известна и эквивалентна средней траектории $j=0$, как на рис. 2;
- при наличии интервальной неопределенности параметров с тенденцией к расширению по законам (1), (2), что также соответствует рис. 2.

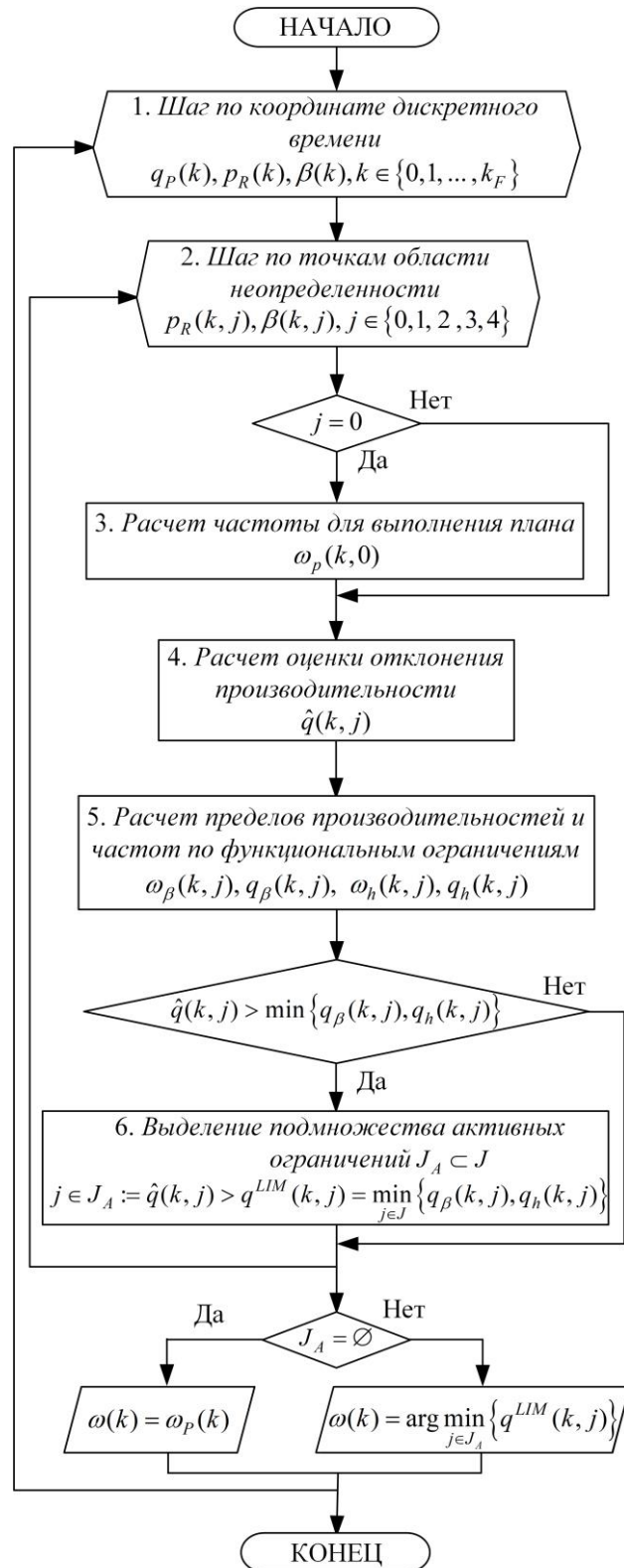


Рис. 4. Блок-схема алгоритма формирования программы частотного регулирования

Fig. 4. Block diagram of the calculation algorithm of the frequency control program

Таблица. Параметрические настройки моделей

Table. Parameters of the models

Параметры квадратичной модели скважины/Well model parameters							
Параметр/Parameter	$r(1)+r(2)$	c	γ_0	γ_w	p_{G0}	χ_G	G
Единицы измерения/Units	$\text{м}^3/(\text{МПа}\cdot\text{сут})$ $\text{m}^3/(\text{MPa}\cdot\text{day})$	$\text{сут}^2/\text{м}^5$ day^2/m^5	$\text{МПа}/\text{м}/\text{МПа}/\text{м}$		МПа MPa	м^{-1} m^{-1}	$\text{м}^3/\text{м}^3$ m^3/m^3
Значение/Value	0,928	0,285	0,0065	0,012	15,93	$0,8\cdot 10^{-4}$	180
Параметр/Parameter	α_b	$\alpha_G(3)$	r_K	r_N	r_U	r_{GU}	k_S
Единицы измерения/Units	ед./units		$\text{сут}^2/\text{м}^5/\text{day}^2/\text{m}^5$				ед./units
Значение/Value	0,0014	0,4	0,004	0,041	0,0495	0,0382	0,7
Параметр/Parameter	λ_0	λ_1	λ_2	q^0	h^0	H_R	H_N
Единицы измерения/Units	ед./units			$\text{м}^3/\text{сут}/\text{м}^3/\text{day}$	$\text{м}/\text{м}$		
Значение/Value	1,7	0,28	0,42	80	2238	3000	2200
Параметр/Parameter	p_L	$\bar{p}_R(0)$	$\underline{p}_R(0)$	$\underline{p}_R(k_F)$	$\bar{\beta}(0)$	$\bar{\beta}(k_F)$	
Единицы измерения/Units	$\text{МПа}/\text{МПа}$				Доли ед./units		
Значение/Value	1,5	23,09	21,624	17,072	0,2375	0,2625	0,6
Настройки параметров динамического блока/Parameters of dynamic block							
Параметр/Parameter	$T(2)$	S_T			Δt		
Единицы измерения/Units	сут/day	$\text{м}^2/\text{м}^2$			сут/day		
Значение/Value	0,3	0,012			0,001		

На рис. 5 представлены результаты расчета программы частотного управления $\omega(k)$ по заданному плану-графику производительности $q_P(k)$ в случае, когда динамика пластовых условий априорно известна, что отображается сплошными линиями дрейфа параметров $p_R(k)$, $\beta(k)$ и $q(k)$. Результаты

расчета при наличии интервальной неопределенности затонированы на графиках областями соответствующих параметров с границами, обозначенными пунктирной линией. График рассчитанной частоты в этом случае также обозначен пунктирной линией.

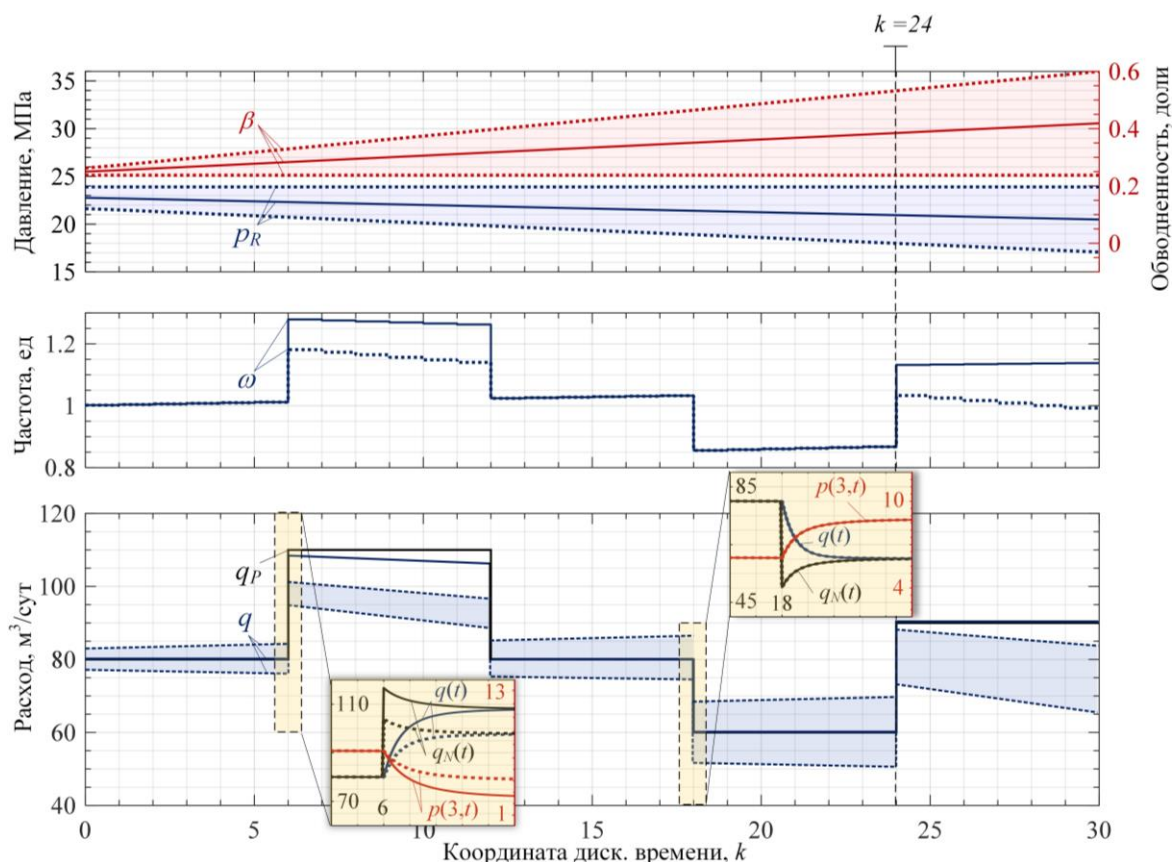


Рис. 5. Результаты формирования программы частотного регулирования

Fig. 5. Results of the frequency control calculation

Дополнительно на рис. 5 выделены зоны анализа с детализацией результатов моделирования переходных процессов при средней траектории области неопределенности (рис. 2) для моментов повышения ($k=3$) и снижения ($k=18$) производительности по сформированной программе частотного регулирования. По аналогии графики переменных состояния – объемного притока $q(t)$, объемной подачи насоса $q_N(t)$, давления у приема насоса $p(3,t)$ – обозначены сплошными линиями при известной динамике, и пунктиром – в случае интервальной неопределенности.

Как видно из результатов моделирования, от начала расчета при $q_P=80$ и до момента повышения программы до $q_P=110$ назначенная плановая производительность остаётся достижимой в условиях действия сразу двух ограничений, даже в условиях интервальной неопределённости. На отрезке повышения плана $k \in [6,12]$ осуществляется переход на режим стабилизации ближайшего ограничения с соответствующим снижением производительности и управляющего воздействия ниже планового. Восстановление средне-плановой производительности $q_P=80$ с момента времени $k=12$ и последующее снижение в момент $k=18$ до уровня $q_P=60$ выполнимо в пределах ограничений. Переход с момента $k=24$ на производительность $q_P=90$ остаётся выполнимым при отсутствии неопределённости, но в случае ее учета снова наблюдается переход на режим стабилизации ограничения до окончания расчета.

Фактор расширяющейся неопределённости снижает регулировочные потенциалы системы на всём горизонте планирования.

Механизм контроля и упреждения выхода за границы функциональной устойчивости иллюстрируются графиками на рис. 6 для момента $k=24$, ко-

гда в точке $j=3$ программа стабилизации плана $\omega_P(k)=\arg\{q(k)=q_P(k)\}$ приводит одновременно к нарушению двух ограничений: $\hat{q}(k,3) > \{q_\beta(k,3), q_h(k,3)\}$ (рис. 6, а). Реализуемая согласно (6), (7) коррекция частотного режима по границе динамического уровня $\langle q_h(k,3); \omega_h(k,3) \rangle = \langle 74,97; 1,053 \rangle$, гарантирует функциональность системы $q(k) \leq q_h(k,j)$, $j \in J$ с пониженной производительностью: $q(k) \leq q_P(k)$, как на рис. 6, б.

Выводы и обсуждение

По результатам изложенного, укажем на некоторые важные моменты:

1. Как и в [14], приведённый анализ иллюстрирует технику численно-аналитического конструирования закона частотной стабилизации плановой производительности скважины с ЭЦН в условиях интервальной неопределённости описания параметров притока.
2. Технология программного конструирования графика относительной частоты питающего напряжения по графику предписанной (плановой) производительности основана на аналитическом описании [6] комплексной гидродинамической модели скважины, определяющей связь между режимными состояниями и управляющими воздействиями.
3. Упрощенный характер представления гидродинамической модели скважины позволяет конструировать на её основе алгоритмы управления, доступные для реализации на информационных ресурсах цеховой автоматики как подсистема поддержки принятия решений для оператора по добыче нефти [25–27].

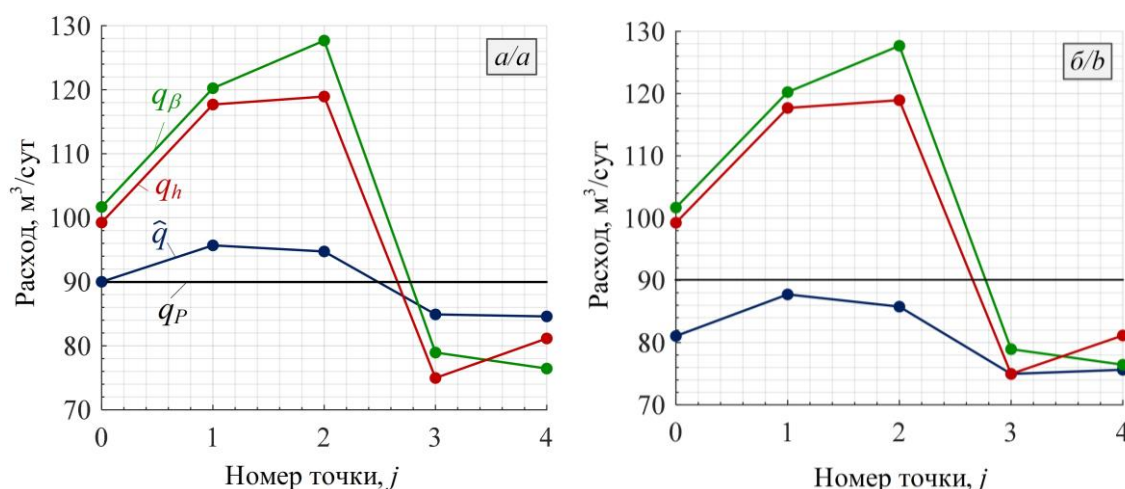


Рис. 6. Анализ распределения производительности в ключевых точках области неопределенности для момента $k=24$: а) при частоте для стабилизации предписанной производительности $\omega(k)=\omega_P(k,0)$; б) после коррекции частоты с учетом ограничений $\omega(k)=\omega_h(k,3)$

Fig. 6. Analysis of the performance allocation at key points of the uncertainty area for $k=24$: а) when implementing the frequency to stabilize the prescribed performance $\omega(k)=\omega_P(k,0)$; б) with correction according to limitations $\omega(k)=\omega_h(k,3)$

4. Наличие интервальной неопределённости в условиях программного регулирования не гарантирует строгого выполнения плановых поручений. Границы функциональных ограничений также приобретают интервальную природу исчислений. Синхронное – по вершинам «области неопределённости» – сопоставление программных траекторий с граничными состояниями и возможным проецированием на критическое ограничение гарантирует реализуемость конструируемой программной траектории в границах функциональной устойчивости работы скважины [8, 9, 11].
5. Рассмотренная технология программной стабилизации плана, как и принятый метод расчёта частоты по средней точке «области неопределённости», не компенсирует действие фактора неопределённости со строгой стабилизацией плана-графика. Более эффективными в этой связи остаются адаптивные методы управления [28], например, на основе пропорционально-интегральной стабилизации оценки производительности, полученной по данным глубинного контроля давления у приёма насоса. Однако «слепая» стабилизация плана в условиях скрытой эволюции параметров притока может усугублять режимы эксплуатации, активизируя действие осложняющих факторов [24]. Рассмотренная технология программной стабилизации подачи с контролем устойчивости работы системы в граничных точках интервалов неопределённости оказывается более надёжной и просто необходимой при отказе подсистемы глубинного контроля в реальных условиях эксплуатации [29, 30].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и внедрение дистанционной системы интеллектуального глубинного гидродинамико-геофизического мониторинга эксплуатационного фонда скважин / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, А.А. Пустовских, И.С. Каешков, Д.Ю. Колупаев // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2019. – № 4. – С. 38–47. DOI: 10.24887/2587-7399-2019-4-38-47
2. Evaluation of electrical submersible pump on field production network optimization in Niger delta oilfield / A. Kerunwa, J.U. Obibuikwe, N.U. Okereke, S.G. Udeagbara, A.N. Nwachukwu, S.T. Ekwueme // Open Journal of Yangtze Gas and Oil. – 2022. – Vol. 7. – P. 26–47. DOI: 10.4236/ojogas.2022.71003.
3. Гумеров О.А., Гумеров К.О. Опыт применения частотно-регулируемого привода для повышения эффективности эксплуатации установки электроцентробежного насоса на Арланском месторождении // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 24–34.
4. Tuning VSDs in ESP wells to optimize oil production – case studies / L.A. Camilleri, H. Gong, N.H. Al-Maqseed, A.M. Al-Jazzaf // SPE Artificial Lift Conference and Exhibition – Americas. – The Woodlands, Texas, USA, 28–30 August 2018. URL: <https://doi.org/10.2118/190940-MS> (дата обращения 17.11.2024).
5. Krishnamoorthy D., Fjalestad K., Skogestad S. Optimal operation of oil and gas production using simple feedback control structures // Control Engineering Practice. – 2019. – Vol. 91. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.104107.
6. Соловьев И.Г., Лапик О.И., Говорков Д.А. Гидродинамика переходных процессов в скважине, обустроенной электроцентробежным насосом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 50–60. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4109
7. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 424 с.
8. Setiawan Y.A., Vidrianto M., Arthur R. Handling ESP problem using Automatic Frequency Rocking (AFR) / Journal IATMI. – 2022. URL: <https://journal.iatmi.or.id/index.php/ojs/article/view/242/248> (дата обращения 17.11.2024).
9. Bagci A.S., Kece M., Nava J. Challenges of using Electrical Submersible Pump (ESP) in high free gas applications // International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. – Beijing, China, 8–10 June 2010. URL: <https://doi.org/10.2118/131760-MS> (дата обращения 15.11.2024).
10. Al-Ballam S., Karami H., Devegowda D. A data-based reliability analysis of ESP failures in oil production wells // Journal of Energy and Power Technology. – 2022. – Vol. 4. – P. 1–19. DOI:10.21926/jept.2204036
11. Мищенко И.Т. Расчёты при добыче нефти и газа. – М.: Нефть и газ, 2008. – 296 с.
12. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 2000. – 622 с.
13. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. – 457 с.
14. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Лапик О.И. Программная стабилизация плановой производительности с контролем функциональных ограничений для скважины с электроцентробежным насосом // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2024. – № 2 (607). – С. 34–42.
15. Tuczynski T., Stopa J. Uncertainty quantification in reservoir simulation using modern data assimilation algorithm // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 1–16. DOI: 10.3390/en16031153
16. Обратные задачи по идентификации параметров пласта (Задачи history matching) / Э.С. Закиров, С.Н. Закиров, И.М. Индрупский, Д.П. Аникеев // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 2 (21). URL: https://oilgasjournal.ru/issue_21/zakirov-zakirov-indrupskiy-anikeev-14.html (дата обращения 14.11.2024).
17. Zee Ma Y. Uncertainty analysis in reservoir characterization and management: how much should we know about what we don't know? // AAPG Memoir. – 2011. – Vol. 96. – P. 1–15. DOI: 10.1306/13301404M963458
18. Haddadpour H., Niri M.E. Uncertainty assessment in reservoir performance prediction using a two-stage clustering approach: Proof of concept and field application // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 204. – P. 1–13 DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108765.
19. Thompson N., Renli L., Reitan H. Reservoir depletion challenges – a geomechanics workflow focused on optimizing late-life field development // SPE Norway Subsurface Conference. – Virtual, 2–3 November 2020. URL: <https://doi.org/10.2118/200742-MS> (дата обращения 17.11.2024).

20. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1986. – 365 с.
21. Справочная книга по добыче нефти. / Г.Е. Рябухин, Ш.К. Гиматулинов, В.Н. Мамуна и др. – М.: Недра, 1974. – 704 с.
22. Алиев З.С., Самуйлова Л.В. Газогидродинамические исследования газовых и газоконденсатных пластов и скважин. – М.: Изд-во МАКС Пресс, 2011. – 340 с.
23. Performance degradation and wearing of Electrical Submersible Pump (ESP) with gas-liquid-solid flow: experiments and mechanistic modeling / H. Zhu, J. Zhu, Z. Lin, Q. Zhao, R. Rutter, H.-Q. Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 200. – P. 1–18. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108399.
24. Эксплуатация скважин в осложненных условиях / С.С. Алескеров, Б.И. Алибеков, Б.И. Алиев, Ю.А. Бувеч, В.Г. Варганов, Н.М. Манюхин, О.В. Чубанов. – М.: Недра, 1971. – 199 с.
25. Zahirović I., Danilović D., Martinović B. Application of ESP pump with intelligent control system in well X // *Underground Mining Engineering*. – 2020. – Vol. 37. – P. 51–59. DOI: 10.5937/podrad2037051Z.
26. Modelling and robustness analysis of model predictive control for electrical submersible pump lifted heavy oil wells / D. Krishnamoorthy, E. Berghheim, A. Pavlov, M. Fredriksen, K. Fjalestad // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49. – P. 544–549. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.399.
27. Тагирова К.Ф., Нугаев И.Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Т. 21. – № 2. – С. 102–109. DOI: 10.17587/mau.21.102-109
28. Частотная ПИ-стабилизация подачи с автоконтролем режимных ограничений для скважин с ЭЦН / Д.А. Говорков, И.Г. Соловьев, Н.В. Лапик, О.И. Лапик // *Автоматизация и информатизация ТЭК*. – 2023. – № 8 (601). – С. 5–12. DOI: 10.33285/2782-604X-2023-8(601)-5-12.
29. Яшметов В.А. Надежность ТМС и унификация протоколов передачи данных ТМС в ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» // *Инженерная практика*. – 2016. – № 10. – С. 110–113.
30. Fernandes W., Komati K.S., Assis de Souza Gazolli K. Anomaly detection in oil-producing wells: a comparative study of one-class classifiers in a multivariate time series dataset // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2024. – Vol. 14. – P. 343–363. DOI: 10.1007/s13202-023-01710-6.

Информация об авторах

Олег Игоревич Лапик, аспирант, ассистент кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; x-rax2@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4980-7219>

Илья Георгиевич Соловьев, кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; igsolovyev123@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9871-0075>

Денис Александрович Говорков, кандидат технических наук, доцент кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; dagovorkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5430-0231>

Наталья Владиславовна Лапик, старший преподаватель кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; lapiknv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0237-0528>

Поступила в редакцию: 16.12.2024

Поступила после рецензирования: 22.01.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Pustovskih A.A., Kaeshkov I.S., Kolupaev D.U. Intellectual well-test and PLT remote monitoring downhole system development and implementation for producing oil wells. *PROnet. Professionally about Oil*, 2019, no. 4, pp. 38–47. (In Russ.) DOI: 10.24887/2587-7399-2019-4-38-47
2. Kerunwa A., Obibuikie J.U., Okereke N.U., Udeagbara S.G., Nwachukwu A.N., Ekwueme S.T. Evaluation of electrical submersible pump on field production network optimization in niger delta oilfield. *Open Journal of Yangtze Gas and Oil*, 2022, vol. 7, pp. 26–47. DOI: 10.4236/ojogas.2022.71003.
3. Gumerov O.A., Gumerov K.O. Experience of using variable frequency drive to improve effectiveness of exploitation electrical submersible pumps on Arlanskoe oil field. *Petroleum engineering*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 24–34. (In Russ.)
4. Camilleri L.A., Gong H., Al-Maqseed N.H., Al-Jazzaf A.M. Tuning VSDs in ESP wells to optimize oil production – case studies. *SPE Artificial Lift Conference and Exhibition – Americas*. The Woodlands, Texas, USA, 28–30 August 2018. Available at: <https://doi.org/10.2118/190940-MS> (accessed 17 November 2024).
5. Krishnamoorthy D., Fjalestad K., Skogestad S. Optimal operation of oil and gas production using simple feedback control structures. *Control Engineering Practice*, 2019, vol. 91, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.104107.
6. Solovyev I.G., Lapik O.I., Govorkov D.A. Hydrodynamics of transient processes in a well with an electric submersible pump. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 50–60. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4109
7. Moiseev N. N. *Numerical methods in the theory of optimal systems*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 424 p. (In Russ.)

8. Setiawan Y.A., Vidrianto M., Arthur R. Handling ESP problem using Automatic Frequency Rocking (AFR). *Journal IATMI*, 2022. Available at: <https://journal.iatmi.or.id/index.php/ojs/article/view/242/248> (accessed 17 November 2024).
9. Bagci A.S., Kece M., Nava J. Challenges of using Electrical Submersible Pump (ESP) in high free gas applications. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Beijing, China, 8–10 June 2010. Available at: <https://doi.org/10.2118/131760-MS> (accessed 15 November 2024).
10. Al-Ballam S., Karami H., Devegowda D. A data-based reliability analysis of esp failures in oil production wells. *Journal of Energy and Power Technology*, 2022, vol. 4, pp. 1–19. DOI: 10.21926/jept.2204036
11. Mishchenko I.T. *Calculations for oil and gas production*. Moscow, Oil and gas Publ., 2008. 296 p. (In Russ.)
12. Bahvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Numerical method*. Moscow, Nauka Publ., 2000. 622 p. (In Russ.)
13. Kabanihin S.I. *Inverse and incorrectly formulated problem*. Novosibirsk, Siberian science Publ., 2009. 457 p. (In Russ.)
14. Solovyev I.G., Govorkov D.A., Lapik O.I. Program stabilization of planned productivity with control of functional limitations for a well with an electric submersible pump (ESP). *Automation and informatization of the fuel and energy complex*, 2024, no. 2 (607), pp. 34–42. (In Russ.)
15. Tuczynski T., Stopa J. Uncertainty quantification in reservoir simulation using modern data assimilation algorithm. *Energies*, 2023, vol. 16, pp. 1–16. DOI: 10.3390/en16031153
16. Zakirov E.S., Zakirov S.N., Indrupskiy I.M., Anikeev D.P. Inverse problems for reservoir parameters identification (history matching problems). *Actual Problems of Oil and Gas*, 2018, no. 2 (21). (In Russ.) Available at: https://oilgasjournal.ru/issue_21/zakirov-zakirov-indrupskiy-anikeev-14.html (accessed 14 November 2024).
17. Zee Ma Y. Uncertainty analysis in reservoir characterization and management: How much should we know about what we don't know? *AAPG Memoir*, 2011, vol. 96, pp. 1–15. DOI: 10.1306/13301404M963458
18. Haddadpour H., Niri M.E. Uncertainty assessment in reservoir performance prediction using a two-stage clustering approach: proof of concept and field application. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, pp. 1–13 DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108765.
19. Thompson N., Renli L., Reitan H. Reservoir depletion challenges – a geomechanics workflow focused on optimizing late-life field development. *SPE Norway Subsurface Conference*. Virtual, 2–3 November 2020. Available at: <https://doi.org/10.2118/200742-MS> (accessed 17 November 2024).
20. Zheltov Yu.P. *Oil fields development*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 365 p. (In Russ.)
21. Ryabuhin G.E., Gimatudinov Sh.K., Mamuna V.N. *Oil production reference book*. Moscow, Nedra Publ., 1974. 704 p. (In Russ.)
22. Aliev Z.S., Samuylova L.V. *Gas-hydrodynamic analyses of gas and gas-condensate reservoirs and wells*. Moscow, MAKS Press Publ., 2011. 340 p. (In Russ.)
23. Zhu H., Zhu J., Lin Z., Zhao Q., Rutter R., Zhang H.-Q. Performance degradation and wearing of Electrical Submersible Pump (ESP) with gas-liquid-solid flow: experiments and mechanistic modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 200, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108399.
24. Aleskerov S.S., Alibekov B.I., Aliev B.I., Buevich Yu.A., Vartanov V.G., Manyuhin N.M., Chubanov O.V. *Operation of wells in troublesome environment*. Moscow, Nedra Publ., 1971. 199 p. (In Russ.)
25. Zahirović I., Danilović D., Martinović B. Application of ESP pump with intelligent control system in well X. *Underground Mining Engineering*, 2020, vol. 37, pp. 51–59. DOI: 10.5937/podrad2037051Z.
26. Krishnamoorthy D., Bergheim E., Pavlov A., Fredriksen M., Fjalestad K. Modelling and robustness analysis of model predictive control for electrical submersible pump lifted heavy oil wells. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, pp. 544–549. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.399.
27. Tagirova K.F., Nugaev I.F. Actual tasks of oil-wells electric submersible pump control automation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 102–109. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.21.102-109.
28. Govorkov D.A., Solovyev I.G., Lapik N.V., Lapik O.I. Frequency proportional-integral stabilization by auto-control of process limitations for wells with electric submersible pumps. *Automation and informatization of the fuel and energy complex*, 2023, no. 8 (601), pp. 5–12. (In Russ.) DOI: 10.33285/2782-604X-2023-8(601)-5-12.
29. Yashmetov V.A. TMS reliability and unification of TMS data transfer protocols in ООО «LUKOIL-Western Siberia». *Engineering practice*, 2016, no. 10, pp. 110–113. (In Russ.)
30. Fernandes W., Komati K.S., Assis de Souza Gazolli K. Anomaly detection in oil-producing wells: a comparative study of one-class classifiers in a multivariate time series dataset. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2024, vol. 14, pp. 343–363. DOI: 10.1007/s13202-023-01710-6.

Information about the authors

Oleg I. Lapik, Postgraduate Student, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; x-rax2@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4980-7219>

Ilya G. Solovyev, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; igsolovyev123@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9871-0075>

Denis A. Govorkov, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; dagovorkov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5430-0231>

Natalya V. Lapik, Senior Lecturer, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; lapiknv@tyuiu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-0237-0528>

Received: 16.12.2024

Revised: 22.01.2025

Accepted: 19.03.2025

УДК 681.518.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718
Шифр специальности ВАК: 2.4.2

Энергоэффективное управление группой штанговых глубинных насосных установок

А.А. Накатаев[✉], А.М. Зюзов, К.Е. Нестеров

Уральский Федеральный университет, Россия, г. Екатеринбург

[✉]a.a.nakataev@urfu.ru

Аннотация. Актуальность. Работа электропривода штанговых глубинных насосных установок характеризуется периодическим изменением нагрузки, что в пределах группы независимых электроприводов куста скважин может вызвать значительные колебания мощности в питающей сети. Для снижения пиковых нагрузок в сети, имеющих в таких системах случайный характер, на кусте скважин, оборудованных регулируемым электроприводом штанговых глубинных насосных установок, предлагается организовать синхронизированное управление насосными установками. Рассмотрено несколько подходов к отработке алгоритмов энергоэффективного управления, а также проведения опытно-промышленных испытаний электроприводов технологических машин и механизмов, к которым относится штанговая глубинная насосная установка, таких как компьютерное моделирование, моделирование динамики системы с использованием HIL- и PHIL-симуляторов и другие методы. На заключительном этапе отработки системы управления в представленной работе использован электромеханический испытательный стенд, позволивший апробировать предлагаемый алгоритм управления в лабораторных условиях. **Цель.** Синтез системы энергоэффективного управления группой электроприводов штанговых глубинных насосных установок, обеспечивающей снижение колебаний потребляемой мощности в электрической сети при периодически изменяющейся нагрузке. **Методы.** Математическое и компьютерное моделирование в реальном времени, физическое моделирование на базе испытательного стенда. **Результаты и выводы.** Повышение качества напряжения электросети, к которой подключена группа регулируемых электроприводов штанговых глубинных насосных установок, можно достичь непрерывной регистрацией потребляемой активной мощности каждого электропривода, последующим расчётом оптимальных фаз регистрируемых сигналов каждой установки относительно базовой и корректировкой текущего углового положения вала каждого электропривода для достижения расчётной величины оптимальной фазы потребляемой мощности.

Ключевые слова: электропривод, штанговая глубинная насосная установка, нефтедобыча, испытательный стенд, алгоритмы управления, моделирование нагрузки

Для цитирования: Накатаев А.А., Зюзов А.М., Нестеров К.Е. Энергоэффективное управление группой штанговых глубинных насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 146–153. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718

UDC 556.314.6(282.256.1)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718

Sucker rod pumping unit energy-efficient control

A.A. Nakataev[✉], A.M. Ziuzev, K.E. Nesterov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

[✉]a.a.nakataev@urfu.ru

Abstract. Relevance. The operation of the electric drive of deep-well sucker rod pumping units is characterized by a periodic nature of load changes, which, within a group of independent electric drives of a well cluster, can cause significant power fluctuations in the supply network. To reduce peak loads in the network, which are random in such systems, it is proposed to

organize synchronized control of pumping units at a cluster of wells equipped with an adjustable electric drive of a sucker pump unit. The paper considered several approaches to developing energy-efficient control algorithms, as well as conducting pilot tests of electric drives of technological machines and mechanisms, which include a sucker rod pumping unit, such as computer modeling, modeling of system dynamics using HIL and PHIL simulators and other methods. At the final stage of testing the control system in the presented work, an electromechanical test bench was used, which made it possible to test the proposed control algorithm in laboratory conditions. **Aim.** Synthesis of an energy-efficient control system for a group of electric drives of sucker-rod pumping units, ensuring a reduction in fluctuations in power consumption in the electrical network under periodically changing loads. **Methods.** Mathematical and computer modeling in real time, physical modeling based on a test bench. **Results and conclusions.** Improving the quality of the voltage of the electrical network to which a group of adjustable electric drives of the sucker pump unit is connected can be achieved by continuously recording the active power consumption of each electric drive, subsequent calculation of the optimal phases of the recorded signals of each installation relative to the base one, and adjusting the current angular position of the shaft of each electric drive to achieve the calculated value of the optimal phase of power consumption.

Keywords: electric drive, sucker rod pumping unit, oil production, test bench, control algorithms, load modeling

For citation: Nakataev A.A., Ziuzev A.M., Nesterov K.E. Sucker rod pumping unit energy-efficient control. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 146–153. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4718

Введение

В промышленности существует множество электроприводов с периодической нагрузкой, например, системы водоснабжения, состоящие из последовательности насосных станций [1, 2], и станки-качалки для добычи нефти. Условия, в которых работают станки-качалки, можно назвать наиболее тяжелыми по сравнению с условиями других установок с периодической нагрузкой. Отсутствие оператора на рабочем участке и ограниченная мощность питающей сети из-за удаленности объектов нефтедобычи обуславливают повышенные требования к надежности электроприводов. Именно ограничение мощности является одним из важнейших факторов, способных привести к полному останову технологического процесса, что влечёт за собой крупные финансовые потери. Кроме выбора номинальной мощности питающего трансформатора кустовой подстанции необходимо обеспечить равномерность графика мощности, потребляемой всеми установками, для предотвращения возможных просадок напряжения. В системе независимых электроприводов с периодической нагрузкой высока вероятность наложения пиков потребляемой мощности. Опыт компьютерного моделирования показал влияние фазы временных диаграмм мощности отдельных установок на напряжение общей шины питания [3].

Группа штанговых глубинных насосных установок (ШГНУ) представляет собой сложный объект для проведения опытно-промышленных испытаний из-за удаленного расположения и ограниченного доступа. Различные методы, такие как испытания на реальном оборудовании [4], моделирование динамики системы с использованием HIL- и PHIL-симуляторов [5, 6], компьютерное моделирование [7] и др. [8–13], предлагается использовать для разработки и проверки алгоритмов такими

электротехническими комплексами. В статье приводятся результаты синтеза системы управления фазовым сдвигом диаграмм мощности группы регулируемых электроприводов ШГНУ, а также даётся оценка возможности отработки системы управления технологическим процессом куста ШГНУ на электромеханическом испытательном стенде, реализующем динамические процессы ШГНУ в определенном масштабе на основе математической модели механизма [14–19].

Разработка регулятора

Основной целью управления фазовым сдвигом диаграмм мощности в группе электроприводов с периодической нагрузкой является снижение колебаний сетевого напряжения за счет уменьшения пиковых нагрузок электрической сети. Для управления работой группы электроприводов предлагается использовать критерий оптимизации (1) [20, 21]. Условием применения критерия является равенство периодов нагрузки установок. Визуальное представление критерия на примере группы из трех электроприводов с гармонической нагрузкой с одинаковым значением периода [3] изображено на рис. 1. Каждой точке на графике соответствует набор параметров относительного положения/пути электропривода. Задачей регулятора является выведение группы электроприводов на расчетные параметры, соответствующие минимуму критерия оптимизации (1), за счет регулирования относительного положения/пути электроприводов. На рис. 2 представлено сравнение графиков среднеквадратичного фазного напряжения общей шины питания при моделировании группы из трех установок [3]. Стоит отметить, что с увеличением количества установок в группе растет их влияние на питающую сеть и на уровень просадки напряжения [3].

$$F(P_{\Sigma} - P_{cp}) \rightarrow \min_{\phi_i^*}, \quad (1)$$

где $P_3 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2}}{n}$ – эффективная (среднеквадратичная) мощность, потребляемая группой электроприводов;
 $P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}$ – средняя мощность, потребляемая группой электроприводов; p_i – мгновенная электрическая мощность, потребляемая группой электроприводов; n – количество измеренных значений на периоде сигнала мгновенной электрической мощности электропривода регулируемой установки.

Алгоритм, детектирующий точки максимума заданного графика, предлагается использовать для определения фазы и периода диаграмм мощности.

Данные вычисляются на основании координат этих точек. Алгоритм был реализован с применением программного обеспечения LabVIEW и разработанной динамической библиотеки на языке С и проверен на электромеханическом испытательном стенде [20]. Это также позволило отладить механизм внедрения внешних программ в испытательный стенд. Сначала оцениваются периоды диаграмм мощности каждой установки, после чего длительности периодов T_i сравниваются для выбора установки с наибольшей величиной периода. Эта установка принимается базовой, её период – T_1 .

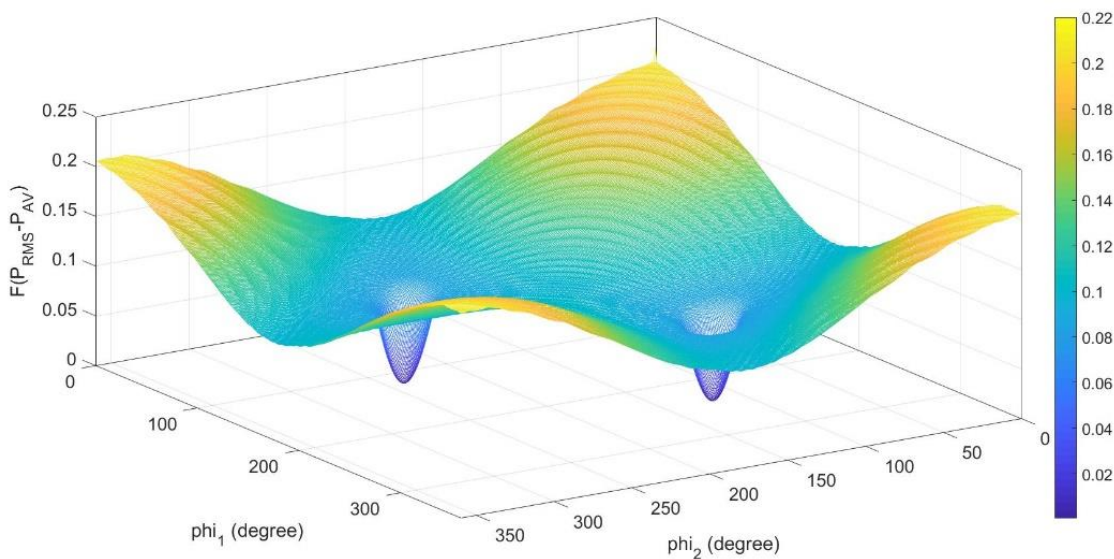


Рис. 1. Визуальное представление критерия оптимизации
Fig. 1. Visual representation of optimization criterion

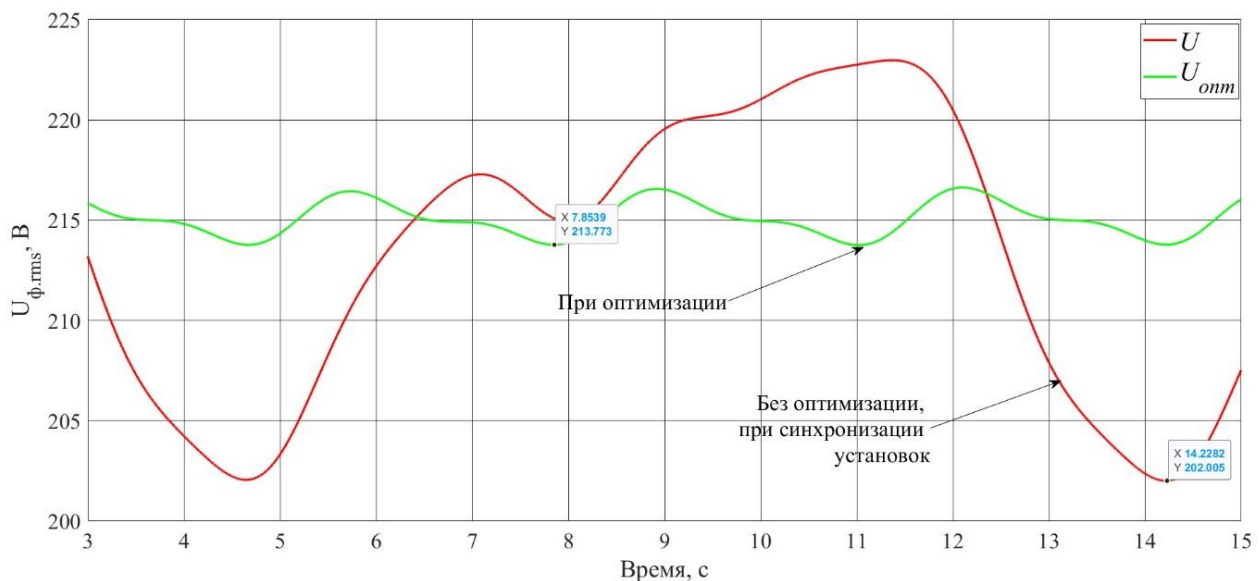


Рис. 2. Сравнение минимальных значений напряжения при оптимизации работы установок и без оптимизации
Fig. 2. Comparison of minimum voltage values when optimizing plant operation and without optimization

На основании длительности периода текущей и базовой установки – T_i и T_1 соответственно, формируется задание на корректировку скорости каждого электропривода (2), (3).

$$\omega_{\text{к.и}} = \frac{T_i}{T_1}, \quad (2)$$

где T_i – длительность периода сигнала мгновенной электрической мощности электропривода регулируемой установки; T_1 – длительность периода сигнала мгновенной электрической мощности электропривода базовой установки.

Задание на скорость каждого из электроприводов ω_i^{**} определяется по выражению:

$$\omega_i^{**} = \omega_i^* + \omega_{\text{к.и}}, \quad (3)$$

где ω_i^* – текущее задание скорости электропривода.

После выравнивания периодов всех установок в группе происходит расчет оптимальной фазы каждой установки (1).

После определения значений текущей фазы φ_i и оптимальной фазы φ_i^* для каждой установки происходит формирование сигнала на корректировку фазы $\Delta\varphi_i^*$ с дальнейшим пересчётом в сигнал коррекции текущего углового положения вала электропривода $\Delta\theta_i^*$ (4)–(7).

$$\Delta\theta_i^* = \Delta\varphi_i^* \cdot \frac{T_i}{2\pi} \cdot \omega_i^{**}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_i^*$ – задание на коррекцию фазы:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_i^* = \varphi_i^* - \varphi_i & \text{при } \varphi_i^* \geq \varphi_i; \\ \Delta\varphi_i^* = 2\pi + (\varphi_i^* - \varphi_i) & \text{при } \varphi_i^* < \varphi_i; \\ \Delta\varphi_i^* = 0 & \text{при } \varphi_i^* \cdot (1 + (1 - k_{\text{ф.доп}})) \\ & \text{и } \varphi < \varphi^* \cdot k_{\text{ф.доп}}, \end{cases} \quad (5)$$

φ_i – текущая фаза регистрируемого сигнала мгновенной электрической мощности; $k_{\text{ф.доп}}$ – коэффициент, вводящий диапазон нечувствительности регулятора к несоответствию $\Delta\varphi_i^*$ и φ_i^* .

$$\begin{cases} t_i = \frac{\Delta\theta_i^*}{\omega_i^{***}} & \text{при } \Delta\theta_i^* \geq \theta_{\text{кр.и}}; \\ t_i = \sqrt{\frac{\Delta\theta_i^*}{\varepsilon_{\text{зи.и}}}} & \text{при } \Delta\theta_i^* < \theta_{\text{кр.и}}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{зи.и}}$ – темп задатчика интенсивности скорости электропривода каждой установки; $\theta_{\text{кр.и}} = \Delta\omega_{\text{пр.и}} \cdot t_{\text{кр.и}}$ – минимальное задание на корректировку положения, при котором во время регулирования будет достигнуто значение $\Delta\omega_{\text{пр.и}}$ с заданным темпом $\varepsilon_{\text{зи.и}}$, где $t_{\text{кр.и}} = \frac{\Delta\omega_{\text{пр.и}}}{\varepsilon_{\text{зи.и}}}$.

$$\omega_i^{***} = \omega_i^{**} + \Delta\omega_{\text{пр.и}}, \quad (7)$$

где ω_i^{***} – сигнал задания скорости после дополнительной коррекции.

Моделирование работы регулятора

С помощью программы Matlab/Simulink проводилась оценка эффективности работы регулятора. Использовалась модель группы электроприводов, где каждый электропривод испытывал нагрузку гармонического вида [3, 21]. Моделировалась работа электроприводов с системами управления на основе «П» и «ПИ» регуляторов скорости.

В итоге был использован «ПИ» регулятор, так как он менее чувствителен к колебаниям скорости электропривода.

На рис. 3 представлен процесс регулирования группы ШГНУ, синим цветом обозначен базовый электропривод, зеленым – испытуемый. В качестве задания фазы использовано значение π .

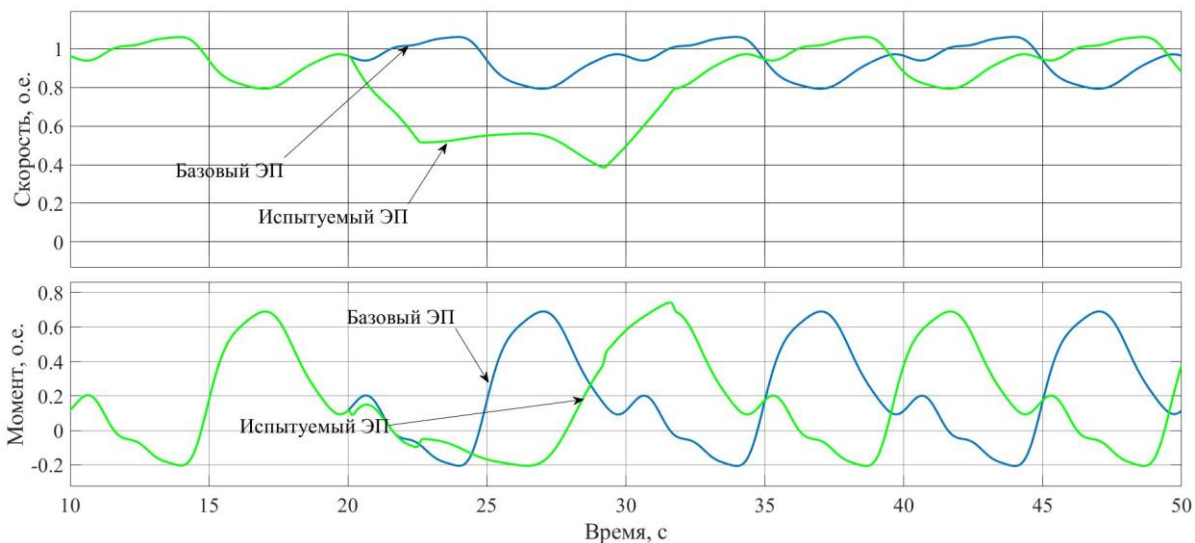


Рис. 3. Процесс регулирования штанговых глубинных насосных установок

Fig. 3. Deep-well sucker rod pumping units regulation

ПК + PCI6221 + LabVIEW

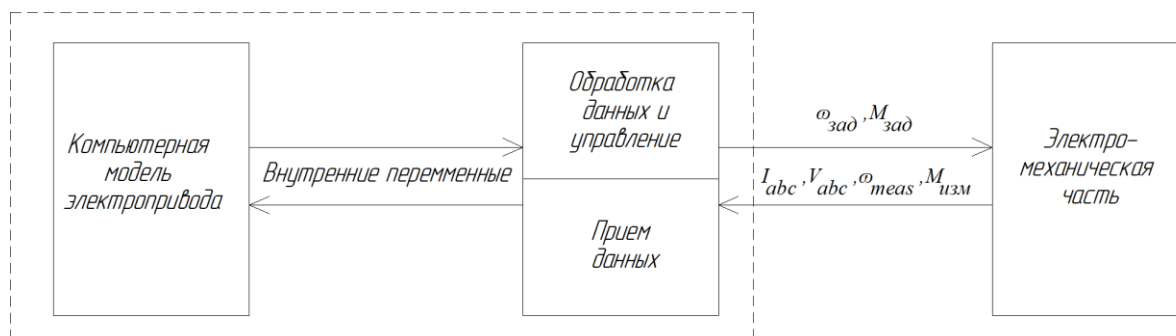


Рис. 4. Структура испытательного стенда

Fig. 4. Test bench structure

Описание испытательного стенда

Электро-механический испытательный стенд, состоящий из преобразователей частоты, электро-машинного агрегата, измерительных средств, используемых для анализа электро-механических переменных объекта и системы управления, описан в [20]. На рис. 4 представлена структурная схема испытательного стенда

Здесь I_{abc} , V_{abc} , $\omega_{зад}$, $M_{зад}$ – измеренные значения тока, напряжения для каждой фазы, скорости и момента, $\omega_{зад}$, $M_{зад}$ – задание скорости и момента.

Испытательный стенд имеет сравнимый с реальным электроприводом штанговой глубинной насосной установки масштаб мощности – на реальных объектах нефтедобычи используются двигатели мощностью 30 кВт, в составе испытательного стенда применён двигатель мощностью 1,5 кВт. Процесс работы электропривода испытательного стенда регистрируется с помощью датчиков тока, напряжения на входе и выходе преобразователя частоты, датчиков скорости и момента на валу

электродвигателя. Всё это позволяет проводить синтез и отладку системы управления.

Для демонстрации возможности отработки системы управления на испытательном стенде рассмотрено решение задачи синхронизации работы группы электроприводов ШГНУ [3], [19, 20]. В предыдущем разделе представлена система управления, в реальном времени регистрирующая активную мощность всех установок в группе и на основе этих данных контролирующая фазовый сдвиг диаграмм мощности относительно базовой. В качестве базовой, как уже было сказано, выбирается установка, имеющая наибольшую длительность периода в группе.

Испытание работы регулятора

Для оценки возможности построения предлагаемой системы управления группой электроприводов с периодической нагрузкой на испытательном стенде в программе LabVIEW реализована структурная схема регулятора (рис. 5), а также схема управления нагрузочным двигателем.

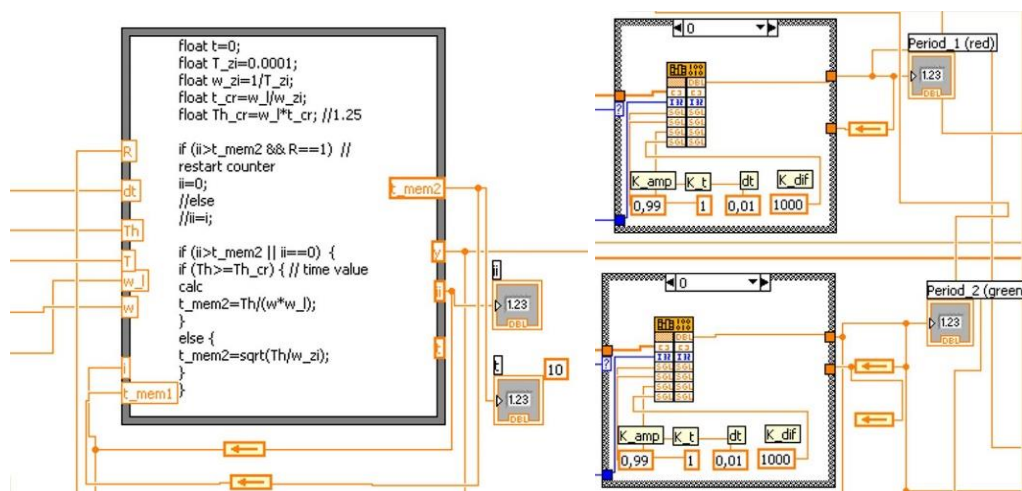


Рис. 5. Структурная схема регуляторов положения (слева) и вычислителя периода (справа), реализованных в программе LabVIEW

Fig. 5. Block diagram of a position controller (left) and a period calculator (right), implemented in the LabVIEW program

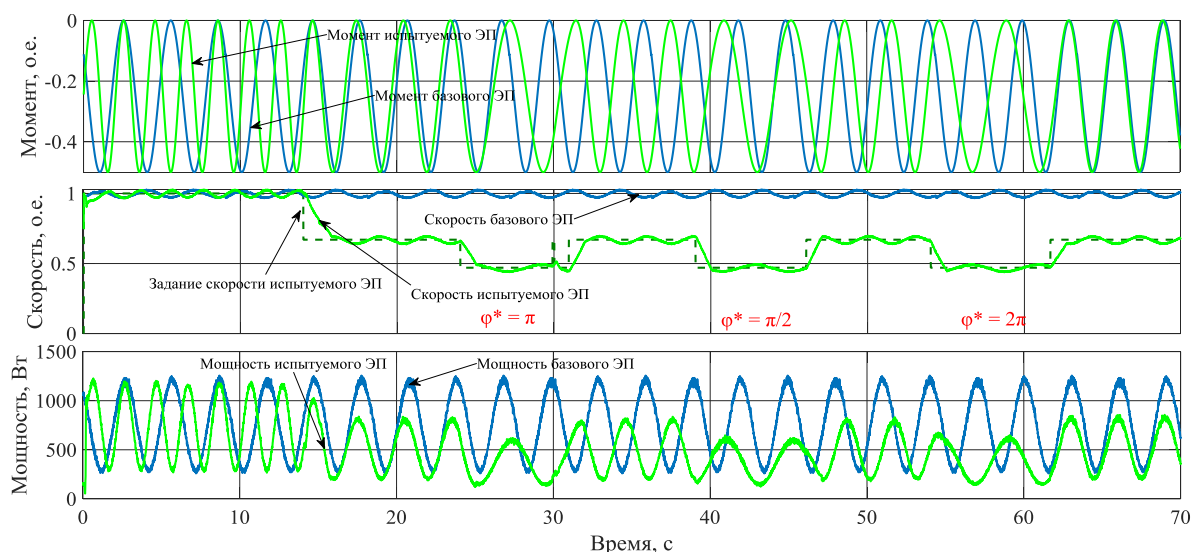


Рис. 6. Графики момента, скорости и мощности при испытании работы регулятора

Fig. 6. Graphs of torque, speed and power when testing the operation of the regulator

В качестве базового электропривода был использован предварительно записанный массив данных работы стенда с гармонической функцией нагрузки с периодом 3 с. Для регулируемого периода была задана начальная длительность периода, равная 2 с. Разница в длительностях периодов обусловлена необходимостью оценки работоспособности блоков определения и регулирования периода. Блок вычисления оптимального фазового сдвига может быть вынесен за границы локальной системы управления, поэтому его работа на испытательном стенде не оценивалась. Для проверки работы блоков вычисления и регулирования фазы и положения в канал управления фазовым сдвигом подавались значения π , $\pi/2$ и 2π . На рис. 6 представлены графики момента и скорости установки при испытании работы регулятора, а также графики мощности.

Как видно из рис. 6, система управления синхронизацией электроприводов работает корректно, с определенным уровнем погрешности, которую можно учесть при рассмотрении дополнительных физических процессов, происходящих в составляющих элементах, а также при использовании двукратно интегрирующего регулятора скорости. На рис. 6 длительность периода базовой установки превышала длительность периода регулируемой в 1,5 раза для большей наглядности. В реальных условиях влияние регулирования на графики мощности будет не таким явным.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило возможность построения системы энергоэффективного управления группой электроприводов ШГНУ, обеспечивающей снижение влияния периодически изменяющейся нагрузки на питающую электрическую сеть путём корректировки текущего углового положения вала каждого электропривода, для достижения расчётной величины оптимальной фазы потребляемой мощности.

На лабораторном стенде проведено испытание системы управления, реализованной в программе LabVIEW с применением собственных динамических библиотек, результаты которого могут быть использованы для расширения функций интеллектуальных станций управления ШГНУ.

Испытания системы управления, поддерживающей оптимальное фазовое соотношение диаграмм мощности электроприводов в группе, показали наличие ошибки при регулировании, которая может быть устранена при использовании двукратно интегрирующего регулятора скорости.

В дальнейшем планируется исследовать работу предлагаемой системы синхронизации в составе группы электроприводов ШГНУ с общим звеном постоянного тока для раскрытия потенциала генераторного режима установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gevorgov L., Kirpichnikova I. Model of solar photovoltaic water pumping system for domestic application // 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED). – Moscow, Russia, 2021. – P. 1–5.
2. Operation modes investigation of cascade pump unit using refining hydraulic network model / M. Pechenik, S. Burian, I. Khudia, M. Pushkar, V. Teriaev // IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, Ukraine, 2022. – P. 249–252.
3. Method of power optimization of a group of independent electric drives with periodic load / A. Ziuzev, A. Nakataev, A. Sesekin, D. Sashchenko, K. Nesterov // XVIII International Scientific Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). – Yekaterinburg, Russia, 2021. – P. 1–4.

4. Langbauer C., Diengsleider-Lambauer K., Lieschnegg M. Downhole dynamometer sensors for sucker rod pumps // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 21. – № 6. – P. 8543–8552.
5. Asynchronous electric drive power-hardware-in-the-loop system / M. Mudrov, A. Ziuzev, K. Nesterov, S. Valtchev // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – Yekaterinburg, Russia, 2018. – P. 1–5.
6. A modular signal processing platform for grid and motor control, HIL and PHIL applications / B. Schmitz-Rode, L. Stefanski, R. Schwendemann, S. Decker, S. Mersche, P. Kiehnle, P. Himmelmann, A. Liske, M. Hiller // International Power Electronics Conference. ECCE Asia. – Himeji, Japan, 2022. – P. 1817–1824.
7. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies // 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). – Pitesti, Romania, 2018. – P. 1–8.
8. Rzaev Y., Aliyev M., Rezvan M., Khakimyanov M. Electric energy saving calculation method in the management of sucker-rod pumping units by frequency converters // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – Ufa, Russia, 2020. – P. 1–5.
9. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. Technological parameters influence on energy intensity of oil wells pumps // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Moscow, Russia, 2018. – P. 1–4.
10. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive / N. Ladygin, D.D. Bogachenko, V.V. Kholin, N.A. Ladygin // 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). – Moscow, Russia, 2020. – P. 1–4.
11. Yashin A., Khakimyanov M. Wattmeter cards analysis of oil-producing pumps electric drives // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk, Russia, 2021. – P. 455–460.
12. Shafikov M., Khakimyanov M. Assessment of reliability of the electric submersible pump variable frequency drive // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russia, 2020. – P. 1–5.
13. Yashin A., Konev A., Khakimyanov M. Power supply of the sucker rod pump unit electric drive using renewable energy sources // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – Ufa, Russia, 2021. – P. 43–46.
14. Research test results of low voltage electric traction drive for commercial electric vehicle / K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko, R.V. Mironov, B.N. Sidorov, N.S. Volkov // Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – Moscow, Russia, 2022. – P. 1–6.
15. Review of efficiency measurement standards for wind turbines on nacelle test benches: based on small-scale test benches for electrical machines / N. Yogal, C. Lehrmann, H. Zhang, Z. Song, P. Weidinger, R. Kümme // 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Gyeongju, Republic of Korea, 2021. – P. 48–53.
16. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives // XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – St. Petersburg, Russia, 2020. – P. 1–5.
17. Model of laboratory test bench setup for testing electrical machines / V. Burenin, J. Zarembo, A. Žiravecka, L. Ribickis // IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – Riga, Latvia, 2020. – P. 1–5.
18. Popescu L., Craiu O., Melcescu L. Analyzing the torque transfer between two in-wheel motors of an electric vehicle // 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). – Bucharest, Romania, 2023. – P. 1–6.
19. Concept of the test bench for electrical vehicle propulsion drive data acquisition / A. Rassölkin, V. Rjabtšikov, T. Vaimann, A. Kallaste, V. Kuts // XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – St. Petersburg, Russia, 2020. – P. 1–8.
20. Способ регулирования потребляемой мгновенной мощности группой электроприводов штанговых глубинных насосных установок: пат. Рос. Федерация № 2797340, C1; заявл. 01.06.2022; опубл. 02.06.2023, Бюл. № 16.
21. Influence of an electric drive with periodic load on voltage quality / A. Ziuzev, A. Nakataev, S. Shelyug, V. Ippolitov // 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED). – Moscow, Russia, 2021. – P. 1–5.

Информация об авторах

Анатолий Михайлович Зюев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Энергетический институт, Уральский Федеральный университет, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, a.m.ziuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Антон Андреевич Накатаев, аспирант, инженер кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Энергетический институт, Уральский Федеральный университет, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, a.a.nakataev@urfu.ru

Константин Евгеньевич Нестеров, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский Энергетический институт, Уральский Федеральный университет, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, k.e.nesterov@urfu.ru

Поступила в редакцию: 27.05.2024

Поступила после рецензирования: 11.06.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Gevorkov L., Kirpichnikova I. Model of solar photovoltaic water pumping system for domestic application. *28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. Moscow, Russia, 2021. pp. 1–5.
2. Pechenik M., Burian S., Khudia I., Pushkar M., Teriaiev V. Operation modes investigation of cascade pump unit using refining hydraulic network model. *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2022. pp. 249–252.
3. Ziuzev A., Nakataev A., Sesekin A., Sashchenko D., Nesterov K. Method of power optimization of a group of independent electric drives with periodic load. *XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. Yekaterinburg, Russia, 2021. pp. 1–4.
4. Langbauer C., Diengsleder-Lambauer K., Lieschnegg M. Downhole dynamometer sensors for sucker rod pumps. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 8543–8552.
5. Mudrov M., Ziuzev A., Nesterov K., Valtchev S. Asynchronous electric drive power-hardware-in-the-loop system. *17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. Yekaterinburg, Russia, 2018. pp. 1–5.
6. Schmitz-Rode B., Stefanski L., Schwendemann R., Decker S., Mersche S., Kiehnle P., Himmelmann P., Liske A., Hiller M. A modular signal processing platform for grid and motor control, HIL and PHIL applications. *International Power Electronics Conference. ECCE Asia*. Himeji, Japan, 2022. pp. 1817–1824.
7. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies. *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. Pitesti, Romania, 2018. pp. 1–8.
8. Rzaev Y., Aliyev M., Rezvan M., Khakimyanov M. Electric energy saving calculation method in the management of sucker-rod pumping units by frequency converters. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2020. pp. 1–5.
9. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. Technological parameters influence on energy intensity of oil wells pumps. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, 2018. pp. 1–4.
10. Ladygin N., Bogachenko D.D., Kholin V.V., Ladygin N.A. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive. *27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*. Moscow, Russia, 2020. pp. 1–4.
11. Yashin A., Khakimyanov M. Wattmeter cards analysis of oil-producing pumps electric drives. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, Russia, 2021. pp. 455–460.
12. Shafikov M., Khakimyanov M. Assessment of reliability of the electric submersible pump variable frequency drive. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia, 2020. pp. 1–5.
13. Yashin A., Konev A., Khakimyanov M. Power supply of the sucker rod pump unit electric drive using renewable energy sources. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2021. pp. 43–46.
14. Sidorov M., Grishchenko A.G., Mironov R.V., Sidorov B.N., Volkov N.S. Research test results of low voltage electric traction drive for commercial electric vehicle. *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. Moscow, Russia, 2022. pp. 1–6.
15. Yogal N., Lehmann C., Zhang H., Song Z., Weidinger P., Kümme R. Review of efficiency measurement standards for wind turbines on nacelle test benches: based on small-scale test benches for electrical machines. *24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Gyeongju, Republic of Korea, 2021. pp. 48–53.
16. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives. *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. St. Petersburg, Russia, 2020. pp. 1–5.
17. Burenin V., Zarembo J., Žiravecka A., Ribickis L. Model of laboratory test bench setup for testing electrical machines. *IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga, Latvia, 2020. pp. 1–5.
18. Popescu L., Craiu O., Melcescu L. Analyzing the torque transfer between two in-wheel motors of an electric vehicle. *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania, 2023. pp. 1–6.
19. Rassölkin A., Rjabtšikov V., Vaimann T., Kallaste A., Kuts V. Concept of the test bench for electrical vehicle propulsion drive data acquisition. *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. St. Petersburg, Russia, 2020. pp. 1–8.
20. Ziuzev A.M., Nakataev A.A. Method for regulating instantaneous power consumption by a group of electric drives of sucker rod pumping units. Patent RF, no. 2797340, 2022.
21. Ziuzev A., Nakataev A., Shelyug S., Ippolitov V. Influence of an electric drive with periodic load on voltage quality. *28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. Moscow, Russia, 2021. pp. 1–5.

Information about the authors

Anatoliy M. Ziuzev, Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, a.m.ziuzev@urfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Anton A. Nakataev, Postgraduate Student, Engineer, Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, a.a.nakataev@urfu.ru

Konstantin E. Nesterov, Cand. Sc., Associate Professor, Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation, k.e.nesterov@urfu.ru

Received: 27.05.2024

Revised: 11.06.2024

Accepted: 19.03.2025

УДК 622.276.66

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Особенности эксплуатации инфильтрационных водозаборов (на примере Моховского месторождения подземных вод в Республике Хакасия)

А.В. Никитенкова[✉], А.Н. Никитенков, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]avk92@tpu.ru

Аннотация. Работа посвящена изучению особенностей эксплуатации инфильтрационных водозаборов в условиях изменчивости питания подземных вод. Рассматриваются вопросы влияния климатических и антропогенных факторов на питание эксплуатационного водоносного горизонта Моховского месторождения подземных вод. Водозабор характеризуется смешанным питанием за счёт формирования привлекаемых ресурсов из Красноярского водохранилища и из нижележащего горизонта верхнедевонских отложений. Динамический баланс между этими источниками определяется продуктивностью скважин и изменяющимся расстоянием береговой линии водохранилища (питающей границы) от скважин водозабора. Следствием перераспределения баланса в пользу глубинного питания является превышение предельно допустимой концентрации по величинам общей минерализации и жесткости. Анализ гидрогеологических условий позволяет оценивать изменчивость состава подземных вод под влиянием динамически меняющихся условий питания эксплуатационного водоносного горизонта. **Цель:** количественная оценка влияния граничных условий продуктивного горизонта Моховского месторождения на восполнение запасов подземных вод; прогнозное моделирование работы водозабора при изменчивости уровней поверхностных вод водохранилища; оценка изменения состава подземных вод под влиянием поступающих снизу вод девонских отложений и прогноз осаждения вторичных минералов на водоподъемном оборудовании на основе оценки минеральных равновесий. **Методы:** дешифрирование космоснимков, гидродинамическое моделирование, гидрогеохимические расчёты с последующим сопоставлением результатов прогнозов с реальными данными режимных наблюдений. **Результаты и выводы.** Показано, что дешифрирование многозональных космоснимков позволяет контролировать уровень режим водохранилища и оценивать его влияние на условия питания подземных вод. Результаты предложенной схемы построения прогнозов позволяют оценивать эффективность регулирования уровня режима водохранилища за счёт работы сооружений ГЭС и выявлять размеры зон питания инфильтрационных водозаборов. Продемонстрировано, что для обоснования необходимых размеров конечно-разностных сеток гидродинамических моделей можно привлекать дистанционно полученные данные. Результаты численного моделирования эксплуатации водозабора в среде ПК Processing Modflow показывают динамику изменения уровней в эксплуатационном водоносном горизонте при изменении уровня поверхностных вод водохранилища. Средствами ПК HydroGeo выявлена эволюция состава вод продуктивного горизонта под влиянием их смешения с поверхностными водами водохранилища и подземными водами верхнедевонских отложений, залегающими ниже, а также выполнена оценка вероятности образования вторичных минералов на водоподъемном оборудовании.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, подземные воды, химический состав, инфильтрация, смешение вод, физико-химическое и гидродинамическое моделирование

Для цитирования: Особенности эксплуатации инфильтрационных водозаборов (на примере Моховского месторождения подземных вод в Республике Хакасия) / А.В. Никитенкова, А.Н. Никитенков, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 154–168. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

UDC 622.276.66

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

Features of infiltration water intakes operation (on example of the Mokhovsky groundwater deposit in the Republic of Khakassia)

A.V. Nikitenkova[✉], A.N. Nikitenkov, E.M. Dutova, K.I. Kuzevanov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]avk92@tpu.ru

Abstract. Relevance. The work is devoted to the study of the features of infiltration intakes operation in conditions of variability of groundwater supply. The paper considers the issues of the impact of climatic and anthropogenic factors on the nutrition of the operational aquifer of the Mokhovsky groundwater deposit. The intake is characterized by a mixed nutrition due to the formation of attracted resources from the Krasnoyarsk reservoir and from the underlying horizon of the Upper Devonian sediments. The dynamic balance between the sources of attracted resources is determined both by the productivity of wells and the changing distance of the reservoir coastline (feeding boundary) from the water intake wells. A consequence of balance redistribution in favor of deep nutrition is a change in the chemical composition of groundwater, which leads to an excess of the maximum permissible concentration in terms of total mineralization and hardness. The analysis of hydrogeological conditions makes it possible to assess the variability of groundwater composition under the influence of dynamically changing supply conditions of an operational aquifer. **Aim.** Quantification of influence of boundary conditions on the Mokhovsky productive horizon during replenishment of groundwater reserves; predictive modeling of the intake operation with variability in reservoir surface water levels; assessment of changes in groundwater composition under the influence of incoming waters from Devonian sediments and forecast of the deposition of secondary minerals on water lifting equipment based on the assessment of mineral equilibria. **Methods.** Decoding satellite images, hydrodynamic modeling, hydrogeochemical calculations with subsequent comparison of forecast results with real data from routine observations. **Results and conclusions.** It is shown that the decryption of multi-zone satellite images makes it possible to control the reservoir level regime and assess its impact on groundwater supply conditions due to surface sources. The results of the proposed forecasting scheme make it possible to assess the effectiveness of regulating the reservoir level regime due to the operation of hydroelectric power plants and identify the size of the supply zones of infiltration intakes. It is demonstrated that remotely obtained data can be used to substantiate the necessary sizes of finite-difference grids of hydrodynamic models. The results of numerical simulation of water intake operation in the Processing Modflow PC environment show the dynamics of changes in levels in the operational aquifer with changes in the reservoir surface water level. Evolution of the composition of the waters of the productive horizon was revealed under the influence of their mixing with the surface waters of the reservoir and the groundwater of the Upper Devonian sediments below, and the probability of the formation of secondary minerals on the water lifting equipment was estimated using the HydroGeo software.

Keywords: remote sensing, groundwater, chemical composition, infiltration, mixing of waters, physico-chemical and hydrodynamic modeling

For citation: Nikitenkova A.V., Nikitenkov A.N., Dutova E.M., Kuzevanov K.I. Features of infiltration water intakes operation (on example of the Mokhovsky groundwater deposit in the Republic of Khakassia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 154–168. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/5045

Введение

Инфильтрационные водозаборы являются высокоэффективным методом обеспечения городов качественной питьевой водой. Полное или частичное обеспечение населения питьевой водой при использовании инфильтрационных водозаборов реализуется как во множестве городов России (Кемерово, Красноярск, Горно-Алтайск, Нижний Новгород, Самара, Казань и др.), так и за рубежом (Берлин, Германия; Торунь и Познань, Польша; Асуан, Египет; Дели, Индия; Амстердам, Нидерланды и

др.) [1–8], что обусловлено относительной простотой их эксплуатации и возможностью привлечения значительных по объемам ресурсов. Подобного рода водозаборы широко используются для водоснабжения населения и в республике Хакасия в городах Абакан, Абаза, Саяногорск, Черногорск, поселках Копьево и Пригорск (рис. 1).

Вместе с тем при использовании инфильтрационных водозаборов следует учитывать и дополнительные факторы, оказывающие влияние на формирование качества подземных вод.

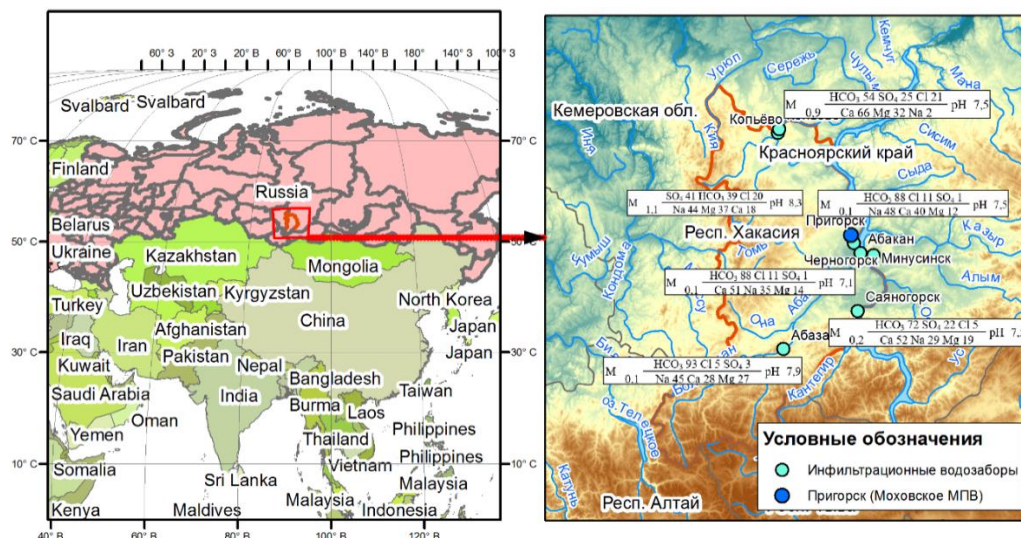


Рис. 1. Схема расположения инфильтрационных водозаборов республики Хакасия с формулами Курлова для состава эксплуатируемых вод

Fig. 1. Layout of the infiltration intakes of the Khakassia with Kurlov formulas for groundwater composition

Сравнение условий эксплуатации таких месторождений подземных вод республики Хакасия показывает, что в наиболее выгодном положении оказываются водозаборы, приуроченные к хорошо разработанным долинам полноводных рек (водозаборы городов Абакан, Саяногорск, Абаза). Общая минерализация воды здесь составляет 100–200 мг/дм³. В долинах малых рек и в пределах участков, удаленных от поверхностных водотоков, ситуация зачастую усугубляется подтягиванием некондиционных вод смежных водоносных горизонтов, происходящим за счёт работы водозаборных сооружений. Примером является водозабор ж/д станции Копьево в долине р. Чулым, где минерализация подземных вод, отбираемых из пойменных галечников, превышает 1000 мг/дм³. Более сложная ситуация характерна для Моховского месторождения, расположенного в долине р. Енисей на берегу Красноярского водохранилища, которое эксплуатировалось для водоснабжения пгт. Пригорск (рис. 1, 2).

В условиях изменчивости климата, а также в результате сложностей с согласованием регулирования стока на каскадах ГЭС рассмотренные проблемы в ряде случаев усугубляются вследствие значительного снижения уровней в поверхностных водных объектах. Исходя из этого очевидна необходимость учета гидрогеологических условий, а также прогнозирование работы водозаборов в изменчивых антропогенно-климатических условиях. Проблематика эксплуатации инфильтрационных водозаборов как в гидрогеологическом, так и в гидрогеохимическом аспектах рассматривалась в ряде работ отечественных [9–17] и зарубежных гидрогеологов [2–8, 18].

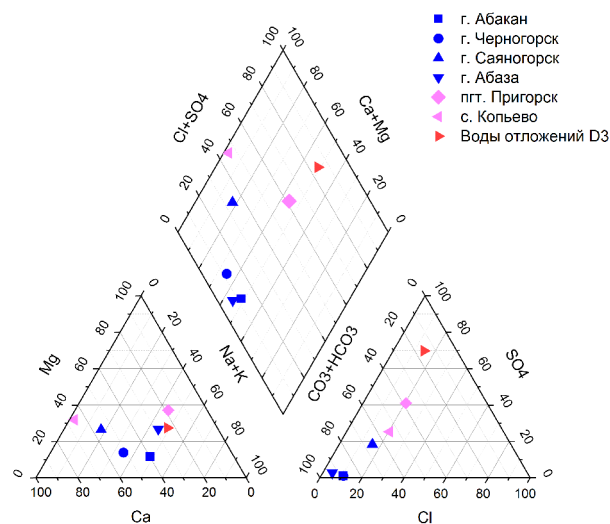


Рис. 2. Диаграмма Пайпера с составом вод инфильтрационных месторождений

Fig. 2. Piper diagram with the composition of the waters of infiltration deposits

Целью данной работы является рассмотрение влияния изменчивости граничных условий продуктивного горизонта Моховского месторождения на восполнение запасов подземных вод при эксплуатации Пригорского водозабора. Достижение данной цели реализуется на основе объединения классических подходов к оценке формирования ресурсов подземных вод на инфильтрационных водозаборах и современных методов, основанных на дешифрировании космоснимков, гидродинамическом и гидрогеохимическом моделировании.

В ходе анализа гидрогеологических условий территории решались следующие задачи:

- 1) исследование динамики уровня Красноярского водохранилища на участке водозабора;
- 2) моделирование работы инфильтрационного водозабора;
- 3) исследование гидрогеохимического режима эксплуатации подземных вод с применением физико-химических расчётов и моделирования.

Для изучения динамики уровней подземных вод в процессе эксплуатации месторождения в зависимости от изменчивости зеркала поверхностных вод Красноярского водохранилища привлекались данные режимных наблюдений за уровнями водохранилища [19] и выполнялось дешифрирование многозональных космоснимков [20].

Анализ условий формирования ресурсов проводился на основе построенной гидродинамической модели, включающей данные по эксплуатационным скважинам и учитывающей динамику береговой линии водохранилища как питающей границы.

Эволюция состава подземных вод при эксплуатации месторождения исследовалась с использованием гидрогеохимической модели. Оценивались минеральные равновесия и возможность вторичного минералообразования в условиях эксплуатации водозабора, сопровождающейся перераспределением балансовых составляющих эксплуатационных запасов подземных вод. Падение уровня поверхностных вод сокращает их приток к водозабору с одновременным нарастанием подтягивания высокоминерализованных вод из нижележащих верхнедевонских отложений, что ведёт к закономерному росту минерализации добываемой из скважин воды.

Характеристика объекта исследования

Моховское месторождение расположено в северо-восточной части Южно-Минусинской котловины (рис. 3), в районе аала Мохов и пгт. Пригорск.

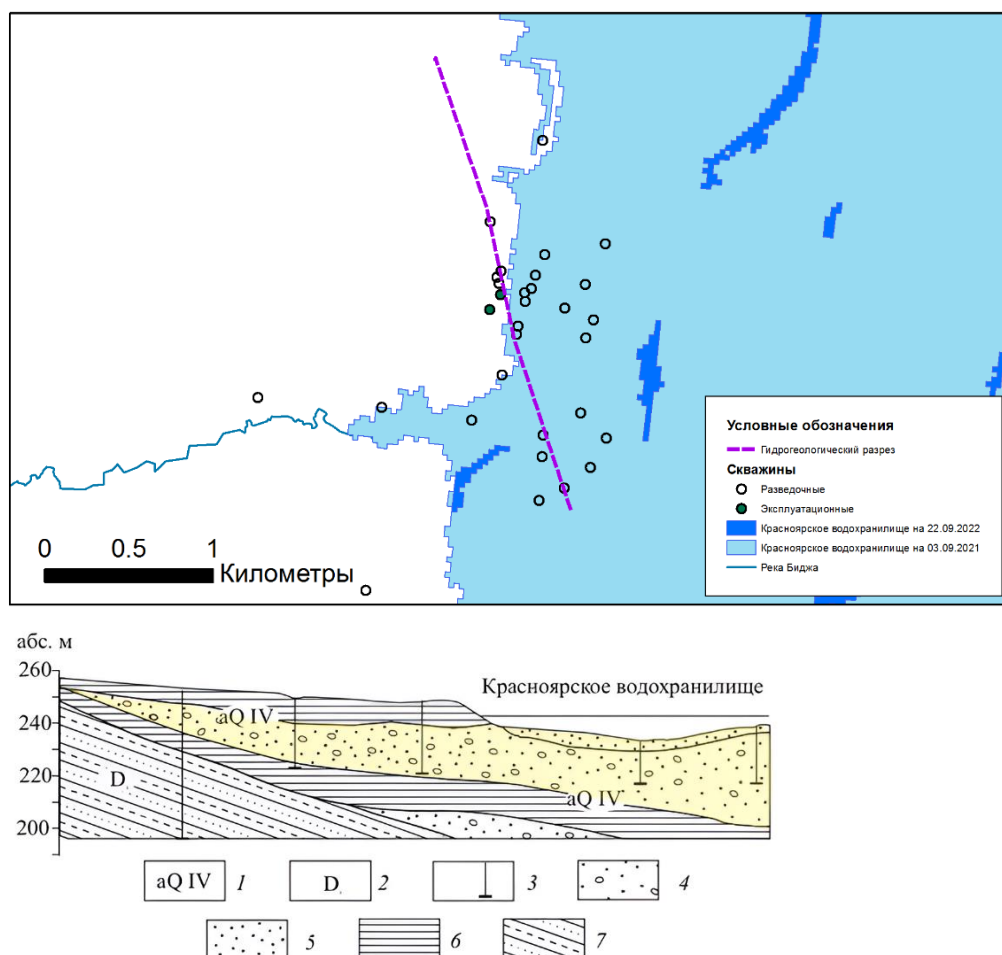


Рис. 3. Схема строения Моховского месторождения подземных вод: 1 – водоносный горизонт современных аллювиальных отложений; 2 – водоносный комплекс верхнедевонских терригенных отложений; 3 – гидрогеологические скважины; 4 – гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем; 5 – пески; 6 – глины; 7 – алевролиты, песчаники, аргиллиты

Fig. 3. Hydrogeological section of the Mokhovskiy groundwater deposit: 1 – aquifer of modern alluvial deposits; 2 – aquifer complex of Upper Devonian terrigenous deposits; 3 – hydrogeological wells; 4 – gravel and pebble deposits with sandy aggregate; 5 – sands; 6 – clays; 7 – siltstones, sandstones, mudstones

Геоморфологически месторождение приурочено к террасе, периодически затопляемой при изменениях уровня воды в водохранилище. По характеру гидрогеологических особенностей относится к третьей группе месторождений со сложными условиями.

Продуктивным является водоносный горизонт современных четвертичных аллювиальных отложений долины р. Енисей, представленный гравийно-галечниковым материалом с песчаным заполнителем. Горизонт подстилается комплексом верхне-девонских отложений, содержащих напорные сульфатные магниевые воды, имеющие повышенную минерализацию (1,6–4,0 г/дм³). Фильтрационные свойства пород и водообильность продуктивного горизонта достаточно высокие. Удельные дебиты скважин изменяются от 1,1–4,6 до 9,2–20,2 л/с [9].

Режим подземных вод определяется как гидрологическим режимом Красноярского водохранилища, характеризующимся максимальным положением уровня в осенний период и минимальным – в апреле–мае, так и постоянной разгрузкой солоноватых подземных вод девонских отложений, происходящей в продуктивный горизонт через гидравлические окна в нижнем глинистом слое аллювия. Воды водохранилища гидрокарбонатно-кальциевые, пресные, мягкие с жесткостью не выше 1,6 ммоль/дм³.

При отборе подземных вод из четвертичных аллювиальных отложений эксплуатационными скважинами водозабора общая минерализация в зависимости от положения уровня воды в водохранилище колеблется от 0,13 г/дм³ при высоком его стоянии до 1,3, а иногда и 2,0 г/дм³ при отступлении береговой линии от водозабора. Состав вод при этом меняется с гидрокарбонатного натриевого на сульфатный магниевый, сульфатный натриевый, характерные для вод девонских отложений, под-

стилающих продуктивный водоносный горизонт (табл. 1).

Методика исследования

Методика проведенных в работе исследований носила комплексный характер и проводилась по ряду направлений.

Дешифрирование космоснимков для анализа расположения зоны восполнения ресурсов Моховского водозабора

Основной задачей данного этапа работы является комплексное исследование влияния динамики акватории Красноярского водохранилища на гидрогеологические условия эксплуатации Моховского месторождения подземных вод водоснабжения пгт. Пригорск.

Исходными данными для выполнения работы послужили фондовые материалы по оценке запасов подземных вод Моховского месторождения, включая документацию по мониторингу подземных вод, данные Енисейского бассейнового водного управления по уровням воды в верхнем бьефе Красноярской ГЭС (размещенные в открытом доступе на сайте Росводресурсов [19]), 16 космоснимков *LandSat 8* за период с 03.2021 до 03.2023 и дополнительные материалы по гидрогеологическим условиям [9].

При поиске пригодных для дешифрирования космоснимков использовалось два главных критерия: отсутствие облачности над акваторией водохранилища и наличие свободной воды, которую можно достаточно качественно идентифицировать при автоматизированном распознавании. Все снимки относятся к периоду с аномально низкими уровнями воды в Енисее (2021–2023 гг.). Данный период интересен большой амплитудой колебаний уровня воды, отражающей разнообразие условий поступления вод в продуктивный водоносный горизонт Моховского водозабора.

Таблица 1. Состав подземных вод Пригорского водозабора

Table 1. Composition of underground waters of the Prigorsky water intake

Название горизонта Name of horizon	Содержание, мг/л/Contents, mg/l							pH	Жесткость общая, ммоль-л Total water hardness mmol-l	Сухой остаток, мг/л Dry residue, mg/l
	HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	Ca	Mg	Fe _{общ}			
Средний состав отдельных ионов по эксплуатационным скважинам на начало эксплуатации месторождения Average composition of individual ions for production wells at the beginning of field operation										
aQ _{IV}	85,4	7,1	4,9	26	10	1,2	Н.д./n.a.	7,70	0,6	134,6
D ₃	392,80	215,45	1389,22	463,51	196,23	138,33	Н.д./n.a.	7,68	21,16	2509,14
Средний состав отдельных ионов по эксплуатационным скважинам за 2021 г. Average composition of individual ions for production wells in 2021										
aQ _{IV}	Н.д./n.a.	144	498	Н.д./n.a.	Н.д./n.a.	Н.д./n.a.	<0,1	7,66	10,0	1316
Содержание, мг/л, согласно СанПин 1.2.3685-21 Content, mg/l, according to SanPiN 1.2.3685-21										
–	–	<350	<500	200	180	40	2	<0,3	6–9	<1000

Для дешифрирования использовался ближний инфракрасный канал со спектральным диапазоном 0,85–0,89 мкм и пространственным разрешением 30 м, являющийся одним из самых удобных для идентификации водной поверхности [9]. Для выделения на космоснимках береговой линии и ранжирования различных типов подстилающей поверхности осуществлена интерактивная контролируемая классификация. Этот этап обработки требует предварительного формирования обучающих выборок по соответствующим типам подстилающей поверхности, которые должны быть оформлены в виде файла сигнатур (с выделением водных объектов, растительности и горных пород).

На основе результатов дешифрирования космоснимков были получены данные о положении береговой линии водохранилища и отдельных проток в радиусе 9 км от водозабора (для оценки всей верхней части площади зеркала водохранилища). На указанном расстоянии оценивается степень затопления акватории водохранилища как вверх, так и вниз по течению с охватом территории противоположного берега.

Положение береговой линии существенно влияет на условия восполнения запасов продуктивного водоносного горизонта, т. к. значительно увеличивает расстояние от водозаборных скважин до питающей границы в условиях обмеления водохранилища. Диагностика положения береговой линии в среде *ПК ArcGIS 10* выполнялась с использованием растрово-векторного преобразования в полигоны классов поверхности, полученных в результате дешифрирования. На основе полученных данных оценивалось расположение области питания продуктивного горизонта Моховского месторождения подземных вод поверхностными водами относительно скважин водозабора.

Дополнительно проанализирована связь размеров площади свободной водной поверхности с уровнями в верхнем бьефе водохранилища (табл. 2). Оценка производилась как непосредственно на дату космоснимков, так и со смещением по срокам до двух недель для учёта времени фронта возмущения и связанного с ним изменения уровней. Уровни воды в верхнем бьефе водохранилища были получены с официального сайта Росводресурсов [19]. В качестве базовой оценки по затоплению чаши водохранилища принята площадь свободной водной поверхности по космоснимку на 03.09.2021 г. Этой дате соответствует как отметка уровня 242,4 м (близкая к максимуму 242,52 м, наблюдавшемуся 29.08.2021 г., для периода наблюдений с 2021 по 2024 гг.), так и максимальная площадь затопления (92,4 км² в пределах радиуса в 9 км от водозабора), к которой приведены оценки площадей затопления за другие даты.

Таблица 2. Данные по космоснимкам и уровням воды от Енисейского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов

Table 2. Data on Landsat images and water levels from the Yenisei Basin Water Management of the Federal Agency of Water Resources

Дата снимка Image date	Уровень верхнего бьефа Красноярского водохранилища, м Level of upstream Krasnoyarsk reservoir, m	Дата замера уровней в верхнем бьефе Красноярского водохранилища (+5 дней к дате снимка) Date of measuring the levels in the upper reaches of the Krasnoyarsk reservoir (+5 days to the date of the snapshot)	Доля площади акватории при максимальных уровнях, покрытая водой в радиусе 9 км от водозабора Proportion of the water area at maximum levels covered by water within a radius of 9 km from the intake
17.07.2021	241,6	22.07.2021	0,96
02.08.2021	241,81	07.08.2021	0,99
18.08.2021	242,34	23.08.2021	0,92
03.09.2021	242,4	08.09.2021	1,00
05.10.2021	241,2	10.10.2021	0,99
07.04.2022	230,78	12.04.2022	0,29
15.04.2022	231,02	20.04.2022	0,24
17.05.2022	232,58	22.05.2022	0,26
10.06.2022	233,95	15.06.2022	0,41
26.06.2022	233,46	01.07.2022	0,37
04.07.2022	233,26	09.07.2022	0,30
12.07.2022	233,21	17.07.2022	0,29
28.07.2022	233,13	02.08.2022	0,30
13.08.2022	232,77	18.08.2022	0,24
22.09.2022	232,17	27.09.2022	0,21
16.10.2022	232,28	21.10.2022	0,21

Разработка гидродинамической модели

Схематизация гидрогеологических условий показывает, что питание эксплуатационного водоносного горизонта в границах Моховского месторождения осуществляется преимущественно за счёт поверхностных вод Красноярского водохранилища гидравлически связанных с водоносным горизонтом четвертичных отложений, сложенных гравийно-галечниковыми отложениями с высокими значениями фильтрационных параметров, и за счёт подтягивания высокоминерализованных вод отложений верхнего девона, залегающих ниже. Сверху продуктивный горизонт перекрыт слоем глины и суглинков, снизу – слоями переслаивающихся песком глины и суглинков. Коэффициент фильтрации на границе с водохранилищем изменяется от 24 до 243 м/сутки, при коэффициентах фильтрации до 125 м/сутки в затопляемой части горизонта. Связь продуктивных отложений с водами Красноярского водохранилища установлена в результате

режимных наблюдений [19]. Нижележащий напорный водоносный комплекс верхнего девона распространён в западной части месторождения, сложен тонкозернистыми песчаниками. По фильтрационным параметрам комплекс неоднороден [21].

Прогноз изменения гидрогеологических условий месторождения под влиянием эксплуатации инфильтрационного водозабора в условиях изменяющегося уровня воды в Красноярском водохранилище выполнен средствами ПК *Processing Modflow 8* на основе разработанной четырёхслойной гидродинамической модели [22]. Расположение области моделирования показано на рис. 4.



Рис. 4. Расположение зоны охвата гидродинамической модели (на основе карт google)

Fig. 4. Location of the coverage area of the hydrodynamic model (based on Google maps)

Разработка гидродинамической модели выполнялась с использованием вспомогательных средств предварительной подготовки исходных данных в виде матриц неоднородности параметров с размерностью, соответствующей детальности конечно-

разностной сетки. Такие матрицы заполнялись в среде электронных таблиц ПК *Excel* по всем пространственным параметрам модели, включая абсолютные отметки рельефа, кровли и подошвы расчётных слоев модели. Интерполяция неоднородных параметров выполнялась с использованием ПК *Surfer* и сохранялась в файлах *grid*-файлы с размерностью, соответствующей детальности расчётной сетки, позволяющей выполнять передачу данных напрямую в ПК *Processing Modflow* без дополнительного преобразования. Основные параметры расчётных слоев модели, включая их фильтрационно-емкостные характеристики, полученные при оценке запасов, представлены в табл. 3.

В пределах временных интервалов до одного года могут наблюдаться относительно стабильные уровни воды в водохранилище. В связи с этим расчётный срок решения прогнозных задач моделирования в течение периода относительно стабильных уровней поверхностных вод установлен продолжительностью в один год. Дебит скважин изменялся по двум вариантам для оценки режимов их эксплуатации как при фактических параметрах нагрузки, так и при максимальных разрешенных лицензией расходах.

Поле начальных напоров задано по данным разведочных работ в пределах месторождения и с учетом понижения уровней. Величина активной пористости водовмещающих отложений задана на основе фондовых материалов, характеризующих гидрогеологические условия района.

Физико-химические расчеты и моделирование

Для изучения состава формирующихся под влиянием водоотбора вод и выпадающих из них вторичных минералов проведены физико-химические расчёты и моделирование в программном комплексе *HydroGeo* (автор – М.Б. Букаты, ТПУ [23]).

Моделировалось смешение вод аллювиальных и верхнедевонских отложений, рассмотренное ранее, а также оценена минералообразующая способность полученной смеси.

Таблица 3. Параметры слоёв, используемые в модели гидрогеологических условий водозабора

Table 3. Parameters of layers used in the model of hydrogeological conditions of water intake

Водоносный горизонт Aquifer	Начальные напоры, м Initial heads, m	Дебит скважины 1, м³/сут Well 1 discharge, m³/day	Дебит скважины 2, м³/сут Well 2 discharge, m³/day	Параметр проницаемости границы с рекой, м/сут Permeability of river bank, m/day	Отметка дна реки, м Level of river bottom, m	Пористость Porosity	Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day
aQ _{IV}	231(о)/243(н)	–	–	–	–	0,5	0,001
aQ _{IV}	231(о)/243(н)	153(ф)/450(п)	153(ф)/450(п)	200	230	0,25	120
aQ _{IV}	231(о)/243(н)	–	–	–	–	0,5	0,001
D ₃	245	–	–	–	–	0,25	120

*(о) – обмеление/shallowing, (н) – нормальные уровни вод/normal water levels, (ф) – фактические расходы/current discharge, (п) – проектные расходы/projected discharge.

При расчётах использовались параметры, характерные для средних ландшафтно-климатических условий района ($T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{общ}}=1\text{ атм}$). Система представлена 15 базовыми ионами (H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Al^{3+} , e^- , OH^- , $(\text{NO}_3)^-$, $(\text{SO}_4)^{2-}$, Cl^- , $(\text{HCO}_3)^-$, SiO_2 , H_2O), 33 компонентами водного раствора (CO_2 , $(\text{CO})^{2+}$, $(\text{CO}_3)^{2-}$, H_2CO_3 , $(\text{NH}_4\text{CO}_3)^-$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NH_4HCO_3 , $(\text{NH}_4)^+$, NaHCO_3 , Na_2CO_3 , $(\text{NaCO}_3)^-$, Na_2SO_4 , $(\text{NaSO}_4)^-$, MgCO_3 , $(\text{MgHCO}_3)^+$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, MgSO_4 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, $(\text{AlOH})^{2+}$, $(\text{Al}(\text{OH})_2)^+$, $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$, $(\text{CaHSO}_4)^+$, $\text{Ca}(\text{HSO}_4)_2$, CaCO_3 , $(\text{Ca}(\text{CO}_3)_2)^{2-}$, $(\text{CaHCO}_3)^+$, $(\text{FeHCO}_3)^+$, $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_2)^+$, $(\text{FeNO}_3)^{2+}$, $(\text{FeSO}_4)^+$, $(\text{Fe}(\text{SO}_4)_2)^-$, $(\text{FeOH})^{2+}$, $(\text{Fe}(\text{OH})_4)^-$), 54 минералами: $\text{Na}_{27}\text{Ca}_{10}\text{K}_{02}(\text{Fe}^{3+})_{19}\text{Mg}_{22}\text{Al}_{1.58}\text{Si}_{3.94}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Na–Ca), $\text{Mg}_{2.75}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит (Mg), $\text{Mg}_{2.25}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{1.25}\text{O}_5(\text{OH})_4$ – хлорит (Mg), $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ – хлорит (Mg), $\text{MgAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Mg), $\text{Mg}_{6.525}(\text{Fe}^{3+})_{3.35}\text{Al}_{1.47}\text{Si}_{3.82}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Mg–Fe³⁺), $\text{Mg}_{6.7}(\text{Fe}^{3+})_{1.4}\text{Al}_{1.84}\text{Si}_{3.68}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Mg–Fe³⁺), $\text{Mg}_{4.85}(\text{Fe}^{3+})_{2.2}\text{Al}_{1.71}\text{Si}_{3.81}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Mg–Fe³⁺), $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ х – хлорит (Mg), $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ – хлорит (Al), $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м – монтмориллонит, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ к – каолинит, KAlSi_3O_8 – полевошпат (K), $\text{K}_8\text{Al}_{2.56}\text{Si}_{3.38}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит (K₈), $\text{K}_3\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (K), $\text{K}_5\text{Al}_{2.5}\text{Si}_{3.4}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит (K), $\text{K}_{3.3}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – бейделлит (K), $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – мусковит, $\text{K}_{6.7}\text{Al}_{2.67}\text{Si}_{3.33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит (K_{6.7}), $\text{K}_5(\text{Fe}^{3+})\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{3.4}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит (K–Fe³⁺), $\text{K}(\text{Fe}^{3+})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – мусковит (Fe³⁺), $\text{K}(\text{Fe}^{2+})\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м – мусковит (Fe²⁺), $\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м – мусковит (Mg), $\text{K}_6\text{Mg}_{2.5}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.4}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит (K–Mg), $\text{K}_{7.2}\text{Na}_{0.6}\text{Ca}_{0.1}(\text{Fe}^{3+})_{0.9}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_{2.59}\text{Si}_{3.25}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит, $\text{K}_{6.3}\text{Na}_{0.17}\text{Ca}_{1.45}(\text{Fe}^{3+})_{0.327}\text{Mg}_{3.49}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_{3.421}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит, $\text{K}_{7.54}\text{Na}_{0.06}\text{Ca}_{0.025}(\text{Fe}^{3+})_{0.038}\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.672}\text{Si}_{3.253}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит, $\text{K}_{5.6}\text{Na}_{0.4}\text{Mg}_{2.4}\text{Al}_{2.68}\text{Si}_{3.22}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – иллит, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ – анортит, $\text{Ca}_{15}\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Ca), $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – пренит, $\text{Ca}_{1.87}\text{Na}_{0.205}\text{K}_{0.205}\text{Fe}^{3+}_{1.41}\text{Mg}_{3.36}\text{Al}_{1.59}\text{Si}_{3.93}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Fe²⁺–Mg), $(\text{Fe}^{2+})_4(\text{Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_7$ – хлорит (Fe²⁺–Fe³⁺), $(\text{Fe}^{3+})_{3.35}\text{Mg}_{4.456}\text{Al}_{1.6084}\text{Si}_{3.82}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Fe³⁺–Mg), $(\text{Fe}^{2+})_{2.924}\text{Mg}_{2.9}\text{Al}_{1.6984}\text{Si}_{3.935}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Fe²⁺–Mg), $(\text{Fe}^{2+})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ т – тальк (Fe), $\text{Na}_3\text{Al}_{1.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – монтмориллонит (Na), NaCl – галит, SiO_2 х – халцедон, SiO_2 кв – кварц, KHCO_3 – калицит, K_2SO_4 – арканит, CaCO_3 а – арагонит, CaCO_3 к – кальцит, CaSO_4 – ангидрит, $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ – гипс, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ – доломит, $(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$ сф – сидерит сферол, $(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$ – сидерит, $(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3$ – гематит, $(\text{Fe}^{3+})\text{OOH}$ – гётит, $(\text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ – магнетит.

Для реализации расчётов выполнены следующие работы:

- 1) настройка модели: выбор базовых ионов, ассоциатов, минералов;
- 2) смешение вод водохранилища и девонских отложений с различными соотношениями (шаг 10 %);
- 3) анализ параметра насыщенности для полученной смеси вод.

Балансировка электронейтральности раствора, необходимая для проведения расчётов, осуществлена за счёт преобладающего в начальном растворе иона Na^+ .

Смешение производится во вкладке ПК Hydro-Geo «Смешение–испарение» путём ввода составов смешиваемых вод и соотношения смешения. После смешения с выбранным соотношением оценивается параметр насыщенности (вкладка «растворение–осаждение»). Оценка возможного процесса вторичного минералообразования производилась путём моделирования взаимодействий в системе вода–порода вплоть до достижения равновесий (расчёт во вкладке «растворение–осаждение»).

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование уровневого режима поверхностных вод с привлечением данных дистанционного зондирования

В результате дешифрирования многозональных космоснимков получена оценка динамики перемещения береговой линии во времени. Часть фактического материала после обработки представлена на рис. 5.

На протяжении 2021 г. в летние месяцы наблюдались относительно небольшие колебания отметок уровней воды в верхнем бьефе Красноярской ГЭС от 241,39 до 242,44 м. В 2022 г. амплитуда изменения уровней в течение теплого времени года достигала 3,3 м при абсолютных значениях от 230,55 до 233,92 м. Оценка площадей свободной водной поверхности по результатам дешифрирования космоснимков за 2021 и 2022 гг. наглядно показывает, что 2021 г. был многоводным. В течение этого периода свободная водная поверхность водохранилища находилась на расстоянии 30–40 м от водозабора, без существенных изменений на протяжении всего года. Гидрологический режим за 2022 г. характеризуется катастрофическим обмелением реки Енисей, в процессе которого линия уреза свободной воды отступила от водозабора на расстояние до 1 км. Сопоставление уровней затопления представлено на рис. 6.

В результате сопоставления относительных площадей затопления в пределах 9-ти километрового радиуса от водозабора с уровнями воды в верхнем бьефе водохранилища на даты в пределах двухнедельного интервала от даты снимка было установлено, что наибольший коэффициент корреляции порядка 0,985 достигается при сопоставлении уровней и площадей, при условии что уровни берутся на дату через 5 суток после даты снимка (предполагая, что 5 суток соответствуют времени добега воды до створа Красноярской ГЭС).

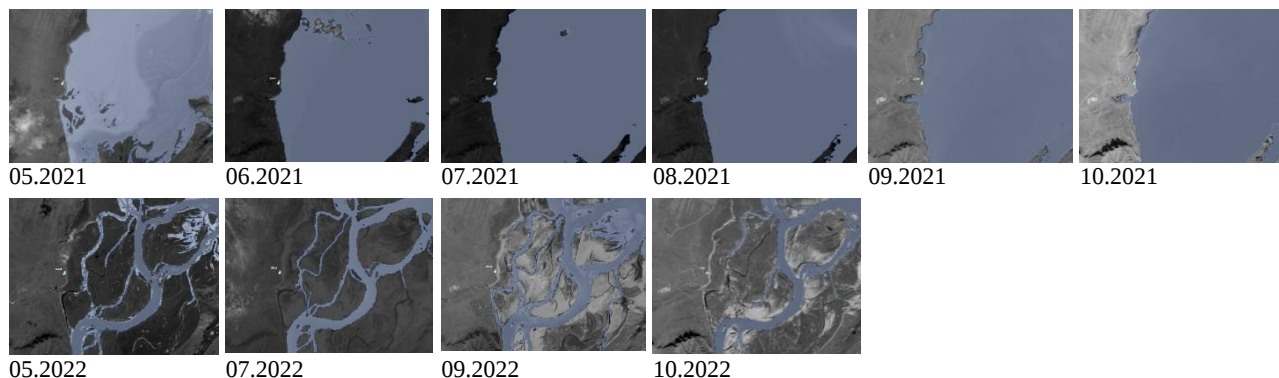
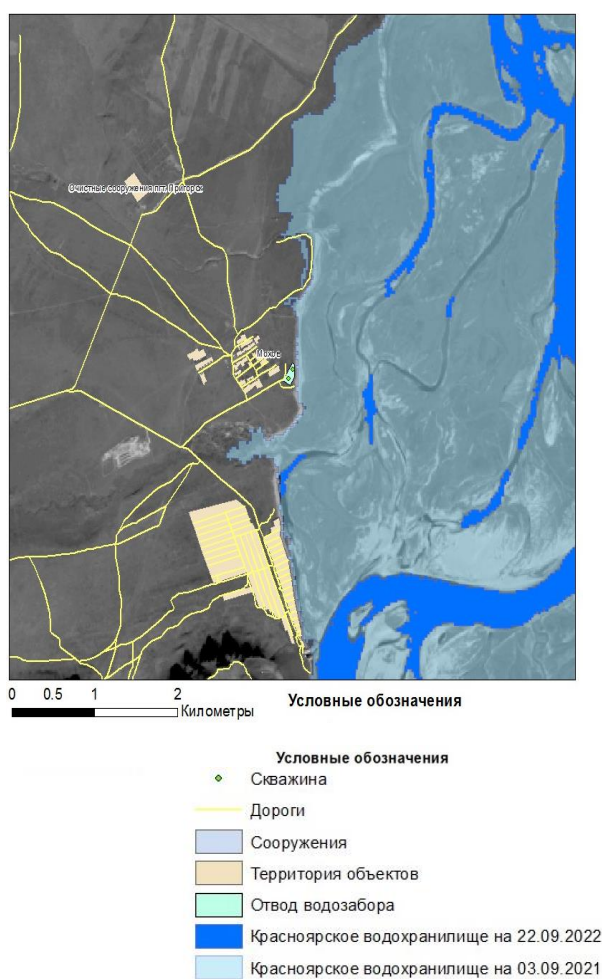


Рис. 5. Схема расположения зеркала водохранилища (грязно-синим) в районе Моховского водозабора на даты наблюдений

Fig. 5. Layout of the reservoir mirror (dirty blue) in the area of the Mokhovsky water intake on the observation dates



В качестве подложки использован панхроматический канал снимка за 22.09.2022

Рис. 6. Площадь зеркала Красноярского водохранилища при различных уровнях воды

Fig. 6. Surface of the Krasnoyarsk reservoir water mirror at various water levels

Исходя из анализа заполненности водохранилища на основе космоснимков можно сделать вывод о том, что близким к оптимальному для пита-

ния водозабора является уровень порядка 240,4 м (по снимку за 21.10.2021 г.). При дальнейшем росте уровней значимых изменений береговой линии не происходит, а при их значимом существенном снижении (на 10.06.2022 г. до отметки близкой к 234 м) происходит обмеление, ведущее к отходу свободной воды от водозабора на расстояние до 1 км (вместо 30–50 м при типичных, близких к оптимальным, условиях).

Гидродинамическая модель

В результате анализа гидрогеологического разреза территории и материалов проведенных на ней исследований создана четырехслойная модель (рис. 7). Работа реализована в среде программного комплекса Surfer. Данные, полученные в результате оцифровки геологических границ, использованы для создания численной гидродинамической модели средствами программного комплекса Processing Modflow 8.

Моделирование изменения уровней подземных вод проведено на прогнозный период одного гидрологического года эксплуатации водозабора со следующими возможными сочетаниями условий питания:

- 1) обмеление водохранилища+фактические расходы скважин;
- 2) обмеление водохранилища+максимальные по лицензии расходы скважин;
- 3) нормальные уровни водохранилища+фактические расходы скважин;
- 4) нормальные уровни водохранилища+максимальные по лицензии расходы скважин.

Помимо определения величин понижения уровней подземных вод под влиянием водоотбора, была проведена оценка размеров водозахватных областей эксплуатационных скважин на расчетный период, продолжительностью один год, для рассмотренных выше условий питания продуктивного горизонта. Результаты представлены на рис. 8, 9.

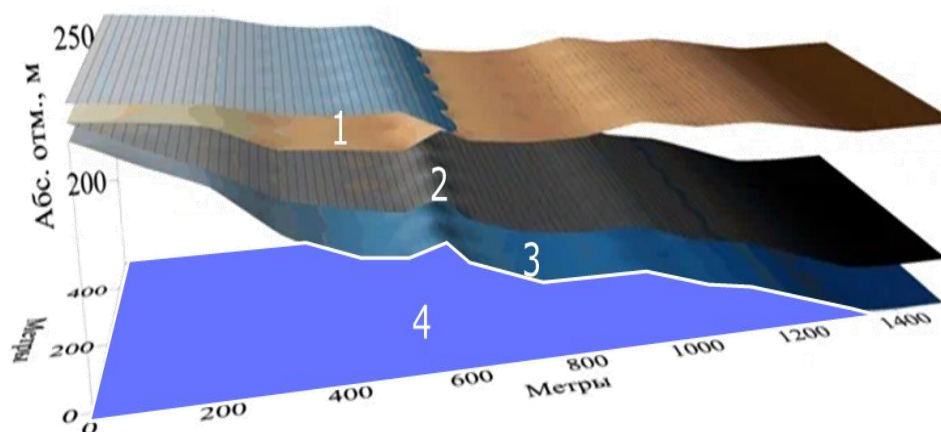


Рис. 7. Схематическая модель геологического разреза Моховского месторождения подземных вод: 1 – глинистые отложения; 2 – четвертичные аллювиальные отложения, представленные гравийно-галечниковым материалом с песчаным заполнителем (продуктивный водоносный горизонт); 3 – переслаивающиеся глины, суглинки; 4 – водоносный комплекс верхнедевонских отложений

Fig. 7. Model of the hydrogeological section of the Mokhovskiy groundwater deposit: 1 – clay deposits; 2 – Quaternary alluvial deposits represented by gravel-pebble material with sandy aggregate (productive aquifer); 3 – overlapping clays, loams; 4 – aquifer complex of the Upper Devonian sediments

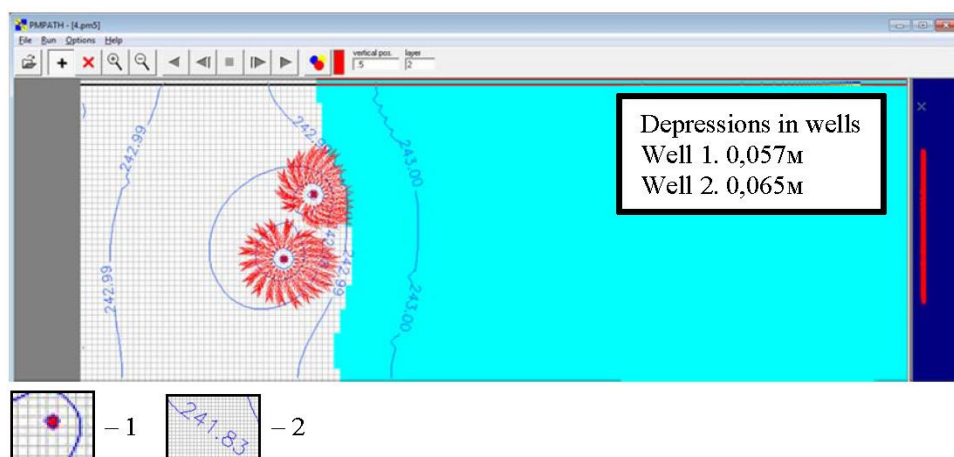


Рис. 8. Результат решения прогнозной геофильтрационной задачи в функции напора через один год эксплуатации скважин с расходом 308 м³/сутки: 1 – эксплуатационная скважина; 2 – гидроизогипсы и их абсолютные отметки в условиях эксплуатации по результатам моделирования

Fig. 8. Result of solving the forecast model (after one year) with a well flow rate of 308 m³/day: 1 – production well; 2 – water level and its absolute marks under operating conditions based on the results of modeling

В результате моделирования установлено, что при наступлении периодов сильного обмеления водохранилища питание продуктивного горизонта теоретически может существенно измениться за счёт увеличения доли притока солоноватых подземных вод девонских отложений. При нормальных уровнях в водохранилище, зафиксированных на момент подсчёта запасов подземных вод, баланс между водами четвертичных отложений и девона определяется режимом эксплуатации скважин. Это способствует интенсивному разбавлению солоноватых подземных вод пресными поверхностными, привлекаемыми из водохранилища.

Геохимические особенности и минералообразующая способность вод месторождения

При эксплуатации водозабора происходит изменение химического состава вод водоносного горизонта за счёт изменчивости соотношения вод девонских отложений и вод водохранилища, при определенном соотношении которых происходит превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) по отдельным компонентам, а также активизируется выпадение вторичных карбонатных минералов на водоподъемном оборудовании [24], ведущее к скорому выходу его из строя.

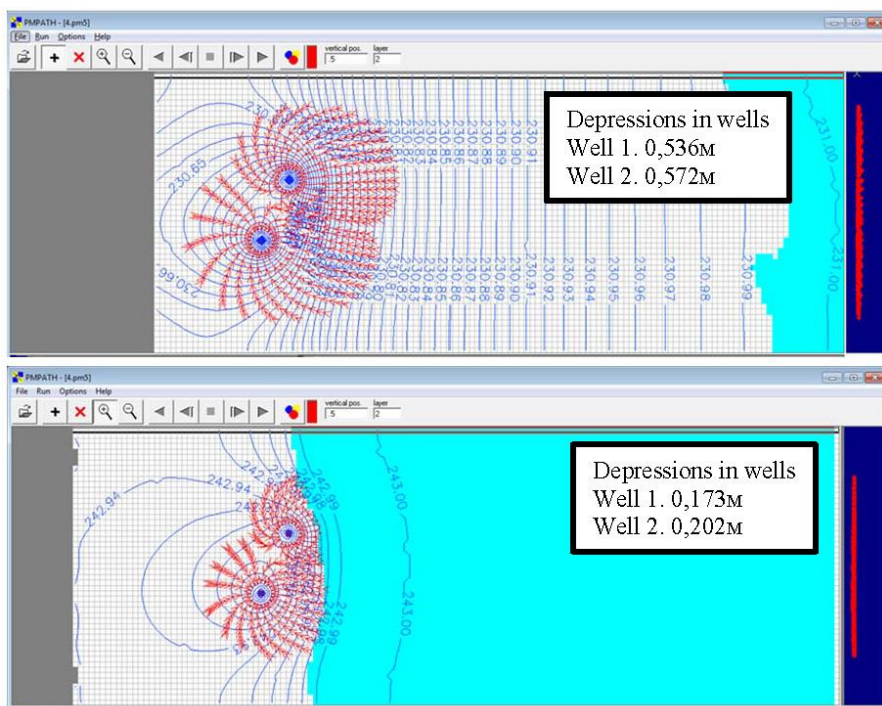


Рис. 9. Результат решения прогнозной гидродинамической модели (анализ областей подтягивания вод за 1 год) при расходе скважин 900 м³/сутки

Fig. 9. Result of solving a predictive hydrodynamic model (analysis of areas of water pull-up for 1 year) at a well flow rate of 900 m³/day

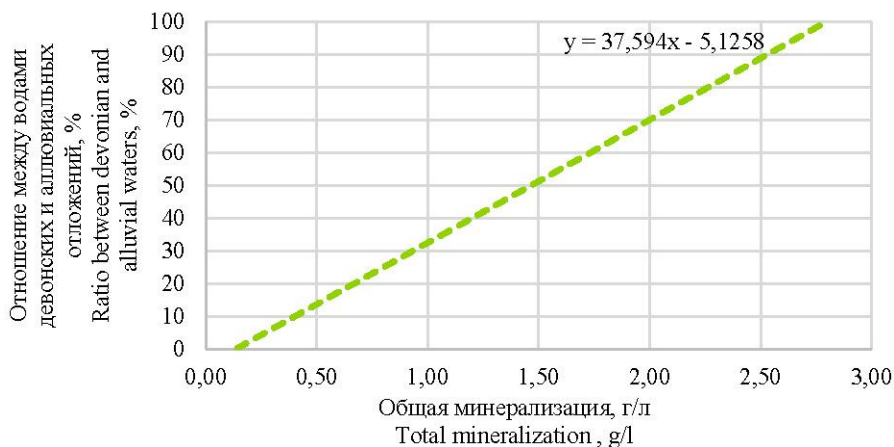


Рис. 10. Изменение минерализации продуктивного горизонта Моховского месторождения в зависимости от доли вод девонских отложений

Fig. 10. Change in productive horizon mineralization of the Mokhovsky deposit depending on the proportion of waters of Devonian deposits

Как видно из полученной зависимости (рис. 10), превышение ПДК по минерализации происходит при доле девонских вод более 32,5 %. При этом пробы из скважин водозабора, взятые в 2021 г., показывают величины минерализации порядка 1,2–1,3 г/л [24], что соответствует доле вод из девонских отложений в ~40–45 %.

Параметры насыщенности к вторичным минералам смеси из вод девонских отложений и Енисея,

оцененные при различных соотношениях вод с шагом 10 %, представленные в табл. 6, характеризуют возможность выпадения соответствующих вторичных минералов из раствора: положительные значения соответствуют насыщенности раствора к минералу и возможности его выпадения в осадок, отрицательные – не насыщенному состоянию раствора, позволяющему растворять данный минерал при его наличии.

Таблица 5. Параметр насыщенности* к вторичным минералам при различных соотношениях вод из водохранилища и девонского горизонта

Table 5. Saturation parameter* to secondary minerals at different ratios of water from the reservoir and the Devonian horizon

Минерализация, г/л Mineralization, g/l		0,14	0,40	0,67	0,93	1,20	1,47	1,73	2,00	2,26	2,53	2,80
Минерал Mineral	Соотношение вод Ratio											
	Формула Formula	1,0:0,0	0,9:0,1	0,8:0,2	0,7:0,3	0,6:0,4	0,5:0,5	0,4:0,6	0,3:0,7	0,2: 0,8	0,1: 0,9	0,0: 1,0
Хлорит (Mg) Chlorite (Mg)	$Mg_{2,25}Al_{1,5}Si_{1,25}O_5(OH)_4$	7,6	13	14	14	15	15	15	15	15	16	16
Арагонит Aragonite	$CaCO_3$ а	-1,8	-0,67	-0,086	0,32	0,63	0,95	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7
Кальцит/Calcite	$CaCO_3$ к	-1,9	-0,76	-0,17	0,24	0,55	0,87	1	1,2	1,4	1,5	1,6
Ангидрит/Anhydrite	$CaSO_4$	-8,8	-4,8	-3,8	-3,3	-2,9	-2,6	-2,4	-2,2	-2	-1,9	-1,8
Гипс/Gypsum	$CaSO_4(H_2O)_2$	-7,1	-3,1	-2,2	-1,6	-1,3	-0,98	-0,75	-0,57	-0,41	-0,27	-0,15
Доломит/Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	-2,7	0,93	2,2	3	3,7	4,3	4,6	5,1	5,3	5,6	5,8
Сидерит (сферолит) Siderite (spherical)	$(Fe^{2+})CO_3$ сф	-3,2	-3,2	-3,3	-3,3	-3,3	-3,2	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,4
Сидерит/Siderite	$(Fe^{2+})CO_3$	-2,3	-2,3	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4	-2,5	-2,5	-2,5
Хлорит/Chlorite ($Fe^{2+}-Fe^{3+}$)	$(Fe^{2+})_4(Fe^{3+})Al_2Si_3O_{10}(OH)_7O$	7,2	4,4	3,9	3,4	3	3,2	2,2	2,4	1,7	1,6	1,3
Гематит/Hematite	$(Fe^{3+})_2O_3$	5,8	4,9	4,6	4,4	4,1	4,3	3,7	3,8	3,5	3,4	3,2
Гётит/Goetite	$(Fe^{3+})OOH$	6,5	6,1	5,9	5,8	5,7	5,8	5,5	5,5	5,4	5,3	5,2
Магнетит/Magnetite	$(Fe^{2+})(Fe^{3+})_2O_4$	16	15	14	14	13	14	13	13	12	12	12

Железа, как и алюминия, в водах крайне мало (предполагаем, что в микроскопических количествах данные элементы в водах присутствуют, поэтому приняты значения содержания порядка 0,000001 мг/л для оценки возможности минералообразования с учетом этих элементов), поэтому и минералов, их содержащих, образовываться может немного. В значимых объемах в виде вторичной фазы могут выпадать арагонит, кальцит и доломит.

Характерно, что при наблюдаемом в продуктивном водоносном горизонте соотношении вод, близком к 0,7:0,3–0,6:0,4, начинается выпадение в осадок кальцита и арагонита, что ведет к быстрому накоплению вторичных минеральных образований на водоподъемном оборудовании и выходу его из строя. При этом изначально предполагалось, что водозабор будет эксплуатироваться в типично инфильтрационном режиме (запасы утверждены в 15,5 тыс. м³/сутки) с разбавлением вод продуктивного горизонта водами водохранилища. Как видно из результатов моделирования, проблемы с образованием вторичных минералов можно было бы избежать при данном сценарии его работы.

Вывод

Изучена возможность применения гидродинамического моделирования для прогноза работы водозабора в условиях изменчивости уровня воды в водохранилище и оценки влияния режима поверхностных вод на условия эксплуатации Моховского месторождения подземных вод.

В результате численного моделирования условий эксплуатации водозабора средствами ПК

Processing Modflow получена оценка влияния положения уреза береговой линии и отметок уровня поверхностных вод на условия водоотбора за счёт перераспределения балансовых составляющих привлекаемых ресурсов и изменения качества подземных вод.

Показано, что исходные данные для корректного задания граничных условий, используемых при прогнозных оценках на основе моделирования гидрогеологических условий, могут быть уточнены в результате дешифрирования многозональных космоснимков.

Убедительно доказано, что данные, получаемые дистанционно, позволяют на численных гидродинамических моделях не только корректировать размеры области питания и поясов зоны санитарной охраны инфильтрационных водозаборов, но и более обоснованно подходить к построению расчётных конечно-разностных сеток.

В результате оценок минеральных равновесий, полученных средствами ПК HydroGeo, выявлены основные черты эволюции состава подземных вод эксплуатационного водоносного горизонта аллювиальных отложений Моховского месторождения в процессе их смешения с поверхностными водами Красноярского водохранилища и с водами верхнедевонских отложений, залегающими ниже подошвы продуктивного пласта. Даны оценки рисков образования вторичных минералов на водоподъемном оборудовании и возможного ухудшения качества подземных вод за счёт перетоков из подстилающего водоносного горизонта.

Таким образом, применение гидродинамического моделирования не только позволяет эффективно контролировать изменчивость уровней в скважинах, но и служит обоснованием количественных параметров смещения природных вод для постановки и решения прогнозных задач гидрогеохимического моделирования.

Комплексный подход к использованию цифровых технологий при анализе гидрогеологических условий инфильтрационных водозаборов позволяет системно и более обоснованно подходить к процессу планирования и организации водоотбора не только на рассматриваемом водозаборе, но и на других аналогичных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев Ф.А., Орлов Г.А. Водоснабжение больших городов зарубежных стран. – М.: Стройиздат, 1987. – 351 с.
2. Kołaska S., Jeż-Walkowiak J., Dymaczewski Z. Changes of physicochemical and microbiological parameters of infiltration water at Dębina intake in Poznań, unique conditions – a flood // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 30. – article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/20183001004
3. Kubiak-Wójcicka K., Jamorska I., Górski L. Identification of risks for drinking water intakes in urbanized area: the case study of Toruń (Central Poland) // Water. – 2021. – Vol. 13. – № 23. – Article 3378. DOI: 10.3390/w13233378
4. Analysis of the performance of bank filtration for water supply in arid climates: case study in Egypt / A. Abdelrady, S. Sharma, A. Sefelnasr, M. El-RAWY, M. Kennedy // Water. – 2020. – Vol. 12. – № 6. – article 1816. DOI: 10.3390/w12061816
5. Challenges and possible solutions for riverbank filtration sites in Upper Egypt / M. ElHadary, A. Salah, M. Beshoy, R. Peters, A. Ghanem, A. Elansary, R. Wahaab, M. Mostafa // Air, Soil and Water Research. – 2024. – Vol. 17. – P. 1–11. DOI: 10.1177/11786221241274480
6. Riverbank filtration: a frontline treatment method for surface and groundwater – African perspective / F. Uwimpaye, G. Twagirayezu, I. Odiri Agbamu, K. Mazurkiewicz, J. Jeż-Walkowiak // Environmental Monitoring and Assessment. – 2025. – Vol. 11. – article 100331. DOI: 10.1007/s10661-024-13413-4
7. National feasibility study & roadmap for riverbank filtration in Egypt. Available at: <https://unhabitat.org/> (дата обращения 03.02.2025).
8. Grischek T., Bartak R. Riverbed clogging and sustainability of riverbank filtration // Water. – 2016. – Vol. 8. – № 12. – Article 604.
9. Подземные воды Республики Хакасия и водоснабжение населения / Д.С. Покровский, Е.М. Дутова, А.А. Булатов, К.И. Кузеванов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 300 с.
10. Изменение гидрогеохимических условий при эксплуатации Академического месторождения / Е.М. Дутова, И.В. Вологодина, Д.С. Покровский, Л.Д. Замооровская // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 59–63.
11. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н. Использование изотопных методов для оценки ресурсов запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. – 2024. – № 1. – С. 74–82. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_1_74.
12. Yalaletdinova A., Kantor E., Galimova Yu. Drinking-water quality risk assessment based on parameters with organoleptic (taste and odor) effects observed in water from surface water intake and infiltration water intake facilities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 670. – Article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/670/1/012046.
13. Modeling the content of chloroform in drinking water infiltration intake by periods of the annual cycle: low-water and permanent watercourse / M. Malkova, N. Minchenkov, O. Kantor, E. Kantor // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 390. – Article 05002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339005002.
14. Гидрогеологические аспекты развития водохозяйственных технологий урбанизированных территорий на примере Оренбуржья / А.Я. Гаев, И.В. Куделина, И.Н. Алферов, Т.В. Леонтьева // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21. – № 1. – С. 24–33. DOI: 10.17072/psu.geol.21.1.24
15. Плотноков Н.И. Поиски и разведка пресных подземных вод. – М.: Недра, 1985. – 370 с.
16. Никитин М.Р. Оценка влияния водохранилищ на гидрогеологические условия / отв. ред. И.С. Зекцер. – М.: Наука, 1990. – 94 с.
17. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. – Киев: Выща шкклоа, 1989. – 407 с.
18. Effect of initial treatment of surface water at an artificial infiltration intake / J. Jeż-Walkowiak, A. Makala, B. Mądrecka-Witkowska, M. Michalkiewicz, N. Kolwicz. // Desalination and Water Treatment. – 2021. – Vol. 226. – P. 62–76. DOI: 10.5004/dwt.2021.27264.
19. Росводресурсы. URL: <https://voda.gov.ru/> (дата обращения 03.02.2025).
20. Mondejar J.P., Tongco A.F. Near infrared band of Landsat 8 as water index: a case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines // Sustain Environ Res. – 2019. – Vol. 29. – № 16. DOI: 10.1186/s42834-019-0016-5
21. Материалы создания Государственной гидрогеологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение) лист N-46 – Абакан–Красноярск, 2017. – Красноярск, Красноярский филиал ФБУ "ТФГИ по СФО".
22. Кузеванов К.И. Моделирование работы системы взаимодействия скважин в среде PMWIN (Processing Modflow). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 64 с.
23. Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Kuzevanov K.I. The HydroGeo Software Package and Its Usage // E3S Web of Conferences. 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference). – Tomsk, Russia, July 21–26, 2019. – Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199804005
24. ГУП РХ «Хакресводоканал». URL: <https://www.hakresvod.ru/> (дата обращения 03.02.2025).

Информация об авторах

Александра Васильевна Никитенкова, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, avk92@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2684-9085>

Алексей Николаевич Никитенков, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, nik@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8539-1420>

Екатерина Матвеевна Дутова, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, dutova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-6685>

Константин Иванович Кузеванов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, kki55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3219-7031>

Поступила в редакцию: 03.03.2025

Поступила после рецензирования: 11.03.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Shevelev F.A., Orlov G.A. *Water supply in large cities of foreign countries*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 351 p. (In Russ.)
2. Kołaska S., Jeż-Walkowiak J., Dymaczewski Z. Changes of physicochemical and microbiological parameters of infiltration water at Dębina intake in Poznań, unique conditions – a flood. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 30, article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/20183001004
3. Kubiak-Wójcicka K., Jamorska I., Górski L. Identification of risks for drinking water intakes in urbanized area: the case study of Toruń (Central Poland). *Water*, 2021, vol. 13, no. 23, Article 3378. DOI: 10.3390/w13233378
4. Abdelrady A., Sharma S., Sefelnasr A., El-Rawy M., Kennedy M. Analysis of the performance of bank filtration for water supply in arid climates: case study in Egypt. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, article 1816. DOI: 10.3390/w12061816
5. ElHady M., Salah A., Beshoy M., Peters R., Ghanem A., Elansary A., Wahaab R., Mostafa M. Challenges and possible solutions for riverbank filtration sites in Upper Egypt. *Air, Soil and Water Research*, 2024, vol. 17, pp. 1–11. DOI: 10.1177/11786221241274480
6. Uwimpaye F., Twagiraye G., Odiri Agbamu I., Mazurkiewicz K., Jeż-Walkowiak J. Riverbank filtration: a frontline treatment method for surface and groundwater – African perspective. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 11, article 100331. DOI: 10.1007/s10661-024-13413-4
7. *National feasibility study & roadmap for riverbank filtration in Egypt*. Available at: <https://unhabitat.org/> (accessed 3 February 2025).
8. Grischek T., Bartak R. Riverbed clogging and sustainability of riverbank filtration. *Water*, 2016, vol. 8, no. 12, article 604.
9. Pokrovsky D.S., Dutova E.M., Bulatov A.A., Kuzevanov K.I. *Groundwater of the Republic of Khakassia and water supply to the population*. Tomsk, NTL Publ. House, 2001. 300 p. (In Russ.)
10. Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Zamorovskaya L.D. Changes in hydrogeochemical conditions during the exploitation of the Academic deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 59–63. (In Russ.)
11. Tokarev I.V., Isakov V.A., Isakova T.N. The use of isotope methods for assessing groundwater reserves. *Exploration and protection of the subsoil*, 2024, no. 1, pp. 74–82. (In Russ.) DOI: 10.53085/0034-026X_2024_1_74.
12. Yalaletdinova A., Kantor E., Galimova Yu. Drinking-water quality risk assessment based on parameters with organoleptic (taste and odor) effects observed in water from surface water intake and infiltration water intake facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 670, Article 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/670/1/012046.
13. Malkova M., Minchenkov N., Kantor O., Kantor E. Modeling the content of chloroform in drinking water infiltration intake by periods of the annual cycle: low-water and permanent watercourse. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 390, article 05002. DOI: 10.1051/e3sconf/202339005002.
14. Gaev A.Ya., Kudelina I.V., Alferov I.N., Leontieva T.V. Hydrogeological aspects of the development of water management technologies in urbanized territories on the example of Orenburg region. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 24–33. (In Russ.) DOI: 10.17072/psu.geol.21.1.24
15. Plotnikov N.I. *Prospecting and exploration of fresh groundwater*. Moscow, Nedra Publ., 1985. (In Russ.)
16. Nikitin M.R. *Assessment of the influence of reservoirs on hydrogeological conditions*. Ed. by I.S. Zektser. Moscow, Nauka Publ., 1990. 94 p. (In Russ.)
17. Borevsky B.V., Drobnokhod N.I., Yazvin L.S. *Assessment of groundwater reserves*. Kiev, Visha Shkola Publ., 1989. 407 p. (In Russ.)
18. Jeż-Walkowiak J., Makala A., Mądrecka-Witkowska B., Michalkiewicz M., Kolwicz N. Effect of Initial treatment of surface water at an artificial infiltration intake. *Desalination and Water Treatment*, 2021, vol. 226, pp. 62–76. DOI: 10.5004/dwt.2021.27264.
19. *Rosvodresursy*. Available at: <https://voda.gov.ru/> (accessed 3 February 2025).

20. Mondejar, J.P., Tongco, A.F. Near infrared band of Landsat 8 as water index: a case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines. *Sustain Environ Res*, 2019, vol. 29, no. 16. DOI: 10.1186/s42834-019-0016-5
21. *Materials for the creation of the 1:1000000 scale State Hydrogeological Map of the Russian Federation (third generation) sheet N-46 – Abakan – Krasnoyarsk, 2017*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk department of TFGI on SFO (In Russ.)
22. Kuzevanov K.I. *Modeling the operation of the well interaction system in the PMWIN (Processing Modflow) environment*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House of, 2011. 64 p. (In Russ.)
23. Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Kuzevanov K.I. The HydroGeo Software Package and Its Usage. *E3S Web of Conferences. 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference)*. Tomsk, Russia, July 21–26, 2019. Vol. 98. DOI: 10.1051/e3sconf/20199804005
24. *GUP RH "Khakresvodokanal"*. Available at: <https://www.hakresvod.ru/> (accessed 3 February 2025).

Information about the authors

Alexandra V. Nikitenkova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, avk92@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2684-9085>

Aleksey N. Nikitenkov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, nik@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8539-1420>

Ekaterina M. Dutova, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, dutova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-6685>

Konstantin I. Kuzevanov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, kki55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3219-7031>

Received: 03.03.2025

Revised: 11.03.2025

Accepted: 19.03.2025

УДК 528.8:630
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4935
Шифр специальности ВАК: 25.00.26

Совершенствование метода инвентаризации земель рекреационных зон на примере парка Сосновка города Санкт-Петербург

В.Ф. Ковязин¹, О.А. Пасько^{2✉}, А.О. Борисова¹, Ч.А. Нгуен¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

² Национальный открытый институт, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ pasko@noispb.ru

Аннотация. Актуальность. Систематический сбор и анализ информации о количестве, состоянии, возрастном и видовом разнообразии городских насаждений, их распределении и использовании позволяют эффективно управлять зелеными насаждениями, разрабатывать мероприятия по их охране, защите, восстановлению и устойчивому использованию. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли создает возможность использовать в качестве исходных материалов для инвентаризации насаждений космические снимки, благодаря которым можно проводить учет растительного покрова дистанционным методом, вместо наземного, что сокращает сроки проведения работ и уменьшает их объем, тем самым повышая эффективность учета земельных ресурсов города. **Цель.** Использование космических снимков для инвентаризации земельных ресурсов парка Сосновка при разработке цифрового паспорта объекта исследования. **Методы.** Расчет вегетационного индекса NDVI с использованием геоинформационной системы QGIS. **Результаты и выводы.** Проведен расчет значений индекса NDVI космического снимка. По полученным значениям выделены категории элементов ландшафта парка Сосновка (искусственно созданные объекты, насаждения, водные объекты и др.), определены их площадь, а также общая площадь всего парка. Проведено сравнение результатов инвентаризации, проведенной наземным и дистанционным методами. Расхождения не превышают 4 %, что соответствует нормативам лесоустройства, действующим в России. Разработана схема совершенствования метода инвентаризации земель рекреационных зон урбанизированных территорий с помощью дистанционного зондирования Земли. Сделан вывод о востребованности, применимости и эффективности усовершенствованного метода для инвентаризации зеленых насаждений. Его внедрение позволит сократить время, упростить выполнение работ и снизить их стоимость, повысить объективность и обеспечить доступ к архивным материалам для проведения мониторинга растительных ресурсов, выявления тенденций изменения и прогнозирования перспектив. Полученные результаты станут основой для исследований, связанных с инвентаризацией земель рекреационных зон в зависимости от доступных данных и целей исследования.

Ключевые слова: инвентаризация, мониторинг, зеленые насаждения, наземный метод, дистанционное зондирование Земли, NDVI

Для цитирования: Совершенствование метода инвентаризации земель рекреационных зон на примере парка Сосновка города Санкт-Петербург / В.Ф. Ковязин, О.А. Пасько, А.О. Борисова, Ч.А. Нгуен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 169–178. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4935

UDC 528.8:630
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4935

Improving the method of inventory of lands of recreational zones on the example of Sosnovka Park in St. Petersburg

V.F. Kovyazin¹, O.A. Pasko^{2✉}, A.O. Borisova¹, Ch.A. Nguyen¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

² National Open Institute, St. Petersburg, Russian Federation

✉ pasko@noispb.ru

Abstract. Relevance. Systematic collection and analysis of information on the quantity, condition, age and species diversity of green spaces, their distribution and use allow for effective management of the country green resources, development of measures for their protection, restoration and sustainable use. The development of Earth remote sensing technologies makes it possible to use space images as source materials for inventory of green spaces, thanks to which it is possible to conduct an inventory remotely instead of field survey, which reduces the time of work and its volume, thereby increasing the efficiency of land resources accounting. **Aim.** The use of satellite images to account for the land resources of Sosnovka Park in the inventory for the development of a digital passport of the object. **Methods.** Calculation of the NDVI using the QGIS geoinformation system. **Results and conclusions.** The authors have calculated the NDVI values of the satellite image. According to the obtained values, they identified the categories of elements of the park landscape of Sosnovka Park (artificially created objects, plantings, water bodies, etc.), determined their areas, as well as the total area of the park. The paper introduces the comparison of the results of the inventory conducted by ground and remote methods. The discrepancies do not exceed 4%, which corresponds to the forest management standards in force in Russia. The authors developed the scheme to improve the method of land inventory of recreational areas of urbanized territories using remote sensing of the Earth. The conclusion is made about the relevance, applicability and effectiveness of the improved method for the inventory of green spaces. Its implementation will reduce time, simplify the execution of works and reduce their cost, increase objectivity and provide access to archival materials for monitoring plant resources, identifying trends and forecasting prospects. The results obtained will form the basis for research related to the inventory of recreational areas, depending on the available data and the objectives of the study.

Keywords: inventory, monitoring, green spaces, ground-based method, remote sensing of the Earth, NDVI

For citation: Kovyazin V.F., Pasko O.A., Borisova A.O., Nguyen Ch.A. Improving the method of inventory of lands of recreational zones on the example of Sosnovka Park in St. Petersburg. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 169–178. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4935

Введение

В большинстве стран стремительная урбанизация ведет к сокращению территорий, занятых естественными насаждениями [1]. Это негативно влияет на химический состав [2], температуру воздуха [3] и почвы [4], качество окружающей среды и в конечном итоге на благополучие людей, их заболеваемость и смертность [4, 5]. Зеленые насаждения в мегаполисах являются важным средством создания комфортной городской среды проживания [6], повышения качества жизни горожан, снижения уровня антропогенного воздействия на природную экосистему и поддержания биоразнообразия [7].

Наличие растительности в городе, независимо от категории и площади зеленых насаждений, рассматривается в качестве экономичного и экологичного условия для комфортного проживания населения и значимого фактора устойчивого развития территории. Согласно рекомендациям ВОЗ (Всемирная Организация Здравоохранения), площадь зеленых насаждений должна составлять на душу населения 9–50 м². Особое внимание уделяется качеству зеленых насаждений, контроль за которым осуществляется в рамках их инвентаризации. Отметим, что в Санкт-Петербурге наиболее озелененными являются Петродворцовый, Пушкинский и Курортный районы. В них на каждого жителя приходится от 51,69 до 91,96 м² земли зеленых насаждений, наименее – Василеостровский (6,91 м²) и Адмиралтейский (4,84 м²) районы [8].

Важным инструментом учета и оценки качественного и количественного состояния зеленых зон города, их составляющих, а также определения выполняемых ими экологических функций являет-

ся инвентаризация зеленых насаждений [9]. В ее рамках проводят комплекс работ, включающий обследование состояния зеленых насаждений, учет древесных и кустарниковых видов, оценку их влияния на городскую экосистему, составление тематических карт и планов [10]. Правила и порядок проведения инвентаризации зеленых насаждений, а также меры по охране и управлению озелененными землями определяет нормативно-правовая база [11]. В настоящее время она регламентирует только наземный метод инвентаризации [12, 13]. На наш взгляд, более информативен и перспективен метод, основанный на обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [14, 15] с помощью геоинформационной системы QGIS, однако он применяется только для оценки лесных ресурсов [16] и нуждается в адаптации, связанной со спецификой объекта исследования.

Цель исследования – совершенствование метода инвентаризации земель рекреационной зоны на примере парка Сосновка города Санкт-Петербург путем использования данных дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы

Объект исследования – парк Сосновка, расположенный в Выборгском районе города Санкт-Петербург, один из самых крупных парков города. Его ограничивают проспекты Светлановский – с юго-востока; Тихорецкий – с востока, Северный – с севера; проспект Тореза – с юго-запада; границы парка проходят также по улицам Витковского, Жака Дюкло и Лиственная [16].

Парк условно разделен на две зоны: юго-западнее улицы Жака Дюкло расположена территория с развитой инфраструктурой, северо-восточнее – слабо подвергшаяся антропогенному воздействию. В западной части парка находятся спортивно-стрелковый клуб «Олимпиец» и стрельбище; в северо-западной части – шесть торфяных прудов [17]. На территории Сосновки имеется система осушительных каналов и водоемов, созданная в том числе в рекреационных целях (табл. 1). Площадь водоемов составляет: Собачий пруд – 0,97 га; Южный и Северный пруды на Тихорецком проспекте – 0,66 и 0,92 га соответственно; Восточный, Западный и Средний пруды на улице Лиственной – 0,46; 0,38 и 0,13 га. Средняя глубина варьирует в пределах 1,7–1,9 м, максимальная – от 2,1 до 2,4 м.

Преобладающими породами в парке являются сосна обыкновенная и береза пушистая, встречаются лиственница европейская, дуб черешчатый, липа мелколистная и клен остролистный. Изначально парк представлял собой чистый аборигенный сосновый лес. После осушения торфяников и изменения условий внешней среды произошла сукцессия и частичная экзогенетическая смена сосны на березу. В классическом лесоводстве этот процесс рассматривается как регрессивный, обесценивающий лесной фонд. Сосновая древесина более ценная, чем березовая. В настоящее время 55 % территории парка занято сосной, 43 % – березой и 2 % – прочими древесными породами [17].

В России инвентаризацию парковых земель осуществляют раз в пять лет в соответствии с требованием [12]. При наземном обследовании определяют преобладающую породу насаждений, состав, возраст деревьев, их диаметр на высоте 1,3 м, высоту, густоту древостоя, сомкнутость полога, санитарное состояние и другие таксационные (оценочные) показатели. На основании полученных результатов дают оценку о состоянии зеленых насаждений и мерах, необходимых для улучшения ситуации [18]. Также отмечают площадь элементов благоустройства: виды покрытий дорожек, площадь под спортивными и прочими строениями и сооружениями, под водоемами. Площадь объекта инвентаризации вычисляют по его тематическому плану одним из способов: разбивка на простейшие геометрические фигуры; использование планиметра или палетки, аналитически. Полученные сведения вносят в Паспорт объекта инвентаризации.

Указанные выше сведения могут быть получены с помощью данных ДЗЗ, что частично показано в [19–22]. В данной работе предложена комплексная методика инвентаризации зеленых насаждений на примере парка Сосновка с использованием космоснимков [23], NDVI [24, 25] и геоинформационной системы QGIS, которая включает следующие этапы:

1. *Определение границ и площади.* Этап выполнен фотограмметрическим методом. Определено местоположение характерных точек границ парка Сосновка путем оцифровки космического снимка [26] и расчета площади в программном обеспечении ГИС [27].
2. *Определение породного состава естественных и искусственных насаждений.* Для качественной оценки земель парка и растительности применен синтез спектральных каналов, которые при определенных комбинациях позволили выделить и визуализировать некоторые характеристики пространственных объектов (породный состав насаждений, наличие определенного количества биомассы (запаса древесины) в насаждениях) [28]. Для идентификации видов древесно-кустарникового и растительного покрова использована комбинация спектральных каналов NIR-Red-Green «искусственные цвета». При ее применении ярко-красным цветом отображаются лиственные породы, красно-коричневым – хвойные деревья, светло-красным – кустарниковая и травянистая растительность; голубым – искусственно созданные объекты (здания, дороги, спортивные площадки), серым – земля без растительности, черным – водные объекты (пруды). Количество деревьев каждой породы определено глазомерно-измерительным методом при инвентаризации земель парка в ходе разработки паспорта зеленых насаждений объекта. Расчеты проведены статистическим методом и путем закладки на снимке в разных местах парка пяти пробных площадей размером 100×100 м. На них по форме кроны установлено количество хвойных и лиственных пород; затем найдено среднее значение на каждой площадке, переведено на всю площадь парка и определена доля каждой группы пород.
3. *Определение площадей элементов ландшафта.* После расчета вегетационных индексов определены площади различных по составу древостоев, а также иных объектов, расположенных на землях парка. Расчеты проведены путем векторизации полученного растрового изображения по значениям NDVI. Использованы космические снимки спутника Sentinel-2 на сайте ESA – Copernicus. Они отдельно импортированы в QGIS для дальнейшего анализа. Границы парка Сосновка определены путем их оцифровки по космическому снимку. Для этого в программе QGIS создан новый слой, в котором построен полигональный объект по расположению поворотных точек границ парка. Определение породного состава насаждений и дешифрирование земель парка Сосновка с помощью комбинации спектральных каналов NIR-Red-Green приведены на рис. 1.

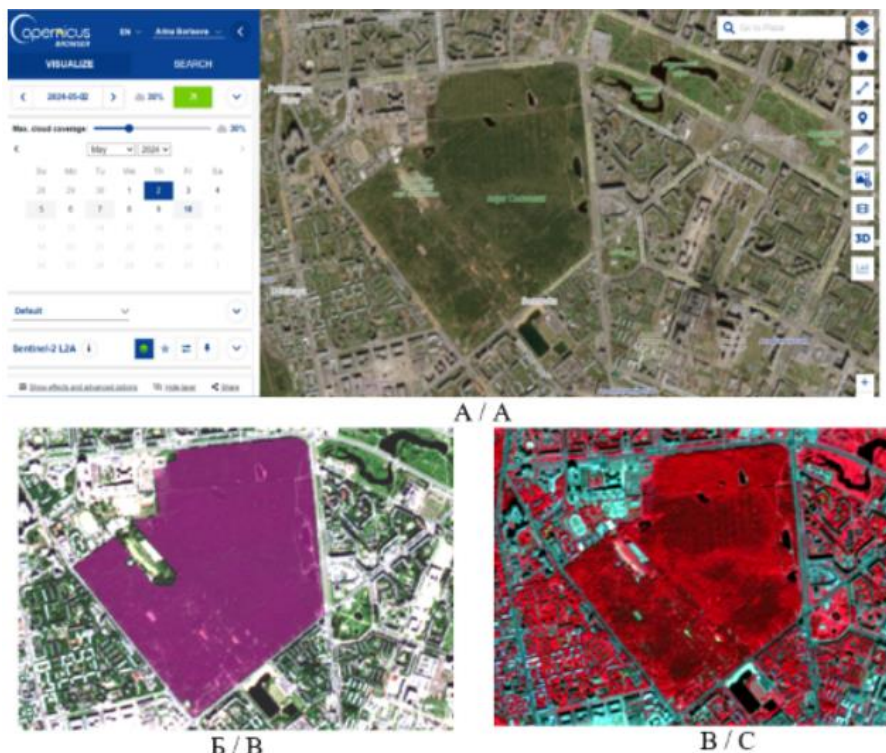


Рис. 1. Этапы обработки космоснимков: А) выбор территории и установление необходимых параметров; Б) оцифровка границ парка Сосновка; В) синтез спектральных каналов NIR-Red-Green
Fig. 1. Stages of satellite image processing: A) selection of territory and establishment of necessary parameters; B) digitization of the boundaries of Sosnovka Park; C) synthesis of NIR-Red-Green spectral channels

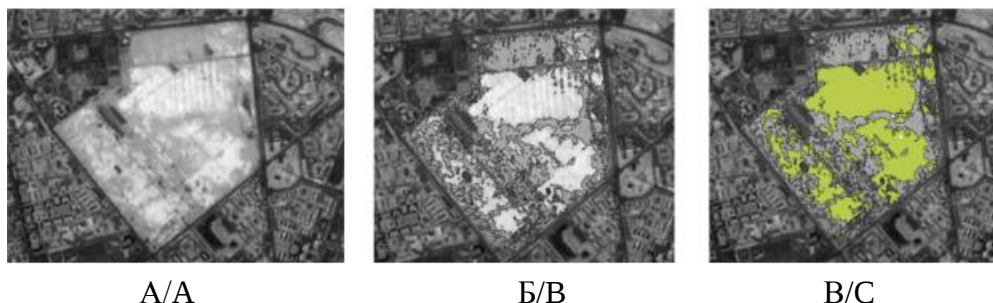


Рис. 2. Последовательные этапы обработки изображения для определения площадей исследуемых объектов: А) карта значений вегетационных индексов; Б) векторизованное изображение территории парка; В) выделение площадей, занятых хвойными насаждениями
Fig. 2. Consecutive stages of image processing to determine the areas of the objects under study: A) map of vegetation indices; B) vectorized image of the park territory; C) allocation of areas occupied by coniferous plantations

Для расчета площадей, занимаемых различными видами растительности и искусственными объектами, использован NDVI. Согласно полученной шкале, значения NDVI для хвойных деревьев $>0,6$, для лиственных деревьев находятся в пределах $0,6-0,3$, для водных объектов $0,3-(-0,15)$, для объектов искусственного происхождения $<-0,15$. Для определения площадей, занятых каждым из этих видов объектов, произведена векторизация полученной в растровом формате карты значений NDVI с помощью инструмента «Создание полигонов (растр в вектор)» (рис. 2).

Далее выделены участки, занятые различными насаждениями, и с помощью калькулятора растров рассчитана их общая площадь и площадь каждого выделенного участка. Аналогично определены площади, занятые лиственными деревьями, водными объектами – прудами, искусственно созданными объектами – в совокупности парковыми дорожками и благоустроенными площадками (рис. 3, 4). Количественные показатели, полученные в ходе инвентаризации парка Сосновка дистанционным и наземным методами, представлены в табл. 1.

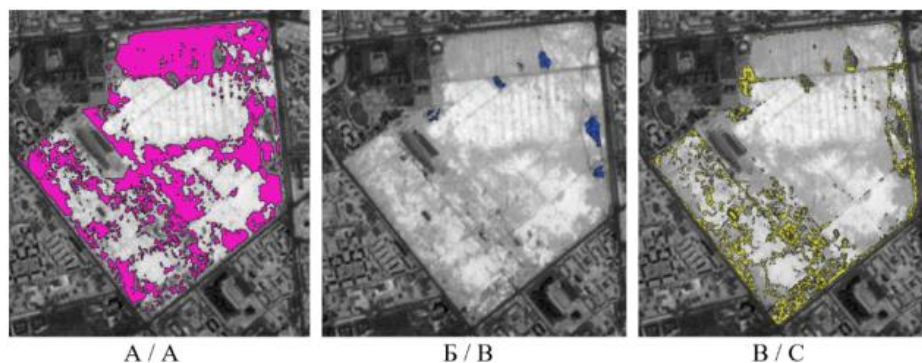


Рис. 3. Выделение площадей, занятых лиственными насаждениями (А), водными объектами (Б) и объектами искусственного происхождения (В)

Fig. 3. Identification of areas occupied by deciduous plantings (A), water bodies (B) and objects of artificial origin (C)

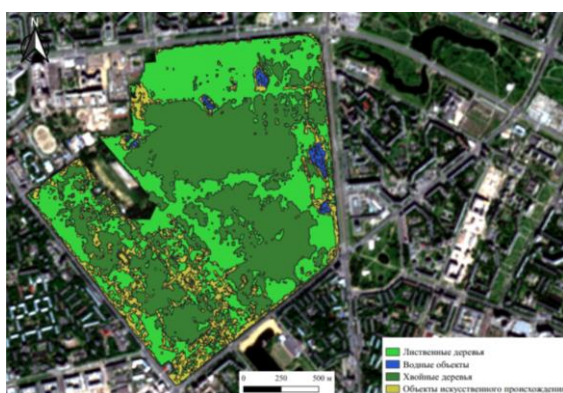


Рис. 4. Дешифрирование космоснимка парка Сосновка

Fig. 4. Interpretation of a satellite image of Sosnovka Park

Таблица 1. Сопоставление количественных показателей, полученных в ходе инвентаризации парка Сосновка дистанционным и наземным методами

Table 1. Comparison of quantitative indicators obtained during the inventory of Sosnovka Park using remote and ground methods

Площадь, га Area, ha	Дистанционный метод Distance method	Наземный метод Ground method
Общая/Total	290,22	289,63
Занятая хвойными насаждениями Occupied by coniferous plantations	124,58	133,81
Занятая лиственными насаждениями Occupied by deciduous plantings	114,18	104,61
Занятая водными объектами Occupied by water bodies	3,39	3,52
Занятая искусственными объектами Occupied by artificial objects	46,48	46,34

Анализ данных табл. 1 показывает, что наибольшие расхождения между данными дистанционного и наземного методов наблюдаются в

площадях, занимаемых древесными насаждениями. Они могут быть обусловлены недостаточно высоким спектральным разрешением космических снимков. В [29] содержится информация о значениях точности определения координат характерных точек границ земельных участков. Согласно им, для земельных участков, отнесенных к землям населенных пунктов, средняя квадратическая погрешность определения координат (местоположения) характерных точек не должна превышать 0,10 м. Размер проекции пикселя на местности для аэрофотоснимков и космических снимков, используемый в данном исследовании, равен 0,05 м (5 см).

В соответствии с [30], городские леса, скверы, парки, сады, относят к землям рекреационного назначения, которые входят в категорию «земель населенных пунктов». Следовательно, для использования данных ДЗЗ в целях инвентаризации земель необходимы снимки с пространственным разрешением менее 1 м. Космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения в свободном доступе отсутствуют и приобретаются у поставщиков на коммерческой основе. Для решения задач инвентаризации земель рекреационной зоны нами рекомендована последовательность, представленная на рис. 5.

В соответствии с планом инвентаризации парка Сосновка установлено, что древесно-кустарниковой растительностью покрыто 84 % от его общей площади; 16 % территории занимают дорожки, водные объекты (пруды) и благоустроенные спортивные площадки. Породный состав древесной растительности представлен в табл. 2.

С помощью данных ДЗЗ установлено, что в парке Сосновка растительностью занято 84 % площади, на остальной территории находятся дороги, поляны, пруды и болота. В центральной части на песчаных почвах доминирует сосна обыкновенная, в северо-западной – береза пушистая. Декоративная растительность представлена одиночными деревьями лиственных и хвойных пород.



Рис. 5. Последовательность этапов проведения инвентаризации земель рекреационной зоны урбанизированной территории

Fig. 5. Sequence of stages of conducting an inventory of lands of the recreational zone of an urbanized territory

Таблица 2. Видовое разнообразие древесных пород в парке Сосновка

Table 2. Biological diversity of tree species in Sosnovka Park

Древесные породы/Wood species			
Хвойные/Conifers		Лиственные/Deciduous	
Название породы/Name	Число, шт. Quantity, pcs.	Название породы/Name	Число, шт. Quantity, pcs.
Кедр сибирский (Pinus sibirica)/Siberian cedar	48	Береза пушистая (Betula pubescens)/Fluffy birch	80849
Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris) Scots pine	119817	Дуб черешчатый (Quercus robur)/English oak	1533
Лиственница сибирская (Larix sibirica) Siberian larch	1295	Ива козья (Salix caprea)/Goat willow	107
		Клен остролистный (Acer platanoides)/Norway maple	5718
		Липа мелколистная (Tilia cordata)/Small-leaved linden	650
Ель европейская (Picea abies) European spruce	20913	Рябина обыкновенная (Sorbus aucuparia)/Rowan	15005
		Клен татарский (Acer tataricum)/Tatar maple	103959
Всего/Total	152873		256832

По периферии парка на торфянистых почвах произрастают лиственные деревья, что связано с их более высокой устойчивостью к торфянистым почвам и антропогенному загрязнению атмосферы, характерному для местонахождения парка Сосновка [9]. Лиственные деревья ежегодно меняют листву, аккумулирующую загрязнители, а хвойные деревья – раз в пять лет.

Заключение

Инвентаризацию рекреационных объектов (парков, садов) в Санкт-Петербурге и других городах Российской Федерации проводят глазомерно-измерительным методом, который имеет ряд существенных недостатков. Он субъективен, точность и интерпретация данных во многом зависят от опыта и квалификации инженера. Как правило, при длительном учете растений из-за переутомления или

небрежности записей появляются ошибки. Трудоемкость метода обусловлена большим объемом измерений и необходимостью индивидуального перечета деревьев на учетной (пробной) площади, на которые разбита вся территория парка. Возможность наземного обследования во многом лимитируется погодными условиями. Использование неупрежденных инструментов и приборов, а также выбор неверных таблиц ведет к появлению систематических ошибок в получаемых оценочных данных.

Применение дистанционного метода инвентаризации земель имеет ряд существенных преимуществ перед наземным методом:

- меньшие затраты времени на выполнение работ в связи с отсутствием необходимости выезда на местность;
- отсутствие необходимости проведения работ в труднодоступных локациях в связи с возможностью дистанционного получения исходных материалов, в т. ч. за предыдущие годы;

- ускорение и упрощение выполнения работ при использовании программного обеспечения ГИС в качестве инструмента по сравнению с проведением измерений в полевых условиях вручную с помощью дорогостоящего оборудования.

Расхождение расчетных параметров по предложенной схеме не превышает 5 %, что соответствует нормативам лесоустройства. Для получения более точных результатов рекомендуется использовать космоснимки со сверхвысоким пространственным разрешением (1 м и более), которые можно приобрести, в частности, у Госкорпорации «Роскосмос».

Таким образом, применение дистанционного метода для проведения работ по инвентаризации рекреационных зон урбанизированных территорий является перспективным и востребованным научно-практическим направлением. Использование дистанционного метода вместо наземного значительно сокращает время и снижает стоимость работ при росте их эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каппушева М.Б. Зеленые насаждения и их роль в современном городе // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 4-3 (79). – С. 21–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenye-nasazhdeniya-i-ih-rol-v-sovremennom-gorode> (дата обращения: 12.12.2024).
2. Son N.T., Thanh B.X. Decadal assessment of urban sprawl and its effects on local temperature using Landsat data in Cantho city, Vietnam // Sustainable Cities and Society. – 2018. – Vol. 36. – P. 81–91. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.010> (дата обращения: 12.12.2024).
3. Hamada S., Ohta T. Urban Forestry & Urban Greening Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas // Urban Forestry & Urban Greening. – 2019. – Vol. 9 (1). – P. 15–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.10.002> (дата обращения: 12.12.2024).
4. Толовёнова Д.В. Градоэкологический каркас как основа создания здоровых городов // Оздоровление городской среды. – 2022. – № 1. – С. 108–117.
5. Psychophysiological responses and restorative values of wilderness environments / C.-Y. Chang, P.-K. Chan, W.E. Hammett, L. Machnik // USDA Forest Service Proceedings RMPS. – 2007. – P. 479–484. URL: <http://www.fs.fed.us/24/04/2010> (дата обращения: 12.12.2024).
6. Gagliardi C., Piccinini F. The use of nature – based activities for the well-being of older people: An integrative literature review // Archives of Gerontology and Geriatrics. – 2019. – Vol. 83. – P. 315–327.
7. Vitamin G: effects of green space on health, well-being, and social safety / P.P. Groenewegen, A.E. Van den Berg, S. De Vries, R.A. Verheij // BMC Public Health. – 2006. – Vol. 6. – № 149. URL: <http://www.narcis.nl/publication/RecordID19/12/2011> (дата обращения 12.12.2024).
8. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2023 году / под ред. А.В. Германа, И.А. Серебрицкого. – СПб: Изд-во правительства СПб, 2024. – 221 с.
9. Алексеев А.С. Теоретические основы организации и проведения государственной (национальной) инвентаризации лесов // Тр. С.-Петербургского научно-исслед. инст. лесн. хоз-ва. – 2010. – Вып. 1 (21). – С. 163–184.
10. Изучение состояния и роста лесных культур в зеленой зоне г. Астаны / С.А. Кабанова, Е.П. Вибе, М.Н. Кабанов, М.А. Данченко, П.В. Шахматов, В.А. Борцов // Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – 2024. – № 1. – С. 21–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-sostoyaniya-i-rosta-lesnyh-kultur-v-zelenoy-zone-g-astany> (дата обращения 12.12.2024).
11. Архипов В.И., Перепечина Ю.И., Глушенков О.И. Государственная инвентаризация российских лесов // Лесотехнический журнал – 2014. – Т. 4. – № 2. – С. 60–67. URL: <https://doi.org/10.12737/42-4> (дата обращения 12.12.2024).
12. Порядок, утвержденный распоряжением Комитета от 07.02.2020 № 5-р «О порядке осуществления инвентаризации территорий зеленых насаждений и признании утратившими силу распоряжений Государственной инспекции по контролю за использованием объектов недвижимости Санкт-Петербурга и Комитета по контролю за имуществом Санкт-Петербурга». URL: <https://docs.cntd.ru/document/564233403> (дата обращения: 12.12.2024).
13. Тесаловский А.А., Анисимов Н.В. Система мониторинга зелёных насаждений на урбанизированных территориях // Московский экономический журнал. – 2023. – № 1. – С. 71–75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-monitoringa-zelyonyh-nasazhdeniy-na-urbanizirovannyh-territoriyah> (дата обращения 12.12.2024).
14. Методика сегментации изображений беспилотных летательных аппаратов с помощью нейронных сетей / М.Ю. Катаев, Е.Ю. Карташов, В.В. Рябухин, Е.В. Макаров, О.А. Пасько // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 55–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-55-66.
15. Мониторинг состояния растительного покрова территории Центрального Ирака с использованием спутниковых данных LANDSAT-8 / О.С. Токарева, О.А. Пасько, С.М. Маджид, П. Кабраль // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. – С. 19–31.

16. Оценка состояния припоселковых кедровников Томской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли / О.А. Пасько, О.С. Токарева, Д.А. Алшаиби, Т.Ю. Черникова, П. Кабраль // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 98–109. DOI 10.18799/24131830/2019/1/54
17. Материалы комплексного экологического обследования планируемой к организации особо охраняемой природной территории «Парк «Сосновка» – истоки Мурунского ручья. – СПб.: ООО «Аконит» исследования, изыскания, проектирование, 2009. – 246 с.
18. Мониторинг земель лесного фонда провинции Кон Тум Вьетнама по данным ДЗЗ / В.Ф. Ковязин, О.А. Пасько, Е.М. Лоос, Ч.А. Нгуен // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84. – № 2. – С. 57–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63.
19. Ковязин В.Ф., Нгуен Ч.А., Нгуен Т.Ч. Мониторинг земель лесного фонда провинции Кон Тум Вьетнама по данным ДЗЗ // Геодезия и картография. – 2023. – № 2. – С. 57–64.
20. Проблемы управления лесными ресурсами в Арктической зоне Российской Федерации / В.Ф. Ковязин, О.Ю. Лепихина, П.М. Демидова, О.А. Колесник, С.О.П. Шобайри, Ч.А. Нгуен // Лесной журнал. – 2023. – № 3. – С. 185–194.
21. USGS (2016) Landsat 8 (L8) Data Users Handbook (LSDS-1574 version 2.0) / USGS Landsat User Services. U.S. Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook> (дата обращения: 12.12.2024).
22. Mudede A., Nkongolo N. Estimating urban greenness index using remote sensing data: a case study of an affluent vs. poor suburbs in the city of Johannesburg // Egypt. J. Remote Sens. Space Sci. 2021. – Vol. 24 (3). – P. 343–351. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088218271&origin=inward&txGid=fd01114d46fa622e41e689a38b4d9a56> (дата обращения: 12.12.2024).
23. Monitoring urban green space using remote sensing derived-vegetation indices in Colombo District, Sri Lanka / L.M. Zahir, M.H.F. Nuskiya, P.S. Ven, A.L. Iyoob, M.L.F. Ameer // Procedia Computer Science. – 2024. – Vol. 236. – P. 248–256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.028> (дата обращения: 12.12.2024).
24. Individual tree-based forest species diversity estimation by classification and clustering methods using UAV data / X. Li, Z. Zheng, C. Xu, P. Zhao, J. Chen, J. Wu, X. Zhao, D. Zhao, Y. Zeng // Frontiers in Ecology and Evolution. – 2023. – Vol. 11. – P. 1–14. DOI: 10.3389/fevo.2023.1139458.
25. Laze K. Preliminary findings on remote sensing of forest cover change, forest and tree health in southeastern Europe // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B4-2022. – P. 133–139. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-133-2022>, 2022 (дата обращения: 12.12.2024).
26. Космический снимок парка Сосновка. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (дата обращения: 12.12.2024).
27. LLAM-MDCNet for detecting remote sensing images of dead tree clusters / Z. Li, Y. Ruoli, C. Weiwei, X. Yongfei, H. Yaowen, L. Li // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – № 15:3684. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14153684> (дата обращения: 12.12.2024).
28. Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees / B. Vojtěch, J. Hanus, L. Dobrovolný, L. Homolova // Forest Ecology and Management. – 2022. – Vol. 506. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811272101077X> (дата обращения: 12.12.2024).
29. Приказ Росреестра от 23.10.2020 N П/0393 (ред. от 29.10.2021) «Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машино-места» (Зарегистрировано в Минюсте России 16.11.2020 N 60938). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=412794> (дата обращения: 12.12.2024).
30. «Земельный кодекс Российской Федерации» от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 19.08.2024). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773 (дата обращения: 12.12.2024).

Информация об авторах

Василий Федорович Ковязин, доктор биологических наук, профессор кафедры землеустройства и кадастров, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; vfkedr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3118-851X>

Ольга Анатольевна Пасько, доктор сельскохозяйственных наук, кандидат биологических наук, проректор по научной работе Национального открытого института г. Санкт-Петербург, Россия, 197183, г. Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая, 6; pasko@noispb.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8322-834X>

Арина Олеговна Борисова, студент кафедры землеустройства и кадастров, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; arina-borisova2002@mail.ru

Чьонг Ан Нгуен, аспирант кафедры землеустройства и кадастров, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; annguenthebeatles1997@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4881-794X>

Поступила в редакцию: 13.12.2024

Поступила после рецензирования: 17.01.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Kappusheva M.B. Green spaces and their role in a modern city. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2023, no. 4-3 (79), pp. 21–24. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenye-nasazhdeniya-i-ih-rol-v-sovremennom-gorode> (accessed 12 December 2024).
2. Son N.T., Thanh B.X. Decadal assessment of urban sprawl and its effects on local temperature using Landsat data in Cantho city. Vietnam. *Sustainable Cities and Society* 201836 (2018):81–91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.010> (accessed 12 December 2024).
3. Hamada S., Ohta T. Urban forestry & urban greening seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, no 1, pp.15–24. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.10.002> (accessed 12 December 2024).
4. Tolovenkova D.V. The urban ecological framework as the basis for creating healthy cities. *Improving the urban environment*, 2022, no. 1, pp. 108–117. (In Russ.)
5. Chun-Yun Chang, Ping-Kan Chan, Hammett W.E., Machnik L. Psychophysiological responses and restorative values of wilderness environments. *USDA Forest service Proceedings RMPS*, 2007, pp. 479–484. Available at: <http://www.fs.fed.us/24/04/2010> (accessed 12 December 2024).
6. Gagliardi C., Piccinini F. The use of nature – based activities for the well-being of older people: An integrative literature review. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 2019, vol. 83, pp. 315–327.
7. Groenewegen P.P., Van den Berg A.E., De Vries S., Verheij R.A. Vitamin G: effects of green space on health, well-being, and social safety. *BMC Public Health*, 2006, vol. 6, no 149. Available at: http://www.narcis.nl/publication/RecordID_19/12/2011 (accessed 12 December 2024).
8. German A.V., Serebriksky I.A. *Report on the environmental situation in St. Petersburg in 2023*. St. Petersburg, Government of St. Petersburg Publ., 2024. 221 p. (In Russ.).
9. Alekseev A.S. Theoretical foundations of the organization and conduct of the state (national) forest inventory. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research. Institute of Forestry households*, 2010, Iss. 1 (21), pp. 163–184 (In Russ.).
10. Kabanova S.A., Vibe E.P., Kabanov M.N., Danchenko M.A., Shakhmatov P.V., Bortsov V.A. Study of the state and growth of forest crops in the green zone of Astana. *MGUL Bulletin is a forest bulletin*, 2024, no. 1. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izucheniye-sostoyaniya-i-rosta-lesnyh-kultur-v-zelenoy-zone-g-astany> (accessed 12 December 2024).
11. Arkhipov V.I., Perepetchina Yu.I., Glushenkov O.I. State inventory of Russian forests. *Forestry Journal*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 60–67. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.12737/42-4> (accessed 12 December 2024).
12. *The procedure approved by the Order of the Committee dated 02/07/2020 No. 5-r "On the procedure for carrying out an inventory of green areas and invalidating the orders of the State Inspectorate for Control over the Use of Real Estate in St. Petersburg and the Committee for the Control of Property of St. Petersburg."* Available at: <https://docs.cntd.ru/document/564233403> (accessed 12 December 2024).
13. Tesalovsky A.A., Anisimov N.V. Monitoring system of green spaces in urbanized territories. *Moscow Economic Journal*, 2023, no. 1, pp. 71–75. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-monitoringa-zelyonyh-nasazhdeniy-na-urbanizirovannyh-territoriyah> (accessed 12 December 2024).
14. Kataev M.Yu., Kartashov E.Yu., Ryabukhin V.V., Makarov E.V., Pasko O.A. Methods of image segmentation of unmanned aerial vehicles using neural networks. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 55–66. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-55-66.
15. Tokareva.S., Alshaibi A.D.A., Pasko O.A. Assessment of the regenerative dynamics of forest vegetation cover using data from LANDSAT satellites. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no 7, pp. 191–199. (In Russ.) DOI 10.18799/24131830/2021/07/3283.
16. Pasko O.A., Tokareva O.S., Al shaibi ADA., Chernikova T.Yu., Kabral P. Assessment of the condition of near-village cedars of the Tomsk region using Earth remote sensing data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 98–109. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/1/54
17. *Materials of a comprehensive environmental survey of the planned organization of a specially protected natural area "Sosnovka Park" – the sources of Murinsky Creek*. St. Petersburg, Akonit LLC research, surveys, design Publ., 2009. 246 p. (In Russ.)
18. Kovyazin V.F., Pasko O.A., Loos E.M., Nguyen C.A. Monitoring of the lands of the forest fund of the Con Tum province of Vietnam according to remote sensing data. *Geodesy and cartography*, 2023, vol. 84, no. 2, pp. 57–64. (In Russ.) DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63.
19. Kovyazin V.F., Nguyen C.A., Nguyen T.H. Monitoring of the lands of the forest fund of the province of KonTum Vietnam according to remote sensing. *Geodesy and cartography*, 2023, no. 2, pp. 57–64.
20. Kovyazin V.F., Lepikhina O.Yu., Demidova P.M., Kolesnik O.A., Shobairi S.O.R., Nguyen C.A. Problems of forest resources management in the Arctic zone of the Russian Federation. *Lesnoy zhurnal*, 2023, no. 3, pp. 185–194.
21. *USGS (2016) Landsat 8 (L8) Data Users Handbook (LSDS-1574 version 2.0). In USGS Landsat User Services. U.S. Geological Survey*. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook> (accessed 12 December 2024).
22. Mudede A., Nkongolo N. Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs. poor suburbs in the city of Johannesburg. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*, 2021, vol. 24 (3), pp. 343–351. Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088218271&origin=inward&txGid=fd01114d46fa622e41e689a38b4d9a56> (accessed 12 December 2024).
23. Zahir L.M., Nuskiya M.H.F., Ven P.S., Iyoob A.L., Ameer M.L.F. Monitoring urban green space using remote sensing derived-vegetation indices in Colombo District, Sri Lanka. *Procedia Computer Science*, 2024, vol. 236, pp. 248–256. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.028> (accessed 12 December 2024).
24. Li X., Zheng Z., Xu C., Zhao P., Chen J., Wu J., Zhao X., Zhao D., Zeng Y. (2023). Individual tree-based forest species diversity estimation by classification and clustering methods using UAV data. *Frontiers in Ecology and Evolution*, DOI: 10.3389/fevo.2023.1139458.

25. Laze K. Preliminary findings on remote sensing of forest cover change, forest and tree health in southeastern Europe, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B4-2022, pp. 133–139. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-133-2022>, 2022. (accessed 12 December 2024).
26. *Satellite image of Sosnovka Park*. Available at: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (accessed 12 December 2024).
27. Li Z., Ruoli Y., Weiwei C., Yongfei X., Yaowen H., Liu Jun Li. LLAM-MDCNet for Detecting Remote Sensing Images of Dead Tree Clusters. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 15:3684. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14153684>. (accessed 12 December 2024).
28. Vojtěch B., Hanus J., Dobrovolný L., Homolova L. Comparison of field survey and remote sensing techniques for detection of bark beetle-infested trees. *Forest Ecology and Management*, 2022, vol. 506. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811272101077X> (accessed 12 December 2024).
29. Order of the Federal Register of 23.10.2020 N P/0393 (ed. from 10/29/2021) "On approval of requirements for accuracy and methods for determining the coordinates of characteristic points of the boundaries of the land plot, requirements for accuracy and methods for determining the coordinates of characteristic points of the contour of a building, structure or an object under construction on the land plot, as well as requirements for determining the area of a building, structure, premises, parking space". *Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.16.2020 no 60938* (In Russ.) Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=412794> (accessed 12 December 2024).
30. "Land Code of the Russian Federation" dated 10/25/2001 No. 136-FZ (as amended on 08.08.2024) (with amendments and additions, intro. effective from 08.19.2024) (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773 (accessed 12 December 2024).

Information about the authors

Vasily F. Kovyazin, Dr. Sc., Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21st line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. vfkedr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3118-851X>

Olga A. Pasko, Dr. Sc., Cand. Sc., Vice-Rector for Research of the National Open Institute of St. Petersburg, 6, Sestroretskaya street, St. Petersburg, 197183, Russian Federation. pasko@noispb.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8322-834X>

Arina O. Borisova, Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21st line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. arina-borisova2002@mail.ru

An T. Nguyen, Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21st line, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation. annguenthebeatles1997@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4881-794X>

Received: 13.12.2024

Revised: 17.01.2025

Accepted: 19.03.2025

УДК 553.988
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4985
Шифр специальности ВАК: 25.00.17

Определение поверхностного натяжения на основе термокапиллярного движения

А.А. Филипас, А.В. Кучман, А.Ю. Зарницын, Ю.Н. Исаев[✉]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]isaev_yusup@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Исследование свойств водомасляных эмульсий, в частности дисперсного состава, вязкости и поверхностного натяжения, имеет большое значение для оптимизации производственных процессов и повышения качества продукции в различных отраслях промышленности, включая пищевую, фармацевтическую, косметическую и нефтяную. В предыдущей работе авторы выявили зависимость собственной частоты колебаний шаровой капли водомасляной эмульсии от её радиуса, плотности и поверхностного натяжения. Однако вопрос оценки последнего параметра остался открытым, поскольку существующие методы имеют ряд недостатков. Вывод аналитического выражения для оценки поверхностного натяжения дисперсной фазы водомасляной эмульсии позволит более точно определять свойства эмульсий и разрабатывать новые эффективные методы их изучения. **Цель:** заключается в получении аналитического выражения для оценки поверхностного натяжения и вязкости дисперсной фазы водомасляной эмульсии на основе термокапиллярных явлений и использования поверхностно-активных веществ. **Объект:** водомасляная эмульсия. **Методы.** Для получения аналитических выражений гидродинамические уравнения в частных производных преобразуются в обыкновенные дифференциальные уравнения с краевыми условиями. В стационарном случае гидродинамические уравнения преобразуются в уравнение Лапласа, для решения которого используется метод разделения переменных. **Результаты.** Авторам удалось получить оценочную формулу скорости распространения поверхностного слоя эмульсии. Полученная формула позволяет определить температурный коэффициент поверхностного натяжения. Авторам также удалось свести уравнения гидродинамики в обыкновенные дифференциальные уравнения с краевыми условиями. Получена аналитическая формула, позволяющая оценить вязкость эмульсии. В статье выводится формула, позволяющая оценить поверхностное натяжение через скорость фронта волны с использованием поверхностно-активного вещества, находящегося на поверхности эмульсии.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, температурный коэффициент поверхностного натяжения, температурный градиент, уравнение Навье–Стокса, метод разделения переменных

Для цитирования: Определение поверхностного натяжения на основе термокапиллярного движения / А.А. Филипас, А.В. Кучман, А.Ю. Зарницын, Ю.Н. Исаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 179–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4985

UDC 553.988
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4985

Determination of surface tension based on thermocapillary motion

A.A. Filipas, A.V. Kuchman, A.Yu. Zarnitsyn, Yu.N. Isaev[✉]

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]isaev_yusup@mail.ru

Abstract. Relevance. Research of the properties of oil-in-water emulsions, in particular their dispersed composition, viscosity, and surface tension, is of great importance for optimizing production processes and improving product quality in various industries, including food, pharmaceutical, cosmetic, and petroleum. In a previous work, the authors identified the dependence of the natural frequency of oscillations of an oil-in-water emulsion spherical droplet on its radius, density, and surface tension. However,

er, the issue of estimating this last parameter has not been resolved, since existing methods have several disadvantages. The derivation of an analytical expression for assessing the surface tension of the dispersed phase of an oil-in-water emulsion will allow for more accurate determination of emulsion properties and the development of new effective methods for studying them.

Aim. To obtain an analytical expression for assessing the surface tension and viscosity of the dispersed phase of an oil-in-water emulsion based on thermo-capillary phenomena and the use of surfactants. **Object.** Water-in-oil emulsion **Methods.** To obtain analytical expressions, the hydrodynamic partial differential equations are transformed into ordinary differential equations with boundary conditions. In the stationary case, the hydrodynamic equations are converted into the Laplace equation, for which the method of separation of variables is used to find a solution. **Results.** The authors were able to derive an estimated formula for the propagation velocity of the emulsion surface layer. This formula allows determining the temperature coefficient of surface tension. The authors also succeeded in reducing hydrodynamic equations to ordinary differential equations with boundary conditions. An analytical formula was obtained that allows estimating the viscosity of the emulsion. The article derives a formula that makes it possible to estimate surface tension through wave front velocity using a surfactant on the emulsion surface.

Keywords: surface tension, surface tension temperature coefficient, temperature gradient, Navier–Stokes equation, method of separation of variables

For citation: Filipas A.A., Kuchman A.V., Zarnitsyn A.Yu., Isaev Yu.N. Determination of surface tension based on thermocapillary motion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 179–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4985

Введение

Водомасляные эмульсии широко применяются в пищевой и сельскохозяйственной промышленности, фармацевтике, косметической сфере, нефтяной промышленности и являются основой многих промышленных продуктов [1–3]. Для оценки свойств эмульсий существует несколько характеристик, основными из которых являются концентрация дисперсной фазы, устойчивость по времени и дисперсный состав. Дисперсный состав – это характеристика дисперсной системы, описывающая распределение частиц дисперсной фазы по размерам. Это распределение влияет на такие свойства эмульсий, как стабильность дисперсной фазы, поведение при хранении, эффективность активных компонентов эмульсий и кинетику расслоения [4, 5].

Управление дисперсным составом можно разделить на три направления: синтез эмульсии с заданными размерами капель, разрушение эмульсии – укрупнение капель и переход в сплошную среду, и поддержание текущих размеров капель [6]. Одним из универсальных способов для управления дисперсным составом является использование акустического воздействия с различной частотой, которая будет зависеть от резонансной частоты дисперсной фазы водомасляной эмульсии.

В [7] авторами была выявлена зависимость собственной частоты шаровой капли эмульсии от её радиуса, плотности и поверхностного натяжения. Плотность жидкости, из которой состоит дисперсная фаза, является известной величиной, для оценки размеров авторами используется оптический метод, реализованный на основе компьютерного зрения, но вопрос оценки поверхностного натяжения остался открытым. Существует несколько способов, однако все они имеют ряд недостатков, таких как технические сложности в реализации, требование высокоточного оборудования или низкая точность.

Целью данной статьи является получение аналитического выражения для оценки поверхностного натяжения дисперсной фазы водомасляной эмульсии.

Вывод формулы для оценки температурного коэффициента поверхностного натяжения

Известно, что поверхностное натяжение зависит от температуры. Эта зависимость имеет линейный характер [6–10]. Температурный коэффициент $\partial\sigma/\partial T$, связывающий поверхностное натяжение и температуру, имеет отрицательное значение. Это означает, что при увеличении температуры уменьшается поверхностное натяжение. В слабо прогретых местах поверхности жидкости поверхностное натяжение будет выше, чем в местах более прогретых. Поэтому если поверхность жидкости прогрета неравномерно, происходит перераспределение поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение определяется соотношением (1):

$$\sigma(T) = \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) T + \sigma_0, \quad \sigma_0 = \sigma(0). \quad (1)$$

При наличии градиента температуры в жидкости на поверхности жидкости возникают тангенциальные напряжения, вызванные градиентом поверхностного натяжения. То есть возникает тангенциальная сила, направленная от мест с меньшим к местам с большим поверхностным натяжением:

$$p = \nabla \sigma = \mathbf{i} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \sigma}{\partial z}. \quad (2)$$

В свою очередь градиент поверхностного натяжения вызван градиентом температуры:

$$\nabla \sigma = \frac{d\sigma}{dT} \cdot \nabla T. \quad (3)$$

При нагревании жидкости в ней возникают конвективные тепловые потоки, а в приграничных зонах жидкости возникает еще и поверхностная конвекция, вызванная явлениями поверхностного натяжения. Если на поверхности жидкости присутствуют активные вещества, то концентрация активных веществ на поверхности может вызывать дополнительные тангенциальные напряжения.

Из вышесказанного следует, что можно создать такие условия в приграничном к поверхности слое жидкости, при которых определяющим фактором в формировании тангенциального напряжения будет градиент поверхностного натяжения. Из формулы (2), (3) следует, что при известном тангенциальном напряжении и известном градиенте температуры можно восстановить температурный коэффициент поверхностного натяжения. По температурному коэффициенту $d\sigma/dT$ можно определить поверхностное натяжение. Приведем условия, при которых определяющим фактором в формировании поверхностного напряжения жидкости будет градиент поверхностного натяжения. Конвективные тепловые потоки в жидкости циркулируют в глубине, в слоях далеких от поверхности, следовательно, нужно выбрать неглубокий слой жидкости с неравномерным нагревом, который приведет к стационарному движению. Движение потока жидкости определяется вязкостью жидкости, поэтому нужно получить оценку, связывающую приграничную высоту слоя жидкости с её кинематической вязкостью, скоростью и характерным продольным масштабом. Эта оценка имеет вид [11, 12]:

$$h^2 < \frac{\nu L}{V}, \quad (4)$$

где h – высота слоя жидкости, м; ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; V – скорость движения поверхностного слоя, $\text{м}/\text{с}$; L – характерный продольный масштаб, м.

Поместим исследуемую жидкость в тонкую кювету высотой $y=h$ и длиной $x=L$.

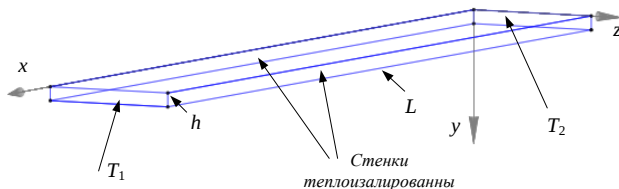


Рис 1. Тонкая кювета высотой h , длиной L . Противоположные стенки имеют температуру T_1 и T_2 . Боковые стенки теплоизолированы

Fig 1. Thin cuvette with a height h and length L . The opposite walls have temperatures T_1 and T_2 . The side walls are thermally insulated

Из-за малой глубины кюветы будем пренебрегать тепловым конвективным размешиванием и считать тепловой градиент постоянным вдоль кюветы. Такая модель кюветы будет оправдана, если выполняется условие (4). Это означает, что поверхность достаточно велика по отношению к объему. В этом случае поверхностные эффекты преобладают над объемными эффектами. Будем учитывать, что влияние z -компоненты отсутствует. Это допустимо если ширина кюветы достаточно велика.

Считая температурный градиент постоянным, запишем выражение для поверхностного натяжения в виде (5):

$$\sigma(T) = \sigma(T_1) + \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \frac{T_2 - T_1}{L}. \quad (5)$$

В соответствии с (2) на квадратный метр поверхности будет действовать сила – поверхностное напряжение:

$$\mathbf{p}_\tau = \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \nabla(T). \quad (6)$$

Определим эту силу в соответствии с конфигурацией кюветы. В соответствии с рис. 1 градиент температуры направлен вдоль кюветы – вдоль оси x . Поскольку отсутствует температурная конвекция, в гидродинамических уравнениях можно сделать существенные упрощения [11, 12]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

где p – давление, Па; μ – вязкость жидкости, Па·с; V_x – компонента скорости, $\text{м}/\text{с}$.

На нижнем основании кюветы скорость равна нулю:

$$V_x(x, h) = 0, \quad (8)$$

а на поверхности $V_x(x, 0)$.

Значение скорости V_x медленно меняется в продольном направлении вдоль оси x по сравнению с поперечным направлением вдоль оси y . По этой причине в уравнении (7) можно пренебречь производной $\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}$ и записать (9):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}. \quad (9)$$

Так как кювета не глубокая, давление вдоль высоты измениться не успевает, и его можно положить постоянным, что является следствием выражения $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$.

Дополним (9) уравнением непрерывности, означая, что циркуляция скорости равняется:

$$\int_0^h V_x dy = 0. \quad (10)$$

Используя условия непрерывности касательной составляющей тензора напряжения и вязкого напряжения на поверхности жидкости, можно записать выражение (11)

$$p_T = \mu \frac{\partial V_x}{\partial y}. \quad (11)$$

С учетом уравнения (6) и конфигурации кюветы получаем:

$$\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \nabla T = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (12)$$

Проинтегрируем уравнение (8):

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} = \frac{\partial p}{\partial x} &\rightarrow \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \int \frac{\partial p}{\partial x} dy \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y + C_1. \end{aligned}$$

При повторном интегрировании получаем параболическую зависимость скорости:

$$V_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2. \quad (13)$$

Для определения констант интегрирования будем использовать граничные условия (8) и (12). Проинтегрируем (13) и подставим в место y ноль, найдем константу интегрирования C_1 :

$$C_1 = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x}. \quad (14)$$

Подставим в (13) $y=h$, и с учетом (14) получим:

$$C_2 = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{h^2}{2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x} h.$$

Теперь можно записать выражение для скорости:

$$V_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{y^2}{2} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x} y - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{h^2}{2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x} h,$$

или после группировки соответствующих слагаемых получаем:

$$V_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x} (h-y) - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{(h^2 - y^2)}{2}. \quad (15)$$

Подставим последнее уравнение в уравнение непрерывности (10) и получим (16):

$$\begin{aligned} \int_0^h \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x} (h-y) - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{(h^2 - y^2)}{2} \right) dx = 0, \\ \frac{\partial \sigma}{\partial x} \left(h^2 - \frac{h^2}{2} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \left(h^3 - \frac{h^3}{3} \right) = 0 \rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{3}{2h} \frac{\partial \sigma}{\partial x}. \quad (16) \end{aligned}$$

Таким образом, получаем зависимость давления от поверхностного натяжения в виде (17):

$$p(x) = p_0 + \frac{3}{2h} (\sigma(x) - \sigma(0)). \quad (17)$$

Наконец, подставив в уравнение для скорости (15), получаем:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial x} (h-y) - \frac{1}{\mu} \frac{3}{2h} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{(h^2 - y^2)}{2} = \\ &= \frac{1}{4\mu h} \frac{\partial \sigma}{\partial x} (4h(h-y) - 3(h^2 - y^2)). \end{aligned}$$

С учетом температурного градиента и температурного коэффициента получаем (18):

$$V_x = \frac{1}{4\mu h} \frac{\partial \sigma}{\partial T} (h^2 - 4hy + 3y^2) \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (18)$$

Максимальная скорость на свободной поверхности воды будет при значениях $y=0$

$$V_{x \max} = V_x \Big|_{y=0} = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot h \cdot \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (19)$$

Неравенство (4) с учетом кинематической вязкости $\nu = \mu/\rho$ и выражения (19) переходит в неравенство (20) [10, 11]:

$$h^2 < \frac{\nu L}{V} \rightarrow h^3 < \frac{4\rho \nu^2 L}{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \cdot \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|}. \quad (20)$$

Приведем оценки скоростей на свободной поверхности некоторых жидкостей. Например, для воды при температурном коэффициенте поверхностного натяжения, равном $\partial \sigma / \partial T = -0,15$ эрг/см²·град, толщине кюветы $h=0,03$ см, температурном градиенте равном $\Delta T=0,1$ град/см и вязкостью $\mu=10^{-4}$ см²/с получаем оценку скорости, равной $V=0,1$ см/с

$$V = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot h \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \sim \frac{1}{4 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,15 \cdot 0,03 \cdot 0,1 \sim 0,1.$$

Из последней формулы можно определить температурный коэффициент поверхностного натяжения при известной скорости жидкости, глубине жидкости, температурном градиенте и вязкости:

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{V 4\mu}{h \cdot \partial T / \partial x}.$$

Определение вязкости с помощью поверхностно-активных веществ

Исследуемая жидкость, покрытая монослоем поверхностно-активного вещества, помещается в прямоугольный двухмерный капилляр (кювету) длины L . На краях капилляра создается разность давлений Δp , при этом движение жидкости сопровождается диссипацией энергии. Поскольку объем

жидкости велик по сравнению с объемом пленки, диссипация энергии в пленке пренебрежимо мала. Вычислим в этих условиях расход жидкости, протекающей через капилляр, как функцию перепада двумерного давления Δp , габаритов капилляра и вязкости жидкости. Движение жидкости будем считать медленным и стационарным, так что режим движения будет вязким.

Расположим плоскую систему координат x, y в сечении капилляра так, чтобы центр системы координат находился в центре поверхности жидкости, и направим ось x по ширине сечения капилляра, а ось y – в глубину сечения капилляра. Ширина капилляра равна $2l$, а глубина капилляра равна h . Тогда уравнение движения жидкости будет записано в виде (21):

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0. \quad (21)$$

Будем решать уравнение Лапласа методом разделения переменных [13, 14] с краевыми условиями:

$$V(x, 0) = 0, \quad V(-l, y) = V(l, y) = 0. \quad (22)$$

Представим решение в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит от одного аргумента $V(x, y) = V_x(x)V_y(y)$. Подставляя решение в исходное уравнение и разделяя переменные, получаем систему уравнений (23):

$$\begin{aligned} V_y \frac{d^2 V_x}{dx^2} + V_x \frac{d^2 V_y}{dy^2} = 0 \rightarrow \frac{1}{V_x} \frac{d^2 V_x}{dx^2} = \\ = -\frac{1}{V_y} \frac{d^2 V_y}{dy^2} = k^2 \rightarrow \begin{cases} \frac{d^2 V_x}{dx^2} + k^2 V_x = 0; \\ \frac{d^2 V_y}{dy^2} - k^2 V_y = 0. \end{cases} \quad (23) \end{aligned}$$

Первое уравнение системы дает решение в виде суммы двух функций синуса и косинуса:

$$V_x = A_1 \sin(kx) + A_2 \cos(kx). \quad (24)$$

Второе уравнение системы дает решение в виде суммы гиперболических синусов и косинусов:

$$V_y = B_1 \operatorname{sh}(ky) + B_2 \operatorname{ch}(ky). \quad (25)$$

Далее определим константы интегрирования в решении (24). Для этого будем использовать краевые условия (22). Из краевых условий ясно, что функция должна быть четной, следовательно, константа $A_1 = 0$. Подставляем граничные условия и получаем собственные функции и собственные числа задачи по координате x :

$$\begin{aligned} V_x(L) = A_2 \cos(kl) = 0 \rightarrow k = \frac{2n+1}{l} \frac{\pi}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ V_{xn}(x) = A_n \cos\left(\frac{2n+1}{l} x\right). \end{aligned}$$

Далее определяем коэффициенты второго решения (25). В соответствии с краевыми условиями и собственными числами получаем собственные функции по координате y :

$$V_{yn}(y) = B_n \operatorname{sh}\left(\frac{2n+1}{l} \frac{\pi}{2} y\right).$$

Запишем решение в виде суммы ряда по собственным функциям:

$$V(x, y) = \sum_{n=0}^N C_n \cos\left(\frac{2n+1}{2l} \pi x\right) \operatorname{sh}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi y\right). \quad (26)$$

Здесь коэффициент разложения C_n есть произведение A_n и B_n , и введено ограничение на число членов разложения ряда.

Граничным условием на поверхности жидкости служит равенство тангенциальной составляющей тензора натяжений в жидкости силе растяжения, действующей в пленке. Будем считать, что к поверхности приложено равномерное давление Δp , тогда давление, приходящееся на единицу длины канала, будет равно:

$$f = \Delta p / L,$$

где L – длина канала, м.

Граничное условие на границе поверхности жидкости:

$$f = \mu \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) \Big|_{y=h}. \quad (27)$$

Учитывая последнее соотношение, можно получить коэффициенты разложения ряда (26). Продифференцируем разложение (26) и поставим значения y на поверхности жидкости. Из условия (27) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=h} = \frac{f}{\mu} = \\ = \frac{\pi}{2l} \sum_{n=0}^N C_n (2n+1) \cos\left(\frac{2n+1}{2l} \pi x\right) \operatorname{ch}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right). \end{aligned}$$

Пользуясь свойством ортогональности собственных функций по продольной координате x , получаем выражение для коэффициента разложения C_n :

$$C_n = \frac{8fl}{\mu \pi^2} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2 \operatorname{ch}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right)}.$$

Можно окончательно записать разложение в виде (28):

$$V(x, y) = \frac{8fl}{\mu \pi^2} \sum_{n=0}^N \left[\frac{(-1)^n}{(2n+1)^2 \operatorname{ch}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right)} \times \cos\left(\frac{2n+1}{2l} \pi x\right) \operatorname{sh}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi y\right) \right]. \quad (28)$$

Графическое представление для распределения скорости в поперечном сечении канала в относительных величинах, когда все величины входящие в выражения (28), кроме переменных x и y принимаются равными единице, и представлено на рис. 2.

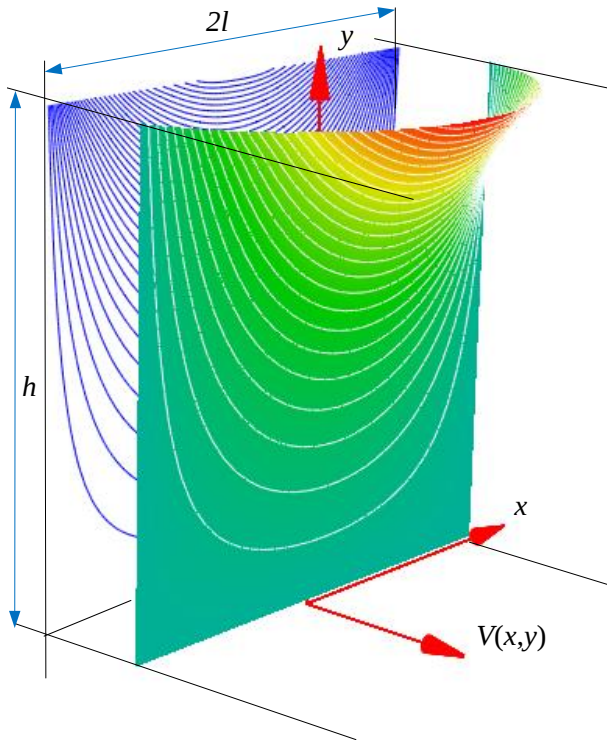


Рис. 2. Преувеличенная в масштабе картина распределения скоростей в поперечном сечении прямоугольного капилляра, рассчитанная по формуле (28)

Fig. 2. Picture of the velocity distribution in the cross section of a rectangular capillary, calculated using formula (28), exaggerated for scale

Количество жидкости, вытекающей через линейное сечение капилляра в секунду, определяется выражением (29):

$$Q(y) = \int_{-l}^l v dx = \frac{32 fl^2}{\mu \pi^2} \sum_{n=0}^N \frac{\text{sh}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi y\right)}{(2n+1)^2 \text{ch}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right)}. \quad (29)$$

В частности, если вместо y подставить h , получится расход пленки через линейное сечение:

$$Q(h) = \frac{32 fl^2}{\mu \pi^2} \sum_{n=0}^N \frac{\text{th}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right)}{(2n+1)^2}.$$

Если проинтегрировать (29) по оси y , получим выражение (30) для всего количества жидкости, вытекающей через поперечное сечение капилляра:

$$P = \int_0^h Q(y) dy = \frac{64 fl^3}{\mu \pi^4} \sum_{n=0}^N \frac{\text{ch}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right) - 1}{(2n+1)^4 \text{ch}\left(\frac{2n+1}{2l} \pi h\right)}. \quad (30)$$

Если глубина капилляра h превышает ширину $2l$, можно записать в виде (31):

$$P = \frac{2}{3} \frac{fl^3}{\mu} = \frac{2}{3} \frac{\Delta p l^3}{\mu L}. \quad (31)$$

Из последнего соотношения можно определить вязкость выражением (32):

$$\mu = \frac{2}{3} \frac{\Delta p l^3}{PL}. \quad (32)$$

Оценочный метод измерения поверхностного натяжения эмульсий с помощью поверхностно-активных веществ

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) обладают способностью существенно снижать поверхностное натяжение. Если поместить ПАВ на эмульсию, мгновенно происходит процесс снижения поверхностного натяжения. Если считать, что ПАВ снижают поверхностное натяжение до очень маленькой величины, то разность между поверхностным натяжением эмульсии и области с ПАВ можно приближенно считать равным поверхностному натяжению эмульсии. Обозначим эту разность величиной $\Delta\sigma$.

Предположим, что на эмульсию нанесено ПАВ. В радиальном направлении образуется расходящийся круг радиуса R . При этом полная сила F , растягивающая круговую область, будет определяться величиной, пропорциональной поверхностному натяжению $\Delta\sigma$:

$$F = 2\pi R \Delta\sigma. \quad (33)$$

Распространяющаяся область будет испытывать сопротивление. Будем считать распространяющуюся область несжимаемой пленкой – твердой пластиной. При этом скольжение пленки увлекает за собой вязкую жидкость и испытывает сопротивление вязкого трения. Силы вязкого трения, действующие на пленку, можно считать силами, действующими на твердую пластину.

Для дальнейших рассуждений рассмотрим пограничный слой, который играет существенную роль в движении жидкости. Явления, происходящие в приграничной области, играют существенную роль в физико-химической гидродинамике. Эти явления являются источником гидродинамических сопротивлений.

Будем рассматривать движение в пограничном слое. При таком допущении гидродинамические уравнения существенно упрощаются, потому что

скорость изменения всех величин в поперечном направлении вдоль оси y к стенке существенно выше, чем их изменение в продольном направлении вдоль оси x (рис. 6).

Вторая производная продольной компоненты скорости жидкости по продольной координате $\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}$ существенно ниже производной по поперечной координате: $\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} > \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}$. Также выполняются нера-

венства $v_x > v_y$, $\frac{\partial v_y}{\partial x} > \frac{\partial v_x}{\partial x}$. Вследствие этого можно записать уравнение гидродинамики в пограничном слое [11, 12, 14]:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}. \quad (34)$$

Выражение для компоненты v_y поперечной компоненты вырождается в уравнение вида:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0.$$

Это уравнение показывает, что в приграничном слое давление не успевает измениться в поперечном направлении. И, следовательно, давление от продольной координаты определяется интегралом Бернулли, поэтому величиной $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ в (34) можно пренебречь.

Запишем граничные условия для уравнения (34) в виде (35), (36)

$$v_x = v_y = 0 \text{ при } y=0, \quad (35)$$

$$v_x = U_0 \text{ при } y=\infty. \quad (36)$$

Введем вспомогательную переменную – функцию тока, которая является следствием уравнения непрерывности и получим (37) [11–13]:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (37)$$

Сведем уравнения в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению с краевыми условиями с помощью подстановки:

$$\eta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_0}{\nu x}} \cdot y. \quad (38)$$

И будем искать вспомогательную функцию тока в виде:

$$\psi = \frac{1}{2} \sqrt{\nu U_0 x} \cdot f(\eta). \quad (39)$$

Тогда компоненты скоростей и их производные могут быть записаны в виде (40):

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{1}{2} U_0 f'(\eta), \\ v_y &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_0}{x}} \cdot \eta f' - f, \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} &= -\frac{1}{4} \frac{U_0}{x} \eta f'', \quad \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{U_0}{4} \sqrt{\frac{U_0}{\nu x}} f'', \\ \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} &= \frac{U_0}{8} \frac{\nu U_0}{x} f'''. \end{aligned} \quad (40)$$

После подстановки получаем обыкновенное дифференциальное уравнение с краевыми условиями:

$$\begin{aligned} f'''(\eta) + f''(\eta) f'(\eta) &= 0, \\ f &= f' = 0 \text{ при } \eta = 0, \\ f'(\eta) &= 2 \text{ при } \eta \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (41)$$

Решение уравнения (41) приведено в виде сплошной линии на рис. 3.

Если вести обозначение $f'(0) = \alpha$, то несложно с помощью (41) получить разложение в ряд Тейлора функции $f(\eta)$, учитывая, что в начальной точке $f(0) = f'(0) = 0$ [11, 15]:

$$f(\eta) = \frac{\alpha \eta^2}{2!} - \frac{\alpha^2 \eta^5}{5!} + \frac{11 \alpha^3 \eta^8}{8!}. \quad (42)$$

С использованием программы Mathcad [16, 17] численно решим дифференциальное уравнение (41) методом стрельбы [18]. В результате решения получаем графическую зависимость $f(\eta)$. При дальнейшем преобразовании функции $f(\eta)$ авторы использовали аппроксимацию кубическими сплайнами [18–20].

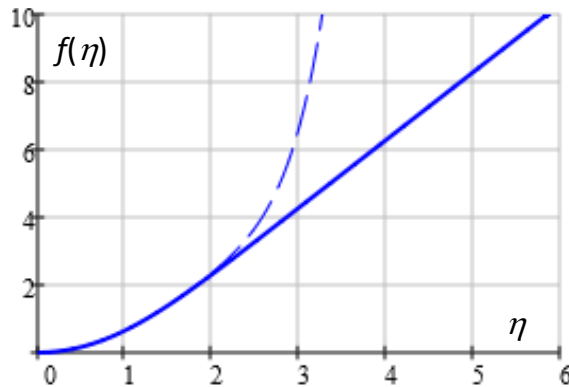


Рис. 3. Пунктирная кривая – разложение в ряд Тейлора по формуле (42). Сплошная кривая – численное решение уравнения (41)

Fig. 3. Dotted curve is a Taylor series expansion (42). Solid curve is the numerical solution of equation (41)

Теперь можно определить компоненты скоростей и их производных, а также оценить величину приграничного слоя.

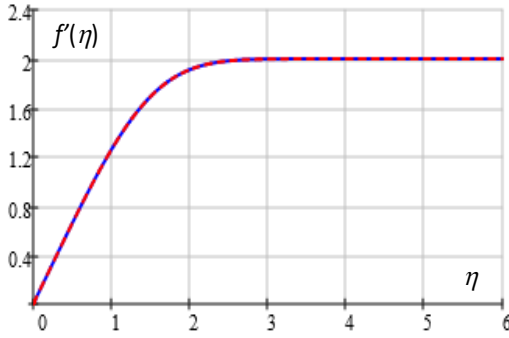


Рис. 4. Первая производная функции $f(\eta)$ и производная сплайна функции $f(\eta)$

Fig. 4. First derivative of the function $f(\eta)$ and the derivative of the spline function $f(\eta)$

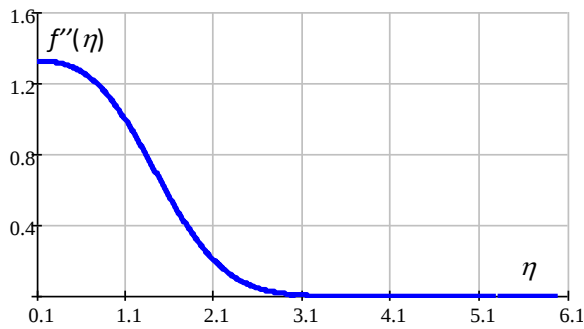


Рис. 5. Вторая производная функции $f(\eta)$. Значение функции в начальной точке равно $f''(0)=\alpha=1,33$

Fig. 5. Second derivative of the function $f(\eta)$. The value of the function at the initial point is $f''(0)=\alpha=1,33$

С учетом полученных данных можно переписать разложение (42) в виде (43):

$$f(\eta) = \frac{1,33\eta^2}{4} - \frac{1,77\eta^5}{120} + \frac{14,63\eta^8}{40320}. \quad (43)$$

Разложение (43) приведено в виде пунктирной кривой на рис. 3. На рис. 4, 5 изображены первая и вторая производные функции $f(\eta)$, соответственно.

Если выбрать величину пограничного слоя из условия, что продольная компонента скорости на таком удалении от пластины достигает 99 % от своего установившегося значения, то в соответствии с формулами (39) и графиком, изображенным на рис. 6, эта величина определяется выражением (44):

$$\delta_0 = 5,2\sqrt{\nu x / U_0}. \quad (44)$$

А компоненты скорости соответственно записываются в виде (45) и (46):

$$v_x = \frac{U_0}{2} (\alpha\eta - \alpha^2\eta^4 / 4! + \dots) \approx \frac{U_0}{\delta_0} y, \quad (45)$$

$$v_y = \frac{\alpha}{4} \sqrt{\frac{U_0 \nu}{\alpha}} \eta^2 \approx \frac{\nu}{\delta_0^3} y^2. \quad (46)$$

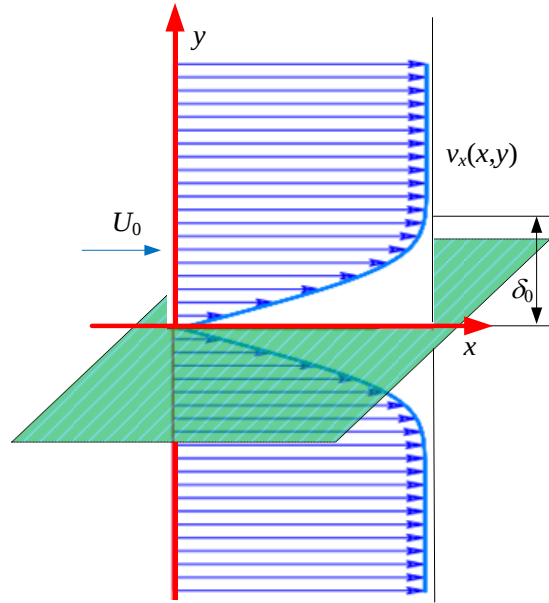


Рис. 6. Распределение продольной компоненты скорости $v_x(x, y)$ вдоль поперечной координаты y у поверхности пластины

Fig. 6. Distribution of the longitudinal velocity $v_x(x, y)$ component along the transverse coordinate y near the plate surface

Сила, действующая на единицу площади, с учетом (38), (39), определяется выражением (47):

$$f_s = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = \mu \frac{U_0}{\delta_0} = \mu \frac{U_0^{3/2}}{5,2\sqrt{\nu x}}. \quad (47)$$

Из уравнения непрерывности следует, что скорость распространения движения пленки от источника связана со скоростью распространения фронта пленки соотношением:

$$2\pi u(\rho)\rho = 2\pi U_0 R \rightarrow u(\rho) = \frac{U_0 R}{\rho}. \quad (48)$$

С учетом (48) запишем силу, действующую на слой пленки, находящейся между радиусом ρ и $\rho + d\rho$ в выражения (49):

$$df_\rho = 2\pi \rho f(\rho) d\rho = \frac{2\pi \mu}{5,2\sqrt{\nu}} U_0^{3/2} R^{3/2} \frac{d\rho}{\rho}. \quad (49)$$

Проинтегрировав это соотношение от 0 до R , получим силу, действующую на всю пленку в виде (50)

$$F = \frac{2\pi \mu}{5,2\sqrt{\nu}} U_0^{3/2} R^{3/2} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right). \quad (50)$$

Если учесть выражение для силы, растягивающей пленку (33), то можно получить оценочную формулу (51), связывающую скорость фронта расходящейся волны U_0 с поверхностным натяжением $\Delta\sigma$ и вязкостью:

$$2\pi R\Delta\sigma = \frac{2\pi\mu}{5, 2\sqrt{\nu}} U_0^{3/2} R^{3/2} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \rightarrow$$
$$\rightarrow U_0 = 2, 93 \sqrt[3]{\frac{(\Delta\sigma)^2}{\rho\mu R \left(\ln \frac{R}{R_0}\right)^2}}, \quad (51)$$

где R_0 – исходный радиус капли, м.

Последняя формула позволяет получить оценку поверхностного натяжения при известной скорости и вязкости эмульсии.

Заключение

Авторами получена оценочная формула (19) скорости распространения поверхностного слоя эмульсии, обусловленного температурным градиентом жидкости.

Формула (19) связывает температурный коэффициент поверхностного натяжения со скоростью поверхности жидкости вещества.

Авторам работы удалось получить формулу вязкости среды, в которой эмульсия рассматривается как непрерывная субстанция, находящаяся в капилляре при известной разности давлений на его концах. Вязкость определяется через расход жидкости – количество жидкости, вытекающей через сечения капилляра в секунду, формулы (30) и (32). Полученная вязкость среды авторами используется

для извлечения информации о поверхностном натяжении.

Авторам работы удалось свести уравнения гидродинамики в обыкновенные дифференциальные уравнения с краевыми условиями для определения скоростей жидкости вблизи поверхности пленки (45), (46). Такой метод представления уравнений более пригоден для инженерных оценок, когда эмульсию можно представлять как жидкость. Этот подход позволяет описать явления распространения поверхностно-активного вещества на поверхности эмульсии и получить оценочную формулу (32), позволяющую оценить вязкость эмульсии.

Формула (51) связывает поверхностное натяжение, скорость фронта волны поверхностно-активного вещества, находящегося на поверхности эмульсии, радиус фронта, вязкость. При измеренной скорости распространения поверхностного слоя эмульсии можно получить оценку температурного коэффициента поверхностного натяжения эмульсии, если известны величины остальных параметров, входящих в формулу (51). При известной оценке температурного коэффициента поверхностного натяжения можно оценить и поверхностное натяжение.

Получив оценки поверхностного натяжения по формулам (19) и (51), можно определить диапазон изменения оценочной величины коэффициента поверхностного натяжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mousavi M., Bernad A., Alopaeus V. Modeling oil/water emulsion separation in batch systems with population balances in the presence of surfactant // *Chemical Engineering Science*. – 2024. – Vol. 300. – 120558.
2. A universal strategy for efficient separation from single emulsion separation to oil-in-water and water-in-oil mixed emulsions / Q. Xiang, Y. Liu, Bo Wang, Ch. Huang, L. Wang, J. He, D. Tian, F. Shen, Y. Zhang // *Separation and Purification Technology*. – 2024. – Vol. 354. – 129517.
3. Rawat U., Singh M.K. Application of emulsion technology in food products // *Food and Humanity*. – 2024. – Vol. 3. – 100400.
4. Ghadeer G. Alharbi, Mahmoud A. Abdulhamid. Optimization of water/oil emulsion preparation: Impact of time, speed, and homogenizer type on droplet size and dehydration efficiency // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 335. – 139136.
5. Towards an accurate size distribution of emulsion droplets by merging distributions estimated from different measuring methods / M. Kostoglou, T.D. Karapantsios, A.P. Chondrou, M.C. Vlachou // *Colloid and Interface Science Communications*. – 2022. – Vol. 46. – 100569.
6. Филипас А.А., Кучман, Исаев Ю.Н. Альтернативный метод получения квазимонодисперсной водомасляной эмульсии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 335. – № 5. – С. 219–232.
7. Филипас А.А., Исаев Ю.Н., Кучман А.В. Определение резонансных частот шаровой капли масляной среде // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 178–185.
8. Сычёв В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. – М.: МЭИ, 2010. – 252 с.
9. Сычёв В.В. Сложные термодинамические системы. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 252 с.
10. Румер Ю.Б., Рывкин М.И. Термодинамика. Статистическая физика. Кинетика. – М.: Физматлит, 1977. – 552 с.
11. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid mechanics. – Toronto: Pergaman Press, 1988. – Vol. 6. – 734 p.
12. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Газпром нефть, Институт компьютерных исследований, 2016. – 686 с.
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 799 с.
14. Bitsadze A.V. Equations of mathematical physics. – Moscow, Mir Publ., 1980. – 318 p.
15. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 713 с.
16. Исаев Ю.Н., Купцов А.М. Практика использования системы MathCad. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 180 с.
17. Ивановский Р.И. Компьютерные технологии в науке и образовании: практика применения систем MathCAD PRO. – М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.
18. Формалев В.Ф., Резников Д.Л. Численные методы. – М.: Физматлит, 2006. – 400 с.
19. Авхадиев Ф.Г. Численные методы анализа. – Казань: Казанский федеральный университет, 2013. – 126 с.
20. Русаков С.В. Численные методы: курс лекций. – Пермь.: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – Ч. 2. – 112 с.

Информация об авторах

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, заведующий отделением автоматизации и робототехники – руководитель отделения на правах кафедры Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. filipas@tpu.ru

Алёна Владимировна Кучман, аспирант отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. avm82@tpu.ru

Зарницын Александр Юрьевич, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ayz10@tpu.ru

Юсуп Ниязбекович Исаев, доктор физико-математических наук, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. isaev_yusup@mail.ru

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Поступила после рецензирования: 24.02.2024

Принята к публикации: 31.03.2025

REFERENCES

1. Mousavi M., Bernad A., Alopaeus V. Modeling oil/water emulsion separation in batch systems with population balances in the presence of surfactant. *Chemical Engineering Science*, 2024, vol. 300, 120558.
2. Xiang Q., Liu Y., Wang Bo, Huang Ch., Wang L., He J., Tian D., Shen F., Zhang Y. A universal strategy for efficient separation from single emulsion separation to oil-in-water and water-in-oil mixed emulsions. *Separation and Purification Technology*, 2024, vol. 354, 129517.
3. Rawat U., Singh M.K. Application of emulsion technology in food products. *Food and Humanity*, 2024, vol. 3, 100400.
4. Ghadeer G. Alharbi, Mahmoud A. Abdulhamid. Optimization of water/oil emulsion preparation: Impact of time, speed, and homogenizer type on droplet size and dehydration efficiency. *Chemosphere*, 2023, vol. 335, 139136.
5. Kostoglou M., Karapantsios T.D., Chondrou A.P., Vlachou M.C. Towards an accurate size distribution of emulsion droplets by merging distributions estimated from different measuring methods. *Colloid and Interface Science Communications*, 2022, vol. 46, 100569.
6. Filipas A.A., Kuchman A.V., Isaev Yu.N. Alternative method for obtaining a quasi-monodisperse oil-water emulsion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 219–232. (In Russ.)
7. Filipas A.A., Isaev Yu.N., Kuchman A.V. Determination of the resonant frequencies of a global water drop in oil medium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 175–185. (In Russ.)
8. Sychev V.V. *Differential equations of thermodynamics*. Moscow, MPEI Publ., 2010. 250 p. (In Russ.)
9. Sychev V.V. *Complex thermodynamic systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 207 p. (In Russ.)
10. Rumer Yu.B., Rytkin M.Sh. *Thermodynamics, statistical physics and kinetics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1977. 552 p. (In Russ.)
11. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid mechanics*. Toronto, Pergamon Press. 1988. Vol. 6, 734 p.
12. Levich V.G. *Physico-chemical hydrodynamics*. Moscow, Gazprom Neft, Institute of Computer Research Publ., 2016. 686 p. (In Russ.)
13. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Equations of mathematical physics*. Moscow, MSU Publ., 1999. 799 p. (In Russ.)
14. Bitsadze A.V. *Equations of mathematical physics*. Moscow, Mir Publ., 1980. 318 p.
15. Shlikhting G. *Boundary layer theory*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 713 p. (In Russ.)
16. Isaev Y.N., Kupchov A.M. *Practice of using the MathCad system*. Moscow, Salon-Press, 2010. 180 p. (In Russ.)
17. Ivanovsky R.I. *Computer technologies in science and education: practice of application of MathCAD PRO system*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 431 p. (In Russ.)
18. Formalev V.F., Reznikov D.L. *Numerical methods*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 400 p. (In Russ.)
19. Avkhadiev F.G. *Numerical methods of analysis*. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2013. 126 p. (In Russ.)
20. Rusakov S.V. *Numerical methods: lecture course*. Perm, Perm State University Publ., 2020. P. 2, 112 p. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. filipas@tpu.ru

Alena V. Kuchman, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avm82@tpu.ru

Alexander Y. Zarnitsyn, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ayz10@tpu.ru

Yusup N. Isaev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. isaev_yusup@mail.ru

Received: 30.01.2025

Revised: 24.02.2024

Accepted: 31.03.2025

УДК 528.44:528.88: 004.93

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

Шифр специальности ВАК: 1.6.15, 1.6.19, 1.6.21

Выявление зон разломов земной коры, оказывающих воздействие на южный участок трубопровода проекта «Сахалин-2», по данным космических съемок

О.В. Купцова¹, В.А. Мелкий^{2✉}, А.А. Верхотуров²

¹Сахалинский государственный университет, Россия, г. Южно-Сахалинск

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, г. Южно-Сахалинск

✉vamelkiy@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется потребностью в оперативном получении информации о состоянии трасс магистральных трубопроводов и активности эндогенных процессов, происходящих в толщах горных пород, находящихся в зоне взаимодействия с трубой. Подвижки блоков земной коры служат триггерами появления дефектов или аварий при эксплуатации трубопроводных систем. Средства аэрокосмического мониторинга вследствие обзорности, точности и оперативности наилучшим образом соответствуют требованиям к информации, обеспечивающей анализ динамики развития природных процессов. В этом свете разработка методов автоматизированного дешифрирования для определения мест активного воздействия на трубопроводы весьма актуальна. *Цель:* выявление мест пересечения трассы на участке Советское–Пригородное зонами активных разломов для оценки рисков негативного воздействия при организации геотехнического мониторинга в этих зонах. *Объект:* снимки территории, по которой проложены трубопроводы, полученные с космических аппаратов Landsat, Sentinel, а также Shuttle при выполнении проекта SRTM, а также данные о положении эпицентров землетрясений на этой же территории. *Методы:* дешифрирование космических изображений, методы картографирования в геоинформационной среде, статистические, линеаментного анализа. Использование программных комплексов QGIS, ArcGIS, LEFA. *Результаты и выводы.* Проанализирована спутниковая и геофизическая информация о состоянии исследуемой территории, определены разломные зоны, пересекающие трассу трубопроводов проекта «Сахалин-2». Выявлены участки активных разломов, на которые следует обратить пристальное внимание при организации мониторинга в местах возможных подвижек блоков земной коры, которые являются источниками аварийных дефектов трубы. На территории установлены главные трансрегиональные разломные зоны меридионального простирания (I ранга): Хоккайдо-Сахалинская (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины), Центрально-Сахалинская (Ключевская оперяющая зона разломов) и Западно-Сахалинская (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов). Выделены зоны разломов II ранга: Сусунайская – на границе Сусунайского хребта и Сусунайской низменности, а также крупная цепь разломов северо-западно-юго-восточного диагонального простирания, пересекающая трассу трубопровода на Вахрушевско-Христофоровском участке. Кроме того, на снимках выделяются более мелкие разломы III и IV ранга. Сведения о состоянии трубопроводов в местах пересечения с разломными зонами собираются в базах данных аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем. Такие данные востребованы при проведении инженерных изысканий, выполнении проектирования и строительства объектов трубопроводного транспорта, а также в процессе эксплуатации трубопроводов.

Ключевые слова: мониторинг земель, космические снимки, линеамент, разлом, сейсмический риск, трубопроводная система, ArcGIS, QGIS, LEFA

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательских проектов (Постановление ПСО № 486 от 27.10.2022 г.), выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области (Распоряжение № 122-р от 12.12.2023).

Для цитирования: Купцова О.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Выявление зон разломов земной коры, оказывающих воздействие на южный участок трубопровода проекта «Сахалин-2», по данным космических съемок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 189–201. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

UDC 528.44:528.88: 004.93
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

Identification of crustal fault zones, affecting the southern section of the Sakhalin-2 pipeline, according to satellite surveys

O.V. Kuptsova¹, V.A. Melkiy²✉, A.A. Verkhoturov²

¹ Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

✉ vamelkiy@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to promptly obtain information about the state of the main pipeline routes and the activity of endogenous processes occurring in the rock strata located in the zone of interaction with the pipe. The movements of the blocks of the earth crust serve as triggers for the appearance of defects or accidents during the operation of pipeline systems. Due to their visibility, accuracy and efficiency, aerospace monitoring tools best meet the requirements for information that provides an analysis of the dynamics of the development of natural processes. In this light, the development methods of operational automated decoding to determine the places of active impact on pipelines is very relevant. **Aim.** To identify the intersections of the route on the Sovetskoe–Prigorodnoe section with zones of active faults to assess the risks of negative impacts during operation of pipeline and organize geotechnical monitoring in these zones. **Object.** Images of the territory along which pipelines are laid, obtained from Landsat, Sentinel, and Shuttle spacecraft during the implementation of the SRTM project, suitable for identifying disjunctive faults, as well as data on the position of earthquake epicenters in this territory. **Methods.** Decoding of space images, methods of mapping in a geographic information environment, statistical, lineament analysis. Using software packages QGIS, ArcGIS, LEFA. **Results and conclusions.** The authors have analyzed the satellite and geophysical information on the condition of the studied territory, identified the fault zones crossing the pipeline route of the Sakhalin-2 project. The authors identified the areas of active faults, which should be paid close attention to when organizing monitoring in places of possible movements of blocks of the earth crust, which are sources of emergency pipe defects. Active fault zones have been mapped that warrant focused monitoring efforts in areas susceptible to crustal block displacements, which pose significant risks to pipeline structural safety. The authors established the main transregional fault zones of the meridional strike (rank I) on the territory: Khokkaido-Sakhalinskaya (Okhotsk-Ozerskaya branch of the Tunaichinsky synclinal depression fault zone), Tsentralno-Sakhalinskaya (Klyuchevskaya feathering fault zone) and Zapadno-Sakhalinskaya (Slepikovsko-Nevelskiy section of the fault zone). They identified the fault zones of the II rank: Susunayskaya on the border of the Susunai ridge and the Susunai lowland, as well as a large chain of faults of the north-west-south-east diagonal strike crossing the pipeline route at the Vakhrushevsko-Khristoforovsky section. In addition, smaller grade III and IV faults are highlighted in the images. Information on the condition of pipelines at the points of intersection with fault zones should be collected in databases of aerospace monitoring of pipeline systems. Such data are in demand during engineering surveys, design and construction of pipeline transport facilities, as well as during the operation of pipelines.

Keywords: land monitoring, satellite images, lineament, fault, seismic risk, pipeline system, ArcGIS, QGIS, LEFA

Acknowledgements: The research was supported by a grant from the Government of the Sakhalin Region in the form of subsidies to young scientists for the implementation of research projects (Resolution No. 486 of the GSR dated 10/27/2022), issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region (Order No. 122-r dated 12/12/2023).

For citation: Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of crustal fault zones, affecting the southern section of the “Sakhalin-2” pipeline, according to satellite surveys. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 189–201. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

Введение

Разработка крупных месторождений углеводородов сопровождается развитием трубопроводной сети. Обеспечение безопасной эксплуатации линейной части трубопроводов, обладающих большой протяженностью, требует организации мониторинга их состояния. Повреждения трубопроводов, вызванные природными процессами, приводят

к серьёзным нарушениям технологического регламента транспортировки, иногда к значительным экологическим последствиям, что влечет за собой существенные экономические потери.

Методы моделирования геологических процессов, как экзогенных, так и эндогенных, в коридорах трасс трубопроводов, а также методы их мониторинга на основе дешифрирования космических

снимков опираются на современные представления геодинамики и рассматриваются в трудах [1–13]. Методы дистанционного зондирования дают целостное представление о состоянии территории исследований, обеспечивают оперативной и актуальной информацией о состоянии труб, динамике геологических процессов на участках трубопроводов, недоступных для исследования другими методами.

Литосферные блоки в регионах, подверженных проявлениям активной геодинамики, перемещаются относительно друг друга. Подвижки относительно плоскостей контактов блоков приводят к образованию дизъюнктивных нарушений земной коры. В зависимости от размеров смещаемых блоков в верхних слоях литосферы возникают разномасштабные разломы или разломные зоны, которые могут иметь протяженность от первых десятков метров до сотен и даже тысяч километров [14–21].

Даже незначительные смещения земляных масс в разломных зонах, пересекающих трубопроводы, могут сопровождаться возникновением дефектов труб нефте- и газопроводов [22–24]. Количественная оценка смещений позволяет прогнозировать геологические опасности для трубопроводной системы и своевременно принимать меры для снижения степени риска возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации трасс трубопроводов.

Линеamentный анализ космических снимков территории, по которой проходит трасса магистрального трубопровода, изучение цифровых моделей рельефа, определение местоположения эпицентров землетрясений позволили выделить разрывные нарушения исследуемой территории. Своевременное выявление разломных зон, пересекающих трассу трубопровода, позволяет планировать мероприятия по минимизации риска возможного негативного воздействия на трубу и служит обеспечению безопасной эксплуатации трубопроводной системы.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использовались материалы космических съемок, полученные с веб-сайтов, где они размещены в свободном доступе. Для линеamentного анализа были отобраны снимки, полученные со спутников Landsat-8 [25], Sentinel [26] и данные проекта Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [27].

Снимки Landsat-8 представлены в формате GeoTIFF, что позволяет легко работать с ними в проектах, создаваемых при помощи геоинформационных технологий, и разнообразных приложениях, предназначенных для обработки изображений.

Данные Landsat-8 доступны в различных уровнях обработки. В исследовании использовались данные с уровнем обработки «Level-1», который

включает снимки, откалиброванные радиометрически и геометрически, которые дополнительно обрабатывались с применением алгоритмов повышения точности геометрической привязки [28].

Файлы, содержащие данные о снимках Landsat-8:

- MTL-файл – файл метаданных, содержащий информацию о параметрах снимка, таких как дата съемки, координаты, углы наблюдения, и другие важные детали.
- BAND_xx – GeoTIFF-файл, который у каждого спектрального диапазона (канала) свой, например, BAND_1, BAND_2 и т. д. Всего со сканера OLI спутника Landsat-8 поступают изображения в 11 спектральных диапазонах.
- BQA-файл – файл качества изображения, содержащий маски облаков, тени облаков и другие артефакты, которые могут повлиять на анализ снимков [29].

Данные радарной топографической модели – SRTM – получены при помощи радарных систем, установленных на борту космического челнока Endeavour в феврале 2000 г. Данные SRTM доступны с пространственным разрешением 30 м (1 дуговая секунда) и 90 м (3 дуговых секунды). Каждый набор данных сопровождается метаданными, которые включают информацию о точности, источниках данных и методах их обработки [27].

Существует несколько программных средств для автоматизированного выделения линеamentов (Lessa, SLAM, LEFA) [30, 31]. В настоящем исследовании выявление дизъюнктивных нарушений производилось с помощью линеamentного анализа, для выполнения которого использовался программный комплекс LEFA (Lineament Extraction and Fault Analysis). Программный комплекс LEFA разработан для автоматизированного анализа данных дистанционного зондирования с целью определения дизъюнктивных нарушений (разломов, разрывов и других структурных деформаций) и представляет собой мощный инструмент для автоматизированного поиска дизъюнктивных нарушений, с помощью которого четко определяются границы объектов и выделяются линейные структуры [32].

Наиболее популярным и эффективным методом для выделения контуров в изображениях является алгоритм Кэнни [33], разработанный Джоном Ф. Кэнни в 1986 г., который включает несколько шагов, направленных на обнаружение четких и точных границ объектов в изображении. Алгоритм Кэнни, который широко используется благодаря своей точности и надежности, является мощным инструментом для выделения контуров. Он включает операции сглаживания, градиентного анализа, подавления немаксимумов и двойного порогового значения для получения четких и значимых контуров объектов на изображении.

Первоначально изображение сглаживается с помощью гауссового фильтра для уменьшения шума, который может добавлять ложные контуры. Для каждого пикселя изображения с помощью операторов Собеля вычисляются градиенты интенсивности в горизонтальном и вертикальном направлениях. Далее рассчитываются общий градиент и направление градиента, после чего реализуется этап подавления немаксимумов. Этот шаг направлен на подавление всех пикселей градиента, которые не являются максимумами в направлении градиента. Это делается для того, чтобы оставить только тонкие линии на местах контуров. Пиксель рассматривается как контурный, если его градиент больше, чем у соседних пикселей в направлении градиента. Затем выполняется двойная пороговая обработка, которая используется для классификации пикселей как сильных, слабых и подавленных. Два порога – высокий и низкий – определяют эти категории:

- пиксели с градиентами выше высокого порога считаются «сильными» контурами;
- пиксели с градиентами между низким и высоким порогами считаются «слабыми» контурами;
- пиксели с градиентами меньше низкого порога подавляются (принимая значение 0).
- Затем осуществляется гистерезисное пороговое значение:
- слабые контуры объединяются с сильными, если они связаны с ними, что позволяет сохранить непрерывные линии контуров;
- это гарантирует, что только значимые и непрерывные контуры остаются на изображении.

Дальнейшая обработка производится при помощи алгоритма Хафа [34]. Метод преобразования Хафа позволяет эффективно выявлять линейные структуры в изображениях даже при наличии шума и других артефактов.

Преобразование Хафа для прямых линий основано на параметрическом представлении прямой линии. Прямая линия на плоскости может быть выражена уравнением:

$$y = mx + b,$$

где m – наклон линии; b – место пересечения линейной оси y .

Однако использование этого уравнения в алгоритме Хафа неудобно, так как наклон m может принимать бесконечные значения. Вместо этого используется параметрическая форма уравнения прямой:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta,$$

где ρ – расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой линии (перпендикулярное расстояние); θ – угол между осью x и линией, перпендикулярной данной прямой.

Алгоритм преобразования Хафа включает в себя преобразование координат, аккумуляторное пространство, голосование и нахождение пиков.

В рамках преобразования координат каждая точка (x, y) изображения преобразуется в пространство параметров (ρ, θ) . Это происходит для всех возможных углов θ (обычно от 0 до 180 градусов), создавая синусоидальную кривую в пространстве (ρ, θ) .

Далее создается двумерный массив (аккумуляторное пространство), где одна ось соответствует значениям ρ , а другая – θ . Каждый элемент этого массива представляет собой количество голосов (вкладов) за конкретную пару (ρ, θ) . Этот массив инициализируется нулями.

В ячейке аккумуляторного пространства, соответствующей найденным значениям ρ и θ , увеличивается значение счетчика. Этот процесс называется голосованием. То есть, если точка (x, y) соответствует определенной линии в пространстве параметров, она «голосует» за ячейку этой линии, увеличивая значение счетчика в этой ячейке.

После обработки всех точек изображения аккумуляторное пространство будет содержать высокие значения (пики) в тех ячейках, которые соответствуют параметрам ρ и θ прямых линий, проходящих через наибольшее количество точек изображения. Поиск пиков в аккумуляторном пространстве позволяет определить параметры линий [34].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования проводились на участке магистрального газопровода проекта «Сахалин-2» от промышленной площадки «Советское» до с. Пригородное, где располагается завод по сжижению природного газа (СПГ). Территорию юго-восточной части Сахалина, по которой проходит участок трубопровода, пересекают многочисленные разломы. Наиболее целостная картина распределения активных деформаций на исследуемой территории представлена в базе данных активных разломов Евразии (рис. 1) [35, 36].

В зависимости от протяженности «сквозные структуры» Земли подразделяют на планетарные (надрегиональные), региональные, субрегиональные и локальные [37–39]. Смещения в плоскостях, субпараллельных разломным, сопровождаются землетрясениями, которые происходят в местах, где превышен предел прочности пород. Землетрясения, в свою очередь, служат триггерами активизации гравитационных склоновых процессов.

Как известно, разломные зоны образуют две планетарные системы: ортогональную (тянутся в меридиональном или в широтном направлении) и диагональную (вытянуты с северо-запада на юго-восток или северо-востока на юго-запад). При этом

на платформах обычно распространена диагональная система, а в подвижных поясах – соответствующая простирацию тектонических структур. Особенности распределения регматической сети и генетическим аспектам формирования разломных зон посвящено большое количество трудов [40–45].

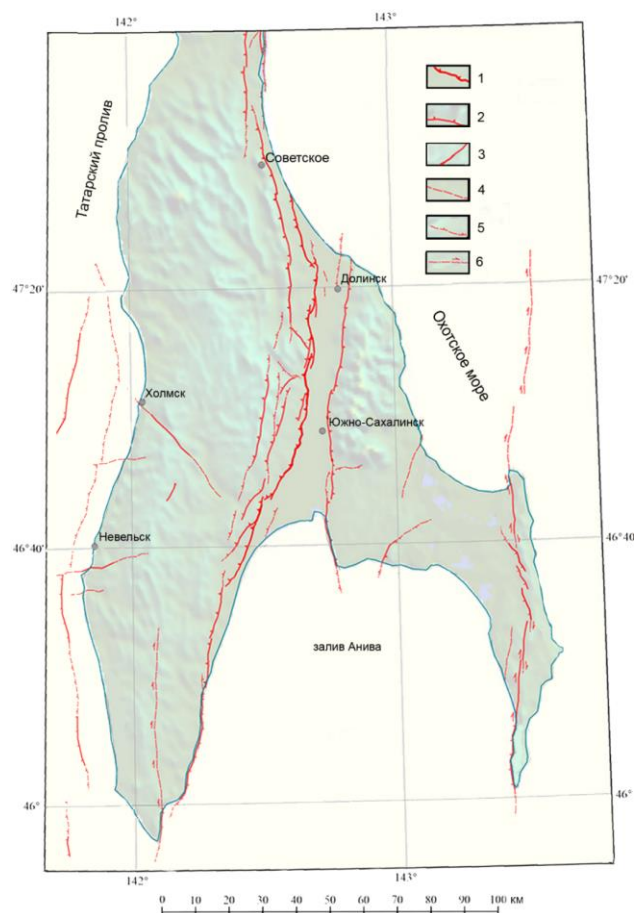


Рис. 1. Линеаменты юга Сахалина в базе данных разломов Евразии (по информации Базы данных активных разломов Евразии [35, 36]). Степень достоверности проявлений активности: 1 – градация А (наиболее достоверные); 2 – градация В; 3 – градация С; 4 – градация D; 5 – взброс; 6 – правосдвиговый разлом

Fig. 1. Lineaments of south of Sakhalin in the Eurasian fault database (according to the Eurasian Active Fault Database [35, 36]). The degree reliability of activity manifestations: 1 – gradation A (most reliable); 2 – gradation B; 3 – gradation C; 4 – gradation D; 5 – upsurge; 6 – right-thrust fault

Анализ космических снимков территории, по которой трубопровод проходит на южном участке, выполненный с помощью программного комплекса LEFA, позволил выявить проявления разрывной тектоники, которые обнаруживают себя в виде линеаментов. Разрывные нарушения исследуемой территории были выявлены благодаря алгоритмам

обработки изображений, таким как фильтрация, выделение детектирования границ изображения посредством бинарно-морфологической эрозии контуров Кэнни и преобразования Хафа.

Элементы геологической структуры, как правило, достаточно хорошо выделяются на местности (линии хребтов, линейные складки, бровки и подножья склонов, рвы, прямые элементы речных каньонов, бровки овражно-балочных систем, прямые участки береговых линий морей, озер, водохранилищ и многие другие). Для линеamentного анализа подбирались космические снимки высокого разрешения, на которых размеры пикселей существенно меньше ширины исследуемого линейного объекта. В автоматизированном режиме кроме природных линеаментов дешифрируются искусственные – каналы, автомобильные и железные дороги, трассы трубопроводов и прочие, которые заведомо упраздняются в интерактивном режиме с изображений. Если удалить антропогенные объекты в автоматизированном режиме невозможно, их «вручную» убирают со схем дешифрирования линеаментов, полученных с использованием программных комплексов Lessa или LEFA [3].

Сначала изображения, подготовленные для анализа, были преобразованы в бинарные, на которых объекты представлены белыми пикселями (значение 1), а фон – черными (значение – 0). Выбор шага квадратной матрицы для дискретизации изображения и размера пространственного окна анализа очень важен. Этим выбором определяется размер линеаментов, которые требуется выделить линии или границы разломных зон. Для каждого пикселя бинарного изображения проверялось соответствие структурному элементу (небольшой квадратной матрицей 3×3 пикселя с центральным элементом и окружающими его соседями). Если все пиксели в окрестности соответствуют структурному элементу, центральный пиксель сохранялся. В противном случае, он заменялся на 0 (черный). Этот процесс можно представить как «размытие» границ объектов на изображении при уменьшении их размеров.

Линеamentный анализ спутниковых изображений, который хорошо зарекомендовал себя при выполнении других исследований [46–52], позволил выявить зоны дизъюнктивных нарушений в юго-восточной части Сахалина, в том числе те, которые не были обнаружены ранее (рис. 2).

Автоматизированное дешифрирование изображений территории, по которой проходит трубопровод, позволило определить местоположение разрывных нарушений. В результате анализа выявлены зоны разломов и разломы различной протяженности [53]: I ранга – сотни и тысячи километров (надрегиональные), II ранга – десятки и сотни км (региональные), III ранга – километры и десятки

км, IV ранга – сотни и тысячи метров. При линейном анализе космических снимков определены наиболее крупные трещины V ранга (более 10 м) (рис. 3). Выявить трещины VI–IX рангов (менее 10 м) на космических снимках при современном уровне развития съемочной техники не удастся.

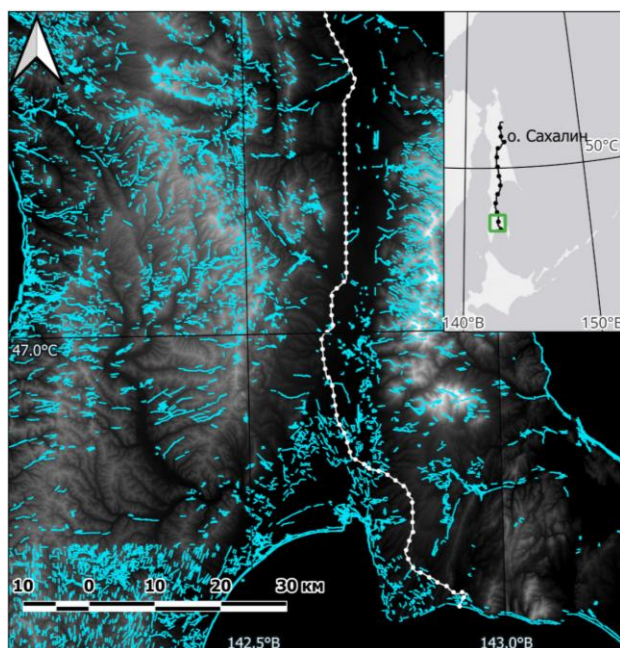


Рис. 2. Линеаменты юга Сахалина, выявленные с применением алгоритма Canny many
Fig. 2. Lineaments of the south Sakhalin, identified using the Canny many algorithm

Большую часть исследуемой территории занимают блоки земной коры Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий Японо-Сахалинской островной дуги – Крильонский и Сусунайский, которые разделены Анивским прогибом. С западной стороны островодужные блоки сопряжены с Западно-Хоккайдской шельфовой ступенью, примыкающей непосредственно к Япономорской депрессии, которая плавно переходит на севере в Татарско-Устьамурскую рифтовую систему прогибов. С восточной стороны система островодужных поднятий ограничена структурными блоками Охотоморской депрессии. При линейном анализе выделены разломные трансрегиональные зоны меридионального простирания: Центрально-Сахалинская, представленная Ключевским сегментом, Хоккайдо-Сахалинская (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины), Западно-Сахалинская (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов) (таблица). В плане разломные зоны представляют собой ряд субпараллельных нарушений. Видимая ширина зон достигает нескольких километров. Характерными особенно-

стями зон разломов являются большая протяженность, значительная глубина заложения и длительность развития.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
●●● трубопровод
— разломы по данным Landsat
— разломы по данным SRTM
--- выявленные разломы
— разломы, обозначенные на геологической карте
● Эпицентры землетрясений
● магнитудой 5,0 - 5,9
● магнитудой 4,0 - 4,9
● магнитудой 3,0 - 3,9
● магнитудой 0 - 2,9

Рис. 3. Схема расположения магистрального трубопровода и разломов, выявленных на исследуемой территории (зеленый прямоугольник). Цифрами обозначены разломы: 1 – Центрально-Сахалинский; 2 – Сусунайский; 3 – Хоккайдо-Сахалинский; 4 – Западно-Сахалинский

Fig. 3. Layout of the main pipeline and the identified faults in the research area (green rectangle). The following faults are indicated by numbers: 1 – Tsentralno-Sakhalinskiy; 2 – Susunayskiy; 3 – Khokkaido-Sakhalinskiy; 4 – Zapadno-Sakhalinskiy

Кроме того, на исследуемой территории выделены региональные разломные зоны II ранга: Сусунайская со сбросами амплитудой от 60 м (в районе п. Соловьевка) до 130 м (в районе п. Христофоровка), а также крупная цепь разломов диагонального простирания, ориентированная с северо-запада на юго-восток, которая пересекает трассу трубопровода на Вахрушевско-Христофоровском участке.

На космических снимках территории также выделяется большое количество локальных разломных зон III ранга, пересекающих трубопровод проекта «Сахалин-2»: Найбинская (долина р. Найбы), Малотакойско-Соколовская (долины рр. Малый Такой и Сокол, Лировско-Колкинская, Сусуинско-Раутинско-Волынская).

Таблица. Надрегиональные разломы исследуемой территории, выделяемые с помощью программы LEFA

Table. Supra-regional faults of the studied area, identified using the LEFA program

Название разлома Fault name	Характер смещений по разлому Character of the displacements along the fault	Другие источники информации о разломе Other sources of information about the fault
Хоккайдо-Сахалинский (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины) Khokkaido-Sakhalinskiy (Okhotsk-Ozerskiy fault zone branch of Tunaychinsky synclinal trough)	Взбросо-сдвиговые смещения на протяжении >1500 км. Ширина зоны (часто с опережающими разломами) достигает 7 км. Вертикальные смещения с мелового времени (K ₂) <1,5 км, горизонтальные – <5 км Thrust-strike-slip displacements extend for >1500 km. The width of the zone (often with associated splay faults) reaches 7 km. Vertical displacements since the Late Cretaceous (K ₂) are <1,5 km, while horizontal displacements are <5 km	[54–56]
Центрально-Сахалинский (Ключевская опережающая зона разломов) Tsentralno-Sakhalinskiy (Klyuchevskaya feathering fault zone)	Взбросо-надвиговые смещения на протяжении >1000 км. Ширина зоны (часто с опережающими разломами) достигает 10 км. Максимальные скорости горизонтальных деформаций (до 50 ×10 ⁻⁹ в год), наибольшее сжатие отмечались в районе повышенной сейсмической активности, при этом зона растяжений асейсмична Thrust-reverse displacements extend for >1000 km. The width of the zone (often featuring splay faults) reaches 10 km. The maximum horizontal strain rates (up to 50 ×10 ⁻⁹ per year) were recorded in the area of heightened seismic activity, while the extensional zone remains aseismic	[54–57]
Западно-Сахалинский (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов) Zapadno-Sakhalinskiy (Slepikovsko-Nevelskiy section of the fault zone)	Сбросовые и взбросо-сдвиговые смещения на протяжении >1000 км. Ширина зоны (часто с опережающими разломами) достигает 10 км. Вертикальные смещения с мелового времени (K ₂) <1,5 км, горизонтальные – <5 км Fault system displays normal and thrust-strike-slip displacements persisting over >1000 km, with a zone width of up to 10 km (commonly containing splay faults). Cumulative vertical displacement since K ₂ is <1,5 km, contrasting with horizontal offsets of <5 km	[57]

Разломы субширотной системы прерывают разломы субмеридиональной системы или сами прерываются ими, что привело к формированию мелкоблочного структурного плана исследуемой территории. Обычно эти разломы являются сбросами, сбросо-сдвигами и сдвигами и имеют небольшую протяженность.

Перемещения масс горных пород в зонах дислокаций приводят к разрушениям линейных сооружений, в том числе объектов трубопроводного транспорта. Сведения о состоянии трубопроводов в местах пересечения с разломными зонами должны собираться в базах данных аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем, которые обеспечивают создание геопространственных моделей с целью анализа текущей обстановки [58]. Такие модели востребованы при проведении инженерных изысканий, выполнении проектирования и строительства объектов трубопроводного транспорта, а также в процессе эксплуатации при проведении геотехнического мониторинга трубопроводов [59–61].

Заключение

Линеamentный анализ космических снимков территории, по которой трубопровод «Сахалин-2» проходит от промышленной площадки «Советское» до завода СПГ, позволил получить целостное представление о дизъюнктивных нарушениях поверхности литосферы и направленности неотекто-

нических процессов и обнаружить зоны разрывных нарушений, представляющих опасность для объектов инфраструктуры трубопровода.

На территории установлены главные трансрегиональные разломные зоны меридионального простирания (I ранга): Хоккайдо-Сахалинская (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины), Центрально-Сахалинская (Ключевская опережающая зона разломов) и Западно-Сахалинская (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов). Кроме того, выделены зоны разломов II ранга: Сусунайская на границе Сусунайского хребта и Сусунайской низменности, а также крупная цепь разломов северо-западно-юго-восточного диагонального простирания, пересекающая трассу трубопровода на Вахрушевско-Христофоровском участке. На снимках выделены более мелкие разломы III и IV ранга.

Возникновение разнонаправленной сети разломов (меридиональных и диагональных), как и структурного плана юга о. Сахалин в целом, объясняется вначале диагональным (северо-запад–юго-восток), а затем субширотным горизонтальным сжатием со стороны активных рифтовых и спрединговых впадин Японского и Охотского морей [57]. Еще одной особенностью геодинамической обстановки юга Сахалина является наличие области растяжений к востоку от Сусунайского разлома, которая выявлена ранее по результатам геодинамических процессов и обнаружить зоны разрывных нарушений, представляющих опасность для объектов инфраструктуры трубопровода.

зического мониторинга и отличается от окружающей территории, находящейся в условиях горизонтального сжатия [56].

Модели, создаваемые на основе аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем, должны включаться в проект Цифровая Земля, в котором предполагается аккумулирование информации обо всех системах и формах жизни, включая человеческие сообщества. Многомерный, многомасштабный, многовременной и многослойный ин-

формационный проект Цифровая Земля – необходимая платформа, служащая обеспечению целей устойчивого развития и формированию «безопасного рабочего пространства для человечества» [62].

Дальнейшие исследования разломных зон должны быть направлены на детализацию блоковой структуры территории, определение особенностей генезиса разломообразования и выявление закономерностей активизации наиболее крупных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонович К.М., Карпик А.П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 6. – С. 123–135.
2. Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линейментных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M=5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 года // Исследование Земли из космоса. – 2021. – № 2. – С. 3–14. DOI: 10.31857/S0205961421020020
3. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линейментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследования Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.
4. Зверев А.Т. Кинематика и динамика движений литосферных плит // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 5. – С. 22–33.
5. Карпик А.П., Каленицкий А.И., Соловицкий А.Н. Технология изучения изменений во времени деформаций блоков земной коры при освоении месторождений Кузбасса // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2013. – № 4 (24). – С. 3–11.
6. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцев Э.Ф. Основы линейментной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
7. Комиссаров А.В. Технология мониторинга защитных сооружений магистральных нефтепроводов методами геодезии и дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2024. – Т. 29. – № 1. – С. 65–72. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-65-72
8. Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. – 2022. – № 4. – С. 13–18. DOI: 10.1134/s1069351322040061
9. Малинников В.А., Зверев А.Т., Донов В.В. Методика оценки оползневой опасности на Черноморском побережье Кавказа на основе линейментного анализа аэрокосмических изображений // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2007. – № 6. – С. 86–92.
10. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake / W.W. Chen, B.J. Shih, Y.C. Chen, J.H. Hung, H.H. Hwang // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2002. – Vol. 22. – № 9–11. – P. 1209–1214.
11. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems // Acta Scientiarum. Technology. – 2010. – Vol. 32. – № 2. – P. 171–178.
12. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology // Developments in Earth Surface Processes. – 2020. – Vol. 23. – P. XIII–XV. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6
13. Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II / H. Tsutsumi, A. Kozhurin, M.I. Streltsov, T. Ueki, Y. Suzuki, M. Watanabe // Journal of Geography. – 2000. – Vol. 109. – № 2. – P. 294–301.
14. Космогеология СССР / Н.С. Афанасьева, В.И. Башилов, В.Н. Брюханов и др. / под ред. В.Н. Брюханова, Н.В. Межеловского. – М.: Недра, 1987. – 239 с.
15. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии / пер. с немецкого. – М.: Мир, 1988. – 344 с.
16. Ломизе М.Г., Хаин В.Е. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: Кн. дом Университет, 2005. – 560 с.
17. Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. – 2010. – № 6. – С. 79–98.
18. Анохин В.М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение. – СПб.: Недра, 2006. – 161 с.
19. O'Driscoll E.S.T. The double helix in global tectonics // Tectonophysics. – 1980. – Vol. 63. – № 1. – P. 397–417.
20. Steinberger B., Schmeling H., Marquart G. Large-scale lithospheric stress field and topography induced by global mantle circulation // Earth and Planetary Science Letters. – 2001. – Vol. 186. – P. 75–91.
21. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology / C. Tiberi, M. Diamant, J. Déverchère, C. Petit-Mariani, V. Mikhailov, S. Tikhotsky, U. Achauer // Journal of. Geophysical Research: Solid Earth. – 2003. – Vol. 108. – № B3. – P. 2133. DOI: 10.1029/2002JB001880
22. Математическое моделирование динамики перемещений оползневых склонов в условиях техногенных воздействий / В.С. Хорошилов, О.Г. Поплавская, Н.Н. Кобелева, Х.К. Ямбаев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28. – № 1. – С. 45–58. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58
23. Arun S.B., Kesavan K., Parivallal S. Recent advances in health monitoring and assessment of inservice oil and gas buried pipelines // Journal of the Institution of Engineers (India): Series A. – 2018. – Vol. 99. – P. 729–740. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0316-5>.
24. Khoroshilov V.S., Kobleva N.N., Noskov M.F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2022. – Vol. 8. – № 2. – P. 733–744. DOI: 10.22055/JACM.2022.38005.3129

25. Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (дата обращения 15.05.2024).
26. Sentinel Missions. Website European Space Agency (Electronic Materials). URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения 15.05.2024).
27. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled // GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey). URL: <https://glovis.usgs.gov/aP> (дата обращения 15.05.2024).
28. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook L8DS-1574.Version 1 / Approved by K. Zanter. – Sioux Falls, South Dakota, EROS, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2015. – 105 p. URL: <https://spationetblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/landsat8datausershandbook.pdf> (дата обращения 15.05.2024).
29. Geosample: Открытый набор геоданных для различного ПО ГИС // GIS-Lab (географические информационные системы и дистанционное зондирование) и авторы. – 2002-2024. URL: <https://gis-lab.info/qa/geosample.html/> (дата обращения 15.05.2024).
30. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. – 1997. – Vol. 23. – № 1. – P. 45–62.
31. The Seismo-Lineament Analysis Method (SLAM): a reconnaissance tool to help find seismogenic faults / V.S. Cronin, M. Millard, L. Seidman, B. Bayliss // Environmental & Engineering Geoscience. – 2008. – Vol. 14. – № 3. – P. 199–219.
32. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.
33. Canny J.F. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. 8. – P. 679–698.
34. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes // Pattern Recognition. – 1981. – Vol. 13. – № 2. – P. 111–122.
35. База данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий (AFEAD) // Сайт ГИН РАН, лаборатория неотектоники и современной геодинамики, 2015–2024. URL: <http://neotec.ginras.ru/database.html> (дата обращения 15.05.2024).
36. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset / E.A. Zelenin, D.M. Bachmanov, S.T. Garipova, V.G. Trifonov, A.I. Kozhurin // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – P. 4489–4503. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
37. Анохин В.М., Одесский И.А. Характеристики глобальной сети планетарной трещиноватости // Геотектоника. – 2001. – № 5. – С. 3–9.
38. Тектонолинементы и некоторые вопросы геотектоники / И.Э. Ломакин, В.М. Анохин, В.В. Кочелаб, В.В. Покалюк, Н.В. Шафранская, И.Н. Шураев // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3 (45). – С. 59–75.
39. Smoot N.Ch. Orthogonal intersections of megatrends in the Western Pacific ocean basin: a case study of the Mid-Pacific mountains // Geomorphology. – 1999. – № 30. – P. 323–356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00060-4)
40. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. статья 2: основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6 (1). – С. 1–43. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>
41. Ackermann R.V., Schlische R.W., Withjack M.O. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws // Journal of Structural Geology. – 2001. – Vol. 23 (11). – P. 1803–1819. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00028-1)
42. Caine J.S., Bruhn R.L., Forster C.B. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada // Journal of Structural Geology. – 2010. – Vol. 32 (11). – P. 1576–1589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.03.004>
43. Crider J.G., Pollard D.D. Fault linkage: three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1998. – Vol. 103 (10). – P. 24373–24391. DOI: <https://doi.org/10.1029/98jb01353>
44. Displacement/length scaling relationships for normal faults; a review, critique, and revised compilation / B.A. Lathrop, C.A.-L. Jackson, R.E. Bell, A. Rotevatn // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.907543>
45. Dependence of displacement-length scaling relations for fractures and deformation bands on the volumetric changes across them / R.A. Schultz, R. Soliva, H. Fossen, C.H. Okubo, D.M. Reeves // Journal of Structural Geology. – 2008. – Vol. 30 (11). – P. 1405–1411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.001>
46. Анохин В.М., Маслов Л.А. Опыт изучения закономерностей направленности и протяженности линементов и разломов в регионах // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2015. – № 1 (25). – С. 7–18.
47. Купцова О.В., Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Картографирование разломов на территории Северо-Сахалинской равнины по данным дистанционного зондирования земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – М.: Географический факультет МГУ, 2021. – Т. 27. – Ч. 1. – С. 317–329. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329)
48. Картографирование разрывных нарушений по данным аэрокосмических съемок с целью обеспечения безопасности магистральных трубопроводов (на примере участка Чайво – Де-Кастри) / О.В. Купцова, В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, Д.В. Долгополов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 92–102.
49. Мелкий В.А., Купцова О.В., Верхотуров А.А. Создание карты разломов Центрально-Камышового мегантиклинория Западно-Сахалинских гор по данным космических съемок // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 417–429.
50. Мелкий В.А., Купцова О.В., Верхотуров А.А. Автоматизированное картографирование разрывных нарушений в районе перешейки Поясок (Сахалин) по данным дистанционного зондирования // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2023. – Т. 29. – № 1. – С. 346–360. DOI: [10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360)

51. Сычугова Л.В., Фазилова Д.Ш. Выделение сквозных структур на основе линеamentного анализа: на примере территории Ферганской долины // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 408–416. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-408-416.
52. Wang J., Ye Z.-R., He J.-K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field // Tectonophysics. – 2008. – Vol. 446. – P. 51–60. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.11.006
53. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) от 13.11.2020 № 439 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (Зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 № 61603). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=466110> (дата обращения 15.05.2024).
54. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. – 1984. – № 2. – С. 77–86.
55. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3 (41). – С. 56–68.
56. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 2. С. 503–514. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0358.
57. Рождественский В.С. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция зоны Центрально-Сахалинского разлома в кайнозой // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 1. – С. 17–28.
58. Долгополов Д.В. Теоретическое обоснование принципов формирования геопространственных моделей трубопроводных систем // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66. – № 5. – С. 87–97. DOI: 10.30533/0536-101X-2022-66-5-87-97
59. Долгополов Д.В. Моделирование объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84. – № 5. – С. 43–51. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-995-5-43-51
60. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д.В. Долгополов, М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева, В.А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 25–34. DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003
61. Zirnig W., Hausmann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. Earth Observation Magazine. – 2002. – № 11. – P. 12–17.
62. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital Earth: platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables // Big Earth Data. – 2021. – Vol. 5. – № 4. – P. 476–496. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677>

Информация об авторах

Олеся Витальевна Купцова, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли, Сахалинский государственный университет, Россия, 634008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290; Korsuncevaolesy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9555-3238>

Вячеслав Анатольевич Мелкий, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б; vamelkiy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8919-8508>

Алексей Александрович Верхотуров, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б; ussr-91@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>

Поступила в редакцию: 05.07.2024

Поступила после рецензирования: 06.09.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Antonovich K.M., Karpik A.P. Monitoring of objects using GPS technologies and other methods of position determination. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2003, no. 6, pp. 123–135. (In Russ.)
2. Bondur V.G., Gaponova E.V. Registering from space anomalous variations of Baikal Rift zone lineament systems during the M=5.6 earthquake occurred on September 21, 2020. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, no. 9, pp. 1012–1020. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0205961421020020.
3. Bondur V.G., Zverev A.T. Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2007, no. 1, pp. 47–56 (In Russ.)
4. Zverev A.T. Kinematics and dynamics of movements of lithospheric plates. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2017, no. 5, pp. 22–33. (In Russ.)
5. Karpik A.P., Kalenitsky A.I., Solovitsky A.N. Technology for investigating time changes of earth blocks deformation in Kuzbass coal deposits development. *Vestnik SGGA (Siberian State Academy of Geodesy)*, 2021, vol. 26, no. 3, pp. 36–43. (In Russ.)
6. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. *Fundamentals of lineament tectonics*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 144 p. (In Russ.)
7. Komissarov A.V. Technology for monitoring protective structures of main oil pipelines by geodesy and remote sensing methods. *Vestnik SGUGiT*, 2024, vol. 29 (1), 65–72. (In Russ.)

8. Kuzmin Yu.O. Recent volumetric deformations of fault zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 445–458. (In Russ.)
9. Malinnikov V.A., Zverev A.T., Donovan V.V. Methodology for assessing landslide danger on the Black sea coast of the Caucasus based on lineament analysis of aerospace images. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2007, no. 6, pp. 86–92. (In Russ.)
10. Chen W.W., Shih B.J., Chen Y.C., Hung J.H., Hwang H.H. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, vol. 22, no. 9–11, pp. 1209–1214.
11. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. *Acta Scientiarum. Technology*, 2010, vol. 32, no. 2, pp. 171–178.
12. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology. *Developments in Earth Surface Processes*, 2020, vol. 23, pp. XIII–XV. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6
13. Tsutsumi H., Kozhurin A., Streltsov M.I., Ueki T., Suzuki Y., Watanabe M. Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II. *Journal of Geography*, 2000, vol. 109, no. 2, pp. 294–301.
14. Afanasyeva N.S., Bashilov V.I., Bryukhanov V.N. *Cosmogeochemistry of the USSR*. Eds. V.N. Bryukhanov, N.V. Mezhelovsky. Moscow, Nedra Publ., 1987. 239 p. (In Russ.)
15. Kronberg P. *Remote sensing of the Earth. Fundamentals and methods of remote sensing in geology*. Translated from German. Moscow, Nedra Publ., 1988. 344 p. (In Russ.)
16. Lomize M.G., Khain V.E. *Geotectonics with the basics of geodynamics: a textbook for university students*. Moscow, University Book House Publ., 2005. 560 p. (In Russ.)
17. Trifonov V.G., Kozhurin A.I. Problems of studying active faults. *Geotectonics*, 2010, no. 6, pp. 79–98. (In Russ.)
18. Anokhin V.M. *The global disjunctive network of the Earth: structure, origin and geological significance*. St Petersburg, Nedra Publ., 2006. 161 p. (In Russ.)
19. O'Driscoll E.S.T. The double helix in global tectonics. *Tectonophysics*, 1980, vol. 63, no. 1, pp. 397–417.
20. Steinberger B., Schmeling H., Marquart G. Large-scale lithospheric stress field and topography induced by global mantle circulation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, vol. 186, pp. 75–91.
21. Tiberi C., Diament M., Déverchère J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, vol. 108, no. B3, p. 2133. DOI: 10.1029/2002JB001880
22. Khoroshilov V.S., Poplavskaya O.G., Kobeleva N.N., Yambaev Kh.K. Mathematical modeling of the displacement dynamics of landslide slopes under the conditions of technogenic impacts. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2023, vol. 28, no. 1, pp. 45–58. (In Russ.) DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58
23. Arun S.B., Kesavan K., Parivallal S. Recent advances in health monitoring and assessment of inservice oil and gas buried pipelines. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, vol. 99, pp. 729–740. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0316-5>.
24. Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Noskov M.F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 733–744. (In Russ.) DOI: 10.22055/JACM.2022.38005.3129
25. *Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS)*. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (accessed 15 May 2024).
26. *Sentinel Missions. Website European Space Agency (Electronic Materials)*. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 15 May 2024).
27. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. *GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey)*. Available at: <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 15 May 2024).
28. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook L8DS-1574.Version 1*. Approved by K. Zanter, Sioux Falls, South Dakota, EROS, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2015, 105 p. Available at: <https://spationetblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/landsat8datausershandbook.pdf> (accessed 15 May 2024).
29. Geosample: Open Set of Geodata for various GIS software. *GIS-Lab (Geographic Information Systems and Remote Sensing) and the Authors*. 2002–2021. Available on: <https://gis-lab.info/qa/geosample.html/> (accessed 15 May 2024).
30. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. *Computers & Geosciences*, 1997, vol. 23, no. 1, pp. 45–62.
31. Cronin V.S., Millard M., Seidman L., Bayliss B. The Seismo-Lineament Analysis Method (SLAM): a reconnaissance tool to help find seismogenic faults. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 199–219.
32. Shiverov S.L. LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. *Advances in Current Natural sciences*, 2018, no. 10, pp. 138–143. (In Russ.)
33. Canny J.F. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, pp. 679–698.
34. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 1981, vol. 13, no. 2, pp. 111–122.
35. Database of active faults of Eurasia and adjacent waters (AHEAD). *Website Geological Institute of the RAS, Laboratory of Neotectonics and Modern Geodynamics*, 2015–2024 Available at: <http://neotec.ginras.ru/database.html> (accessed 15 May 2024).
36. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, pp. 4489–4503. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
37. Anokhin V.M., Odesskiy I.A. Characteristics of the global network of planetary fracturing. *Geotectonics*, 2001, no. 5, pp. 3–9. (In Russ.)
38. Lomakin I.E., Anokhin V.M., Kochelab V.V., Pokalyuk V.V., Shafranskaya N.V., Shuraev I.N. Tectonolineaments and some geotectonic problems. *Geology and minerals of the World Ocean*, 2016, no. 3 (45), pp. 59–75. (In Russ.)

39. Smoot N.Ch. Orthogonal intersections of megatrends in the Western Pacific ocean basin: a case study of the Mid-Pacific mountains. *Geomorphology*, 1999, no. 30, pp. 323–356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00060-4)
40. Seminsky K.Zh. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: main stages and prospects. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2015, vol. 6 (1), pp. 1–43. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>
41. Ackermann R.V., Schlische R.W., Withjack M.O. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws. *Journal of Structural Geology*, 2001, vol. 23 (11), pp. 1803–1819. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00028-1)
42. Caine J.S., Bruhn R.L., Forster C.B. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada. *Journal of Structural Geology*, 2010, vol. 32 (11), pp. 1576–1589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.03.004>
43. Crider J.G., Pollard D.D. Fault linkage: three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, vol. 103 (10), pp. 24373–24391. DOI: <https://doi.org/10.1029/98jb01353>
44. Lathrop B.A., Jackson C.A.-L., Bell R. E., Rotevatn A. Displacement/length scaling relationships for normal faults; a review, critique, and revised compilation. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.907543>
45. Schultz R.A., Soliva R., Fossen H., Okubo C.H., Reeves D.M. Dependence of displacement-length scaling relations for fractures and deformation bands on the volumetric changes across them. *Journal of Structural Geology*, 2008, vol. 30 (11), pp. 1405–1411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.001>
46. Anokhin V.M., Maslov L.A. Experience study regularity of direction and length for lineaments and faults in regions. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational and Scientific Center". Series: Earth Sciences*, 2015, no. 1 (25), pp. 7–18. (In Russ.)
47. Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Mapping of faults on territory of the North Sakhalin plain by remote sensing data. *InterCarto. GI support of sustainable development of territories. Proc. of the International conference*. Moscow, MSU, Faculty of Geography Publ., 2021. Vol. 27, P. 1, pp. 317–329. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329
48. Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Dolgoplov D.V. Fault mapping by data of aerospace surveys to ensure the safety of main pipelines (for example of the section Chayvo–De-Kastri Pipeline). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 92–102. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/6/3826
49. Melkiy V.A., Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A. Creation of a fault map of the Central Reed meganticlinory of the Western Sakhalin Mountains based on satellite surveys. *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 417–429. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-417-429
50. Melkiy V.A., Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A. Automated mapping of faults in the area of Poyasok isthmus (Sakhalin) by remote sensing data. *InterCarto. InterGIS*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 346–360. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360
51. Sychugova L.V., Fazilova D.S. Determination of transverse structures based on lineament analysis: a case study of the Fergana valley. *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 408–416. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-408-416
52. Wang J., Ye Z.-R., He J.-K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field. *Tectonophysics*, 2008, vol. 446, pp. 51–60. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.11.006
53. Order of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 439 dated 13/11/2020 "On Approval of Federal Norms and Rules in the field of industrial safety "Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 18/12/2020 No 61603). (In Russ.) Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=466110> (accessed 15 May 2024).
54. Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. Faults of Sakhalin. *Pacific Geology*, 1984, no. 2, pp. 77–86 (In Russ.)
55. Lomtev V.L., Zherdeva O.A. On seismotectonics Sakhalin: new approaches. *Geology and useful minerals of the World Ocean*, 2015, no. 3, pp. 56–68. (In Russ.)
56. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 503–514. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0358.
57. Rozhdestvenskii V.S. Active rifting in the Japan and Okhotsk Seas and the tectonic evolution of the Central Sakhalin fault zone in the Cenozoic. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 15–24. (In Russ.)
58. Dolgoplov D.V. Theoretical substantiation of the principles of formation of geospatial models of pipeline systems. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2022, vol. 66, no. 5, pp. 87–97. (In Russ.) DOI: 10.30533/0536-101X-2022-66-5-87-97
59. Dolgoplov D.V. Modeling of pipeline transportation facilities based on remote sensing data. *Geodezia i Kartografia*, 2023, vol. 84, no. 5, pp. 43–51. (In Russ.) DOI: 10.22389/0016-7126-2023-995-5-43-51
60. Dolgoplov D.V., Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Melkiy V.A. Application of air laser scanning technology in geotechnical monitoring for pipeline transport. *Monitoring. Science & Technologies*, 2022, no. 2 (52), pp. 25–34. (In Russ.) DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003
61. Zirnig W., Hausmann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. *Earth Observation Magazine*, 2002, no. 11, pp. 12–17.
62. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital Earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. *Big Earth Data*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 476–496. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677>

Information about the authors

Olesya V. Kuptsova, Cand. Sc., Associate Professor, Sakhalin State University, 290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russian Federation; Korsuncevaolesy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9555-3238>

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation; vamelkiy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8919-8508>

Alexey A. Verkhoturov, Cand Sc., senior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation; ussr-91@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>

Received: 05.07.2024

Revised: 06.09.2024

Accepted: 19.03.2025

УДК 553.411.071:550.4

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

Шифр специальности ВАК: 1.6.6, 1.6.10

Структурные и геофизические критерии золотого оруденения Таборнинского золоторудного поля (юго-западная Якутия)

А.В. Ярчук^{1,2✉}, Ю.С. Ананьев¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² ООО «Нерюнгри-Металик», Россия, г. Нерюнгри (Хани)

✉avy29@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В юго-западной Якутии в южной части угуйского грабена выявлен ряд золоторудных месторождений (Таборное, Гросс, Темное и др.), которые были сформированы в период мезозойской тектономагматической активизации в связи с внедрением малых интрузий сиенитов, проявлением гумбеитизации и березитизации с сопряженным золотым оруденением. Эти большеобъемные объекты относят к новому угуйскому типу. Невысокая изученность подобных объектов, в совокупности с простой технологией разработки и переработки подобного минерального сырья, определяет актуальность выявления критериев оруденения золоторудных месторождений подобного типа на примере Таборнинского рудного поля. **Цель.** Разработка структурно-вещественных и геофизических разноранговых критериев золотого оруденения угуйского типа. **Методы.** Для выполнения поставленной цели использовалось структурно-вещественное дешифрирование современных спектральных снимков Landsat, Aster, Sentinel и цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), обработка и интерпретация физических полей по данным аэромагнитометрической и аэрогаммаспектрометрической съемок с построением структурно-вещественной схемы рудного поля и уточнением его геологического строения. **Выводы.** Золотое оруденение в структурном отношении контролируется взбросо-надвиговым структурным парагенезисом в надинтрузивных участках, выявленных при дешифрировании космических снимков. Установлено, что вещественными критериями протекания рудно-метасоматических процессов можно считать как результаты спектрального анализа космических снимков, так и аэромагнитные и аэрогаммаспектрометрические поля.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, угуйский тип, Таборнинское рудное поле, поисковые критерии, дешифрирование космических снимков, аэрогеофизика

Для цитирования: Ярчук А.В., Ананьев Ю. С. Структурные и геофизические критерии золотого оруденения Таборнинского золоторудного поля (юго-западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 202–211. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

UDC 553.411.071:550.4

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

Structural and geophysical criteria of gold minerality of the Taborninsky gold field (Southwestern Yakutia)

A.V. Yarchuk^{1,2✉}, Yu.S. Ananyev¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² LLC «Neryungri-Metalik», Neryungri (Khani), Russian Federation

✉avy29@tpu.ru

Abstract. Relevance. In southwestern Yakutia, in the southern part of the Uguy graben, a number of gold deposits (Tabornoe, Gross, Temnoe, etc.) have been identified. They were formed during the period of Mesozoic tectono-magmatic activation in relation to the introduction of small intrusions of syenites, manifestation of gumbeitization and beresitization with associated gold mineralization. These large-volume objects are classified as new Uguy type. The low level of knowledge of such objects,

combined with the simple technology of development and processing of such mineral raw materials, determines the relevance of identifying criteria for the mineralization of gold ore deposits of this type using the example of the Taborninsky ore field. **Aim.** To develop structural, material and geophysical criteria for gold mineralization of the Ugui type of the rank of ore field and deposit. **Methods.** To achieve this goal the authors used structural and material interpretation of modern spectro-zonal images from Landsat, Aster, Sentinel and a digital relief model SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), processing and interpretation of physical fields based on aeromagnetic and airborne gamma spectrometric surveys with the construction of a structural and material diagram of the ore field and clarification of its geological structure. **Conclusions.** Gold mineralization is structurally controlled by reverse-thrust structural paragenesis in supra-intrusive areas identified by interpretation of satellite images. It was established that both the results of spectral analysis of space images and aeromagnetic and aerial gamma spectrometric fields can be considered as material criteria for the occurrence of ore-metasomatic processes.

Keywords: ore gold deposit, Ugui type, Taborninsky ore field, search criteria, interpretation of satellite images, airborne geophysics

For citation: Yarchuk A.V., Ananyev Yu.S. Structural and geophysical criteria of gold minerality of the Taborninsky gold field (Southwestern Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 202–211. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4473

Введение

Таборнинское золоторудное поле расположено в пределах западного склона Алдано-Станового щита Сибирской платформы. В металлогеническом отношении рудное поле является составной частью Угуйского медно-ураново-золоторудного района и Верхнетоккинской уран-золотоносной минерагенической зоны [1–5].

Таборнинское рудное поле вмещает месторождения (Таборное, Темное-Таборное, Гросс), рудопроявления золота (Высокое, Рудное, Токкинское, Южное, Усинское) и россыпи ручьев Тёмный, Таборный, Гросс, Усу и др. (рис. 1). Разрабатываемые в настоящее время месторождения рудного поля относятся к так называемому «угуйскому» геолого-промышленному типу большеобъемных месторождений с невысоким содержанием полезного компонента. Эти объекты были сформированы в период мезозойской тектономагматической активизации в связи с внедрением малых интрузий сиенитов калиевой серии по зонам чешуйчатых взбросо-надвиговых структур, сопровождавшимся гумбеитизацией и березитизацией вмещающих пород с сопряженной золоторудной минерализацией с последующими гипергенными преобразованиями с образованием линейных кор выветривания неполного профиля [3, 6–8].

Геологическое строение рудного поля Таборное

Таборнинское рудное поле (рис. 1) располагается в южной части Угуйского грабена, который был заложен в рифее на архейском основании, метаморфизованном в условиях амфиболитовой фации (олекминская и борсалинская серии верхнего архея) [8]. На метаморфическом основании грабена несогласно залегают пестроцветные вулканогенно-карбонатно-терригенные образования нижнего протерозоя (тоустайская, правдинская, амнунинская свиты) мощностью от 400 до 800 м. Страти-

графически выше с размывом залегают карбонатно-терригенные образования телиэрской свиты мощностью от 70 до 150 м. Основную часть угуйского грабена выполняют терригенные породы олонноконской свиты, которые с базальными конгломератами в основании (5–10 м) залегают на различных горизонтах подстилающих нижнепротерозойских стратиграфических подразделений вплоть до пород кристаллического фундамента архея. Свита разделяется на две подсвиты – нижнюю и верхнюю. Нижнеолонноконская подсвита сложена монотонной толщей красноцветных песчаников мелко-крупнозернистых с параллельной и косой слоистостью. В нижней части – прослои темно-коричневых алевролитов мощностью до 1 м, в основании – базальные конгломераты и конглобрекции с обломками и галькой пород кристаллического фундамента. Мощность подсвиты 250–1200 м. Верхнеолонноконская подсвита представлена песчаниками красноцветными, мелкозернистыми, кварцполевошпатовыми, редко кварцевыми, слоистость пород горизонтальная и косослоистая, отмечаются редкие прослои темно-коричневых алевролитов, линзы гравелитов, конгломератов и серых медистых песчаников. Мощность подсвиты лежит в пределах от 150 до 550 м.

В пределах Таборнинского рудного поля, на современной дневной поверхности, обнажаются только образования нижнеолонноконской подсвиты нижнего протерозоя.

В исследуемом районе проявилось несколько тектономагматических этапов, которые сформировали позднеархейские, рифейский и мезозойской магматические комплексы. В пределах рудного поля позднеархейские комплексы представлены палингенно-метасоматическими ханинским (граниты и гранитогнейсы) и чародоканским (граниты, субщелочные граниты, кварцевые сиениты). Рифейский магматизм проявлен торским комплексом

метадолеритовых даек преимущественно северо-восточного простирания. И, наконец, мезозойский магматизм этапа тектономагматической активизации проявился в виде даек, силлов и небольших штоков эгириновых сиенитов, тенсбергит-порфиров, сельвсбергитов, бостонит-порфиров, нордмаркитов, субщелочных и щелочных сиенит-порфиров.

Главной тектонической структурой рудного поля является юго-западное окончание угуйского грабена, который ограничен с запада Токкинской зоной глубинного разлома, а с юга – Кондинской (рис. 1).

Пликативная структура рудного поля представлена южным крылом брахисинклинали с осью северо-восточного простирания и небольшими углами падения крыла (10–25°), осложненная флексурными перегибами.

С мезозойским этапом тектономагматической активизации связано формирование метасоматитов калиевого профиля – гумбеитов и березитов. Метасоматиты этих типов контролируются субширотной Кондинской зоной разломов, протягивающейся вдоль южной границы Угуйского грабена. Также они тяготеют к зонам разрывных нарушений различной кинематики, как секущих по отношению к слоистости вмещающих осадочных пород нижнеолонноконской подсвиты, так и субогласных со слоистостью. Золотое оруденение приурочено к зонам гидротермальной проработки песчаников нижнеолонноконской подсвиты кебектинской серии. Рудные тела тяготеют к разрывной тектонике и по морфологии представляют собой минерализованные зоны с невысокими выдержанными содержаниями золота и развитым по ним линейным кограм выветривания.

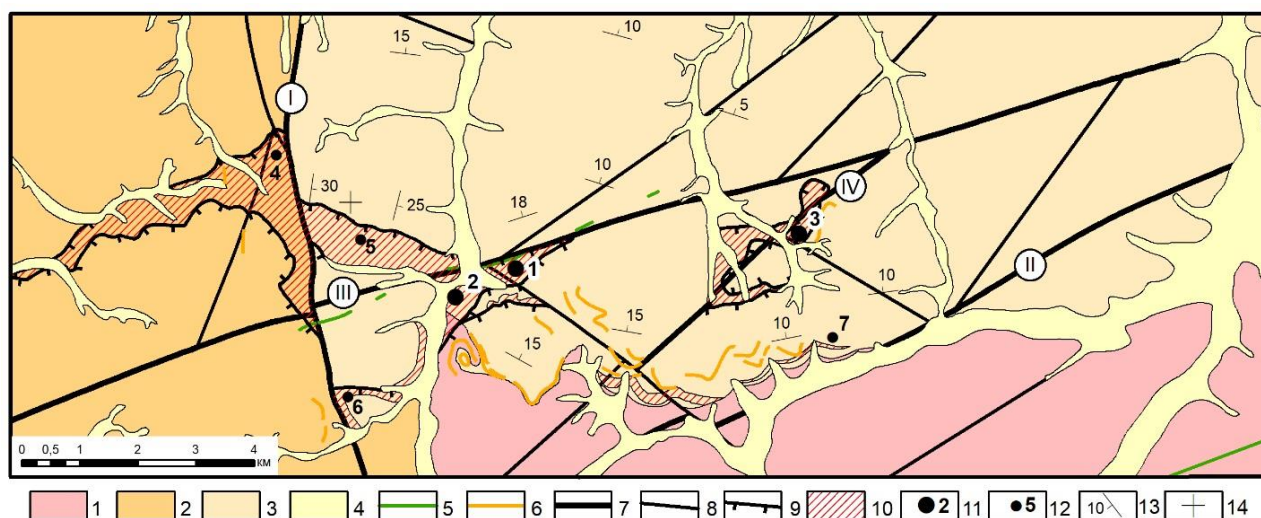


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Таборнинского рудного поля (по [8] с дополнениями авторов): 1 – граниты и гранитогнейсы ханинского комплекса позднего архея; 2 – граниты, субщелочные граниты, кварцевые сиениты чародоканского комплекса позднего архея; 3 – красноцветные кварц-полевошпатовые песчаники нижней олонноконской подсвиты нижнего протерозоя; 4 – аллювиальные, флювиогляциальные, пролювиальные отложения плейстоцена-голоцена; 5 – дайки метадолеритов торского комплекса позднего рифея; 6 – силлы и дайки сиенитов и бостонитов алданского интрузивного комплекса раннего мела; 7–9 – разрывные нарушения: 7 – главные (I – Токкинский, II – Кондинский, III – Таборнинский, IV – Гроссовский); 8 – прочие; 9 – надвиги и взбросы; 10 – рудовмещающие коры выветривания по метасоматически измененным породам; 11, 12 – месторождения и рудопроявления Таборнинского рудного поля: 11 – месторождения (1 – Таборное, 2 – Темное-Таборное, 3 – Гросс); 12 – рудопроявления (4 – Токкинское, 5 – Рудное, 6 – Высокое, 7 – Южное); 13, 14 – элементы залегания слоистости: 13 – наклонное залегание; 14 – горизонтальное залегание

Fig. 1. Schematic geological map of the Taborninsky ore field (according to [8] with additions by the authors): 1 – granites and granite gneisses of the Khaninsky complex of the late Archean; 2 – granites, subalkaline granites, quartz syenites of the Charodokan complex of the Late Archean; 3 – red-colored quartz-feldspathic sandstones of the lower Olonnok subformation of the Lower Proterozoic; 4 – alluvial, fluvio-glacial, proluvial sediments of the Pleistocene-Holocene; 5 – metadolerite dikes of the Late Riphean Tor complex; 6 – sills and dikes of syenites and bostonites of the Aldan intrusive complex of the Early Cretaceous; 7–9 – discontinuous faults: 7 – main (I – Tokkinsky, II – Kondinsky, III – Taborninsky, IV – Grossovsky); 8 – other; 9 – thrusts and reverse faults; 10 – ore-bearing weathering crusts on metasomatically altered rocks; 11, 12 – deposits and ore occurrences of the Taborninsky ore field: 11 – deposits (1 – Tabornoe, 2 – Temnoe-Tabornoe, 3 – Gross); 12 – ore occurrences (4 – Tokkinskoe, 5 – Rudnoe, 6 – Vysokoe, 7 – Yuzhnoe); 13, 14 – elements of bedding: 13 – inclined bedding; 14 – horizontal position

Методика исследования

В основу исследования положены материалы космических съемок Landsat, Aster и цифровая модель рельефа SRTM, полученные из библиотеки космических снимков американского геологического общества [9]. Результаты съемок Sentinel получены с портала Европейского космического агентства [10]. Методика обработки материалов космических съемок в литературе обсуждалась достаточно широко [11–24] и сводилась к следующему:

- подбор материалов космических съемок Landsat, Sentinel, Aster и SRTM;
- первичная обработка, улучшение, радиометрическая калибровка, классификация исходных растровых изображений и их структурное дешифрирование;
- создание мультиспектральных изображений из моноканальных растров и их структурное дешифрирование;
- расчет спектральных индексов по материалам Aster и их дешифрирование: филлитовый и $(\text{Fillit} = (\text{Band5} + \text{Band7}) / \text{Band6})$ глинистый $(\text{Clay} = (\text{Band5} * \text{Band7}) / (\text{Band6} * \text{Band6}))$ минеральные индексы указывают на участки преимущественного развития гидрослюдистых и глинистых минералов; мафический индекс [18] $(\text{Mi}^3 = (\text{band12} * \text{band14} * \text{band14} * \text{band14}) / (\text{band13} * \text{band13} * \text{band13} * \text{band13}))$, значения которого менее 0,87, указывает на участки распространения кислых пород и окварцевания; индекс трехвалентного железа $(\text{Fe}^{3+} = \text{Band2} / \text{Band1})$ фиксирует участки с окисленными сульфидами и карбонатами железа;
- корреляционный анализ SWIR диапазона съемок Aster методом главных компонент и их дешифрирование. В исследованиях был применен метод селективных главных компонент [21–23]. Эта разновидность традиционного метода заключается в том, что для расчетов используются не все 6 каналов SWIR диапазона Aster, а 5 или 4, но обязательно те, в которых отражаются характеристические полосы поглощения картируемых минералов и минеральных ассоциаций;
- геологическая интерпретация всего комплекса полученных материалов с созданием структурно-вещественной схемы Таборнинского рудного поля с привлечением геологических, геохимической и аэрогеофизической информации;
- обоснование структурных и вещественных критериев золотого оруденения по результатам структурно-вещественного дешифрирования.

В исследованиях использованы результаты аэрогеофизических съемок, выполненных компанией ФГУ НПП «Геологоразведка» в 2009 г. Обработка и интерпретация физических полей и их про-

изводных выполнялись с целью выделения неоднородностей верхней части земной коры, выделения и подтверждения положения дизъюнктивных нарушений, возможных участков протекания метасоматических процессов, развития кор выветривания и других элементов геологического строения.

Методика работы с аэрогеофизическими данными была следующей:

- интерпретация наблюдаемых полей с выделением элементов геологического строения;
- расчет градиентных, корреляционных и статистических показателей по наблюдаемым полям и их последующая интерпретация;
- сопоставление физических полей и их дериватов с элементами структурного геологического дешифрирования для подтверждения корректности их выделения;
- выделение возможных участков протекания метасоматических процессов и их сопоставление с результатами вещественного дешифрирования;
- интерпретация всего комплекса полученной информации с привлечением геологических, геохимических данных с целью обоснования геофизических критериев золотого оруденения.

Полученные результаты

Обработка и дешифрирование современных спектральных снимков Landsat, Sentinel, Aster позволили составить структурно-вещественную схему Таборнинского рудного поля (рис. 2). Основными элементами схемы являются стратифицированные образования, магматические комплексы, кольцевые структуры, разрывные нарушения, коры выветривания, участки окварцевания и лимонитизации.

Стратифицированные красноцветные кварц-полевошпатовые песчаники нижней олонноконской подсистемы нижнего протерозоя уверенно распознаются на космических снимках по линейно-полосчатому рисунку растрового изображения космоматериалов, отражающего слоистость стратифицированных комплексов.

Интрузивные породы ханинского и чародоканского комплексов позднего архея в материалах дистанционных съемок фиксируются относительно однородными тонами растрового изображения, слабо проявленной решетчатой системой протектонических трещин, бугристым рельефом и разреженным растительным покровом. Между собой породы разных комплексов различаются значениями мафического индекса третьей степени – граниты ханинского комплекса проявляют более низкие значения этого индекса в сравнении с породами чародоканского комплекса.

Дайки метадолеритов Торского комплекса позднего рифея выделяются хорошо выраженными гребнями рельефа северо-восточного простирания.

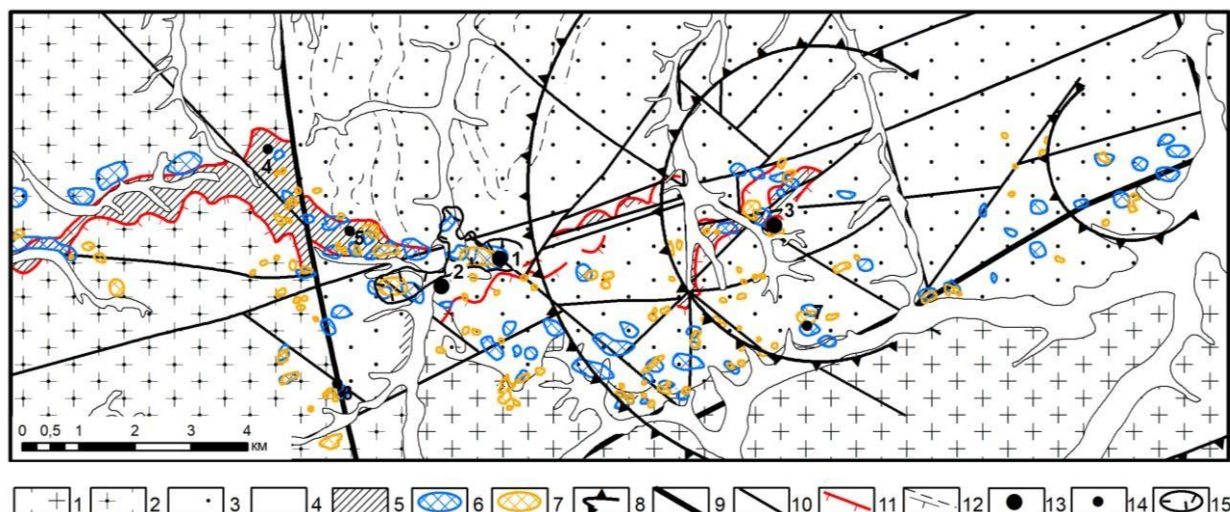


Рис. 2. Структурно-вещественная схема Таборнинского рудного поля по результатам дешифрирования космических снимков: 1 – граниты и гранитоиды ханинского комплекса; 2 – субщелочные граниты чародоканского комплекса; 3 – песчаники оллонокской свиты; 4 – аллювиальные, пролювиальные и флювиогляциальные отложения; 5 – коры выветривания; 6 – участки окварцевания; 7 – участки интенсивной лимонитизации; 8 – кольцевые структуры; 9, 10 – разрывные нарушения: 9 – главные; 10 – прочие; 11 – взбросы и надвиги; 12 – элементы линейности (слоистости ?) в стратифицированных породах и направления их падения; 13, 14 – месторождения и рудопоявления Таборнинского рудного поля: 13 – месторождения (1 – Таборное, 2 – Темное, 3 – Гросс); 14 – рудопоявления (4 – Токкинское, 5 – Рудное, 6 – Высокое, 7 – Южное); 15 – карьер месторождений Таборное и Темное

Fig. 2. Structural and material diagram of the Taborninsky ore field based on the results of interpretation of satellite images: 1 – granites and granite gneisses of the Khaninsky complex; 2 – subalkaline granites of the Charodokan complex; 3 – sandstones of the Ollonok formation; 4 – alluvial, proluvial and fluvioglacial deposits; 5 – weathering crust; 6 – areas of silicification; 7 – areas of intense limonitization; 8 – ring structures; 9, 10 – discontinuous faults: 9 – main; 10 – other; 11 – reverse faults and thrusts; 12 – elements of linearity (layering?) in stratified rocks and direction of their dip; 13, 14 – deposits and ore occurrences of the Taborninsky ore field: 13 – deposits (1 – Tabornoe, 2 – Temnoe, 3 – Gross); 14 – ore occurrences (4 – Tokkinskoe, 5 – Rudnoe, 6 – Vysokoe, 7 – Yuzhnoe); 15 – quarry of the Tabornoe and Temnoe deposits

Силлы и дайки сиенитов алданского комплекса раннемелового возраста уверенно дешифрируются совокупностью структурных и вещественных признаков – пологими и крутыми линеаменами, подчеркнутыми более высокими значениями индекса кремнезема в сравнении с вмещающими породами.

Кольцевые структуры в материалах космических съемок фиксируются по дуго- и кольцеобразным формам рельефа, подчеркнутым контрастными спектрально-текстурными характеристиками ландшафтов. В складчатых поясах и зонах тектономагматической активизации кольцевые структуры указывают на площади формирования слепых интрузивных тел [25, 26]. Дополнительным доказательством наличия слепых интрузивных тел являются дайки и силлы сиенитов, которые обнаруживаются в областях влияния кольцевых структур.

Выделены две системы кольцевых структур диаметром от 3 до 12 км, пространственно тяготеющих к зоне разрывных нарушений северо-восточного простирания (рис. 2).

Известные месторождения в пределах рудного поля размещаются вполне закономерно относи-

тельно выделенных кольцевых структур: месторождение Гросс – в центральной части телескопированной кольцевой структуры, а месторождения Таборное и Темное – во фронтальной.

Разрывные нарушения выделялись по комплексу признаков: нарушению непрерывности дешифрируемых элементов линейности стратифицированных комплексов, смене текстуры растрового изображения по обе стороны разрывного нарушения, смещению русел речной сети первого и второго порядка, прямолинейным полосам растительности для крутых и вертикальных разрывов, линейному характеру речных долин. Зоны взбросо-надвигов отчетливо картируются по дугообразным формам рельефа в совокупности с вышеприведенным признакам.

Совокупность дешифрируемых взбросо-надвигов и разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простираний образуют единый «надвиговый» структурный парагенезис.

Анализ пространственного положения рудного поля и месторождений относительно разрывных

нарушений показывает, что рудное поле в целом контролируется надвиговым структурным парагенезисом северо-восточного простирания, а известные месторождения (Таборное, Темное, Гросс) размещаются в надвиговых структурах в участках сопряжения северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений.

Коры выветривания отчетливо выделяются высокими значениями минеральных индексов Clay и Fillit. Обработка SWIR-диапазона снимка ASTER методом селективных главных компонент [21–23] также позволила подчеркнуть коры выветривания. Они отчетливо проявляются во второй главной компоненте (таблица), что выражается низкими значениями собственных векторов в 6 спектральном диапазоне Aster и более высокими в 5 и 7. Такие значения собственных векторов характерны для глинистых и гидрослюдистых минералов, свойственных в том числе и корам выветривания.

Таблица. Матрица собственных векторов по результатам обработки SWIR-диапазона методом селективных главных компонент

Table. Matrix of eigenvectors based on the results of processing the SWIR range using the method of selective principal components

Каналы Aster	Главные компоненты Main components				
Aster bands	1	2	3	4	5
5	0,53558	-0,29487	-0,78404	0,09935	-0,0403
6	0,56269	-0,56971	-0,59888	0,00614	0,01036
7	0,47493	0,63875	-0,15425	0,58119	0,0698
8	0,35737	0,3826	-0,04425	-0,65974	-0,53731
9	0,20802	0,18465	0,02953	-0,4659	0,83946

Низкие значения мафического индекса и высокие показатели индекса трехвалентного железа, которые указывают на участки окварцевания и развития гидроокислов железа за счет разложения сульфидов, сидерита и анкерита рудоносных метасоматитов, укладываются в восток-северо-восточную зону вдоль южной тектонической границы угуйского грабена. В пределах этой зоны располагаются все известные месторождения и рудопроявления рудного поля.

Сопоставление аномальных значений минеральных индексов с положением литохимических аномалий золота по первичным ореолам рассеяния показало их высокую сходимость, что позволяет использовать эти показатели в качестве критериев выделения потенциально рудоносных площадей ранга рудное поле.

Аллювиальные, флювиогляциальные, пролювиальные отложения плейстоцена-голоцена устанавливаются в речных долинах, у основания склонов, в сухих логах.

Обработка и интерпретация аэрогеофизических полей позволили выявить ряд закономерностей проявления элементов геологического строения и потенциальной рудоносности. Необходимо отметить, что сопоставление результатов дешифрирования и аэрогеофизических полей показало их весьма высокую сходимость, что дало основание использовать данные аэрогеофизических съемок для уточнения геологического строения рудного поля (рис. 1).

Таборнинское рудное поле характеризуется низким, спокойным магнитным полем с весьма низкой дисперсией (рис. 3, а). Его линейные отрицательные аномалии, как правило, подчеркивают зоны разрывных нарушений разного порядка, а положительные, северо-восточного простирания, фиксируют дайки метадолеритов торского комплекса за пределами рудного поля.

В полях распределения естественных радиоактивных элементов также отчетливо проявлены некоторые элементы геологического строения. Так, повышенными значениями поля К закономерно фиксируются коры выветривания (рис. 3, б), слабо повышенными значениями линейного поля Th отмечаются площади месторождений и рудопроявлений рудного поля (рис. 3, в). При этом аномалии калия и тория фиксируют площади распространения гранитоидов ханинского и чародоканского комплексов. Дополнительно предлагается использовать отношение нормированных концентраций KTh/UU (рис. 3, г). По нашему мнению, этот показатель более отчетливо фиксирует потенциально рудоносные коры выветривания, развитые по гумбеитам и березитам: повышенный К, с одной стороны, указывает на развитие кор выветривания, а с другой стороны, фиксирует площади протекания метасоматических процессов. U, в отличие от Th, как известно, подвижен при кислотном выщелачивании и выносится на фланги зон протекания метасоматических процессов (рис. 4, а), а потенциально рудоносные зоны отчетливо выявляются K/U отношением (рис. 4, б).

Выявленные геофизические закономерности можно использовать в качестве критерия рудных полей и рудных зон подобного типа.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование показали, что рудное поле, месторождения и рудопроявления золота находят свое отражение в материалах структурно-вещественного дешифрирования спектральных снимков и в наблюдаемых физических полях. Это позволяет сформулировать структурные, вещественные и геофизические критерии золотого оруденения угуйского типа ранга рудное поле (локальные) и месторождение (детальные).

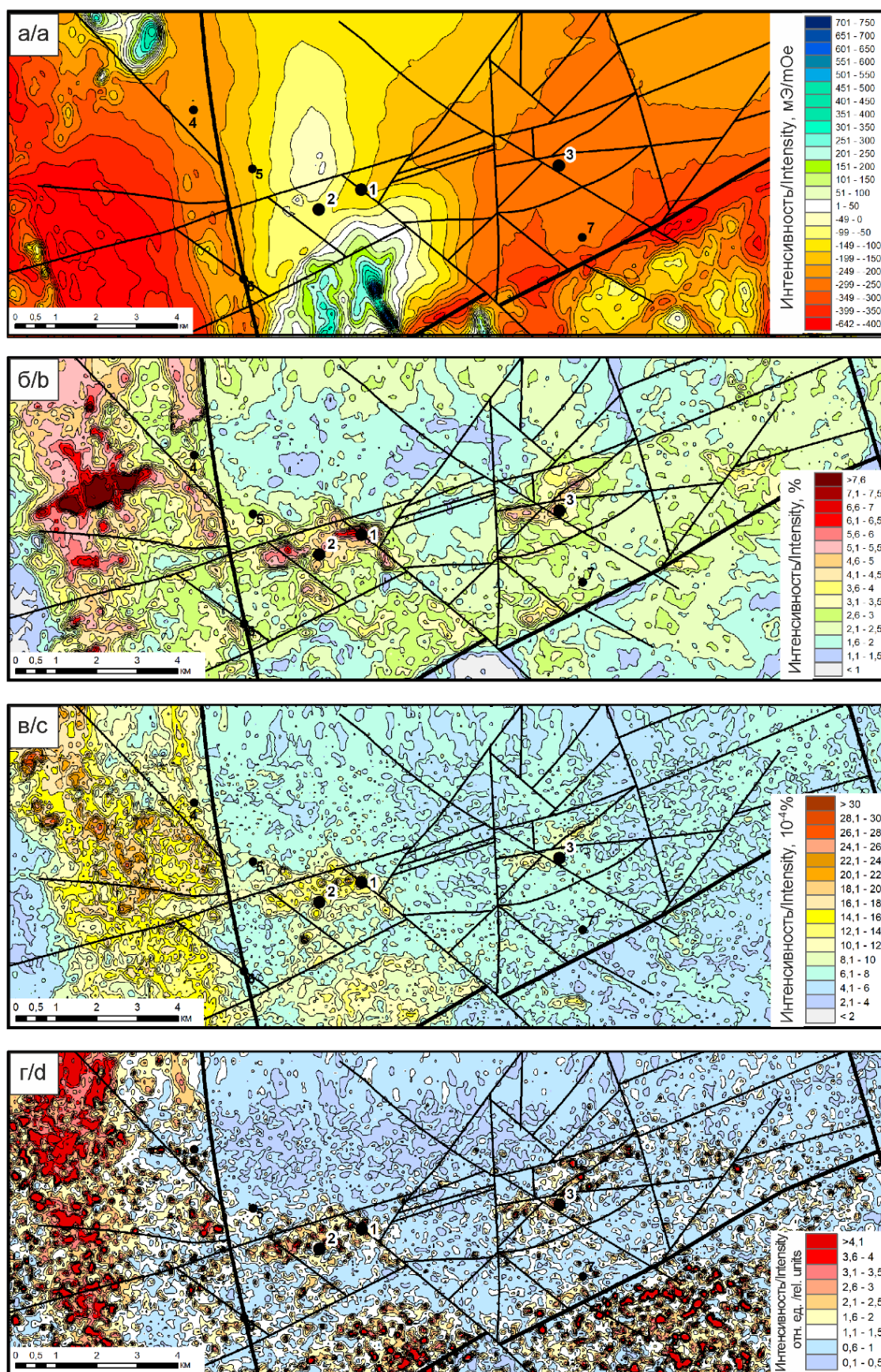


Рис. 3. Таборнинское рудное поле в физических полях: а) магнитное поле; б) поле К; в) поле Th; г) KTh/UU отношение. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 3. Taborninsky ore field in physical fields: a) magnetic field; б) field K; в) field Th; д) KTh/UU ratio. Legend is in Fig. 1

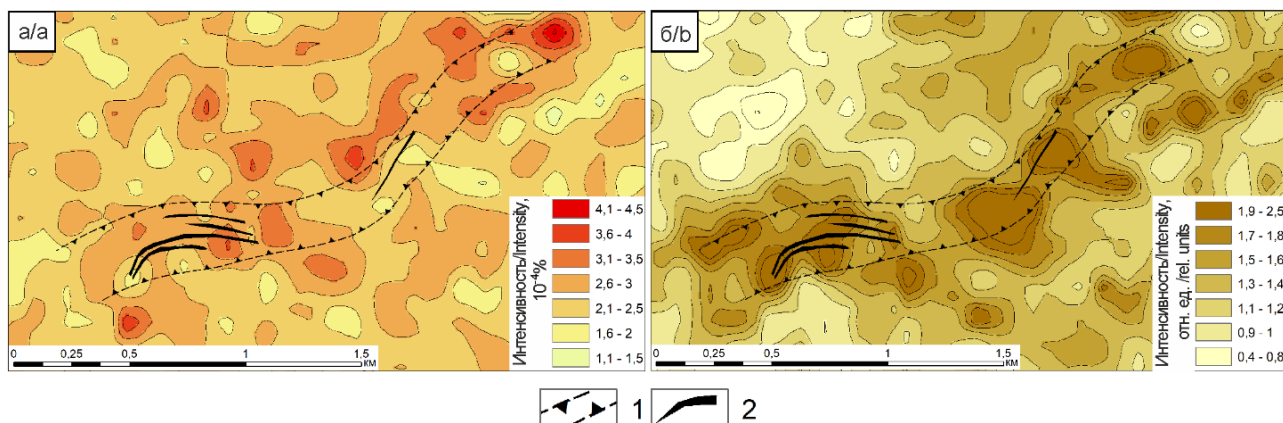


Рис. 4. Рудная зона месторождения Гросс в физических полях: а) поле U ; б) K/U отношение; 1 – рудная зона; 2 – рудные тела

Fig. 4. Ore zone of the Gross deposit in physical fields: а) field U ; б) K/U ratio; 1 – ore zone; 2 – ore bodies

Локальные критерии

- Структурно-вещественные (по результатам дешифрирования спектрозональных снимков): рудные поля размещаются в пределах проявления надвигового структурного парагенезиса в области влияния телескопированных кольцевых структур, которые интерпретируются нами как слепые интрузивные тела. Вещественным критерием протекания рудно-метасоматических процессов могут служить значения минеральных индексов – мафического и трехвалентного железа.
- Геофизические: потенциально рудоносные площади характеризуются слабым, спокойным маг-

нитным полем с низкой дисперсией. В полях естественных радиоактивных элементов отмечаются линейные аномалии калия и тория, сопряженные с надвиговым структурным парагенезисом.

Детальные критерии

Структурным критерием можно считать участки сопряжения отдельных разрывов надвигового структурного парагенезиса, а геофизическими – высокие значения отношения K/U , которые указывают на участки протекания метасоматических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлогения золота Алданской провинции / Н.В. Попов, М.Н. Шапорина, В.А. Амузинский, А.П. Смелов, А.Н. Зедгенизов // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40 – № 5. – С. 716–728.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 – Бодайбо. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. – 612с.
3. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, В.В. Шатов, О.В. Петров, К.А. Кукушкин, Д.С. Козлов, Н.В. Шатова // Металлогения. – 2017. – № 71. – С. 93–111.
4. Геологическое строение и рудоносность Олдонгсинской и Угуйской грабен-синклиналей / К.А. Кукушкин, А.В. Терехов, А.В. Молчанов, Д.С. Козлов, О.Л. Соловьев, Д.Ю. Титов, Е.И. Хорохорина // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 72. – С. 91–102.
5. Геология и рудоносность Угуйской и Олдонгсинской структур Чаро-Олёкминского блока Алданского щита (по материалам ГДП-200) / К.А. Кукушкин, А.В. Терехов, А.В. Молчанов, Д.С. Козлов, О.Л. Соловьев, Д.Ю. Титов, Е.И. Хорохорина // Руды и металлы. – 2018. – № 3. – С. 31–39.
6. Седенко С.В., Седенко Е.Г. Низкотемпературные лимонит-кварц-калийшпатовые метасоматиты – новый тип золотого оруденения западной части Алданского щита // Отечественная геология. – 1994. – № 9. – С. 11–18.
7. Двуреченская С.С., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности пород и руд месторождения Таборное, западная часть Алданского щита // Руды и металлы. – 2005. – № 2. – С. 28–36.
8. Зубков Ю.А., Сагир А.В., Чварова Н.В. «Угуйский» тип большеобъемных золоторудных месторождений, сформированных в линейной коре выветривания (юго-западная Якутия) // Отечественная геология. – 2020. – № 2. – С. 32–44.
9. EarthExplorer // USGS science for a changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 13.11.2023).
10. EO Browser // The European Space Agency. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения 13.11.2023).
11. Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГИИ, 2000. – 316 с.
12. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radiance-at-sensor» data // Remote Sensing of Environment. – 2005. – Vol. 99. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.

13. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill – Curnamona province of Australia / R.D. Hewson, T.J. Cudahy, S. Mizuhiko, K. Ueda, A.J. Mauger // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 99 (1). – P. 159–172. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
14. Gad S., Kusky T. Aster spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt // *Gondwana Research*. – 2007. – Vol. 11. – P. 326–335. DOI: 10.1016/j.gr.2006.02.010.
15. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data // *Ore Geology Reviews*. – 2010. – Vol. 38. – P. 59–69. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.007.
16. Azizi H., Tarverdi M.A., Akbarpour A. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran // *Advances in Space Research*. – 2010. – Vol. 46. – P. 99–109. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.014.
17. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Дистанционный прогноз кимберлитового магматизма. – М.: Триумф, 2017. – 312 с.
18. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – Vol. 108. – P. 54–72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
19. Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А. Прогнозно-поисковая модель эпitherмальных Au-Ag месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 84–92.
20. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud – Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran / L. Noori, A. Pour, G. Askari, N. Taghipour, B. Pradhan, C. Lee, M. Honarmand // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11 (5):495. DOI: 10.3390/rs11050495.
21. New insights into the Pulang porphyry copper deposit in Southwest China: indication of alteration minerals detected using ASTER and WorldView-3 Data / Q. Chen, Z. Zhao, J. Zhou, M. Zeng, J. Xia, T. Tao Sun, X. Zhao // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13:2798. DOI: 10.3390/rs11050495.
22. ASTER and GF-5 satellite data for mapping hydrothermal alteration minerals in the Longtoushan Pb-Zn deposit, SW China / Q. Chen, Z. Zhao, J. Zhou, R. Zhu, J. Xia, T. Sun, X. Zhao, J. Chao // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14:1253. DOI: 10.3390/rs14051253.
23. Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С., Гаврилов Р.Ю. Структурные, геофизические и геохимические критерии эпitherмального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 60–72.
24. Казанский В.И. Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46. – № 3. – С. 195–211.
25. Космоструктурная модель района Калгутинского редкометалльного месторождения (Горный Алтай) / А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, И.Ю. Анникова и др. // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 45–53.
26. Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г. Космоструктурные позиции золоторудных объектов Заангарской части Енисейского кряжа // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 38–47.

Информация об авторах

Александр Васильевич Ярчук, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; участковый геолог службы минеральных ресурсов ООО «НерюнгриМеталлик», Россия, 678976, г. Нерюнгри (Хани), ул. 70 лет Октября, 3. avy29@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7226-5321>

Юрий Сергеевич Ананьев, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Поступила в редакцию: 21.11.2023

Поступила после рецензирования: 06.03.2025

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Popov N.V., Shaporina M.N., Amuzinsky V.A., Smelov A.P., Zedgenizov A.N. Metallogeny of gold in the Aldan region. *Geology and Geophysics*, 1999, vol. 40, no. 5, pp. 716–728. (In Russ.)
2. *State geological map of the Russian Federation, scale 1: 1,000,000 (third generation). AldanoZabaikalskaya series. Sheet O-50 – Bodaibo. Explanatory note*. St Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2010. 612 p. (In Russ.)
3. Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kukushkin K.A., Kozlov D.S., Shatova N.V. Gold mining areas and nodes of the Aldan-Stanovoy metallogenic province. *Metallogeniya*, 2017, no. 71, pp. 93–111. (In Russ.)
4. Kukushkin K.A., Terekhov A.V., Molchanov A.V., Kozlov D.S., Solovyov O.L., Titov D.Yu., Khorokhorina E.I. Geological structure and ore content of Oldongsinskaya and Uguiskaya graben-synclines. *Regional geology and metallogeny*, 2017, no. 72, pp. 91–102. (In Russ.)
5. Kukushkin K.A., Terekhov A.V., Molchanov A.V., Kozlov D.S., Solovyov O.L., Titov D.Yu., Khorokhorina E.I. Geology and ore content of the Ugy and Oldongsin structures Charo-Olyokma block of the Aldan shield (based on materials from GDP-200). *Ores and metals*, 2018, no. 3, pp. 31–39. (In Russ.)

6. Sedenko S.V., Sedenko E.G. Low-temperature limonite-quartz-K-feldspar metasomatites - a new type of gold mineralization in the western part of the Aldan shield. *Domestic Geology*, 1994, no. 9, pp. 11–18. (In Russ.)
7. Dvurechenskaya S.S., Kryazhev S.G. Mineralogical and geochemical features of rocks and ores of the Tabornoe deposit, western part of the Aldan shield. *Ores and Metals*, 2005, no. 2, pp. 28–36. (In Russ.)
8. Zubkov Yu.A., Sagir A.V., Chvarova N.V. “Uguysky” type of large-volume gold ore deposits formed in the linear weathering crust (Southwestern Yakutia). *Domestic Geology*, 2020, no. 2, pp. 32–44. (In Russ.)
9. EarthExplorer. *USGS science for a changing world*. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 13 November 2023).
10. EO Browser. *The European Space Agency*. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (accessed 13 November 2023).
11. *Aerospace methods of geological research*. Ed. by A.V. Pertsova. St. Petersburg, St. Petersburg cart factory VSEGII Publ. house, 2000. 316 p. (In Russ.)
12. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared «radianceat-sensor» data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99, pp. 127–139. DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.009.
13. Hewson R.D., Cudahy T.J., Mizuhiko S., Ueda K., Mauger A.J. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill – Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 99 (1), pp. 159–172. DOI: 10.1016/j.rse.2005.04.025.
14. Gad S., Kusky T. Aster spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt. *Gondwana Research*, 2007, vol. 11, pp. 326–335. DOI: 10.1016/j.gr.2006.02.010.
15. Gabr S., Ghulam A., Kusky T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 2010, vol. 38, pp. 59–69. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.007.
16. Azizi H., Tarverdi M.A., Akbarpour A. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research*, 2010, vol. 46, pp. 99–109. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.014.
17. Serokurov Yu.N., Kalmykov V.D., Zuev V.M. *Remote forecast of kimberlite magmatism*. Moscow, Triumph Publ., 2017. 312 p. (In Russ.)
18. Ninomiya Y., Fu B. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 108, pp. 54–72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
19. Ananyev Yu.S., Zhitkov V.G., Potseluev A.A. Forecasting and prospecting model of epithermal high sulfidation Au-Ag deposits using modern satellite data (on the example of ore field Svetloe, Khabarovskiy Kray). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 84–92. (In Russ.)
20. Noori L., Pour A., Askari G., Taghipour N., Pradhan B., Lee C., Honarmand M. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud – Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (5):495. DOI: 10.3390/rs11050495.
21. Chen Q., Zhao Z., Zhou J., Zeng M., Xia J., Tao Sun T., Zhao X. New insights into the Pulang porphyry copper deposit in Southwest China: indication of alteration minerals detected using ASTER and WorldView-3 Data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13:2798. DOI: 10.3390/rs11050495.
22. Chen Q., Zhao Z., Zhou J., Zhu R., Xia J., Sun T., Zhao X., Chao J. ASTER and GF-5 Satellite data for mapping hydrothermal alteration minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit, SW China. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14:1253. DOI: 10.3390/rs14051253.
23. Lesnyak D.V., Ananyev Yu.S., Gavrilov R.Yu. Structural, geophysical and geochemical criteria for epithermal acid-sulfate gold mineralization using the example of the Svetloe ore field (Khabarovsk Territory). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 60–72. (In Russ.)
24. Kazansky V.I. Unique Central Aldan gold-uranium ore region (Russia). *Geology of ore deposits*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 195–211. (In Russ.)
25. Potseluev A.A., Ananyev Yu.S., Annikova I.Yu. Cosmostructural model of the Kalgutinsky rare metal deposit area (Altai Mountains). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 45–53. (In Russ.)
26. Ananyev Yu.S., Potseluev A.A., Zhitkov V.G. Cosmostructural positions of gold ore objects of the Trans-Angara part of the Yenisei Ridge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 38–47. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander V. Yarchuk, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Local Geologist, LLC «Neryungri-Metallik», 3, 70 let Oktyabrya street, Neryungri (Khani), 678976, Russian Federation; avy29@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7226-5321>

Yury S. Ananyev, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ananyevys@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0074-5980>

Received: 21.11.2023

Revised: 06.03.2025

Accepted: 19.03.2025

УДК 556.3(504.433; 626.811)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4684
Шифр специальности ВАК: 1.6.16, 1.6.21

Изотопный состав подземных вод территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья

Т.С. Папина✉, А.Н. Эйрих, Е.С. Орлова, И.Д. Рыбкина

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, г. Барнаул

✉ papina@iwep.ru

Аннотация. Актуальность. Генезис и особенности формирования подземных вод территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья вызывают большой интерес для разработки рекомендаций в целях устойчивого совместного использования почв и подземных вод. Исследования содержания стабильных изотопов (^2H и ^{18}O) в подземных водах и атмосферных осадках теплого и холодного периодов года, выпадающих в пределах Обь-Иртышского междуречья, помогают в понимании механизмов формирования подземного стока на данной территории. **Объекты.** Подземные воды активного водообмена преимущественно Кулундинской аллювиальной равнины – колодцы и скважины, а также атмосферные осадки, выпадающие на территории Обь-Иртышского междуречья. **Цель.** Оценка вклада атмосферных осадков холодного и теплого периодов года в сток подземных вод на территории Обь-Иртышского междуречья с использованием данных о содержании в их составе стабильных изотопов кислорода и водорода ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$). **Методы.** Анализ изотопного состава ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) подземных вод и атмосферных осадков выполнен в Химико-аналитическом центре Института водных и экологических проблем СО РАН методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i (WS-CRDS). **Результаты и выводы.** По результатам исследования содержания стабильных изотопов ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в подземных водах (2022–2023 гг.) и атмосферных осадках холодного и теплого периодов (2021–2023 гг.) проведена оценка сезонных вкладов атмосферных осадков в сток подземных вод на территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья. Было показано, что, несмотря на превалирование в этом регионе дождевых осадков над снеговыми (почти до двух раз), в зависимости от глубины залегания водоносных горизонтов, вклад талых снеговых вод в формирование их стока может составлять от 47 до 97 %.

Ключевые слова: стабильные изотопы, подземная вода, атмосферные осадки, подземный сток, Кулундинская равнина

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной тематики госбюджетных проектов Института водных и экологических проблем СО РАН № 0306-2021-0004 «Оценка сезонных особенностей атмосферного поступления и последующего распределения загрязняющих веществ на водосборной площади ключевых участков бассейна Оби в зависимости от природно-климатических условий» и № 0306-2021-0002 «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий».

Для цитирования: Изотопный состав подземных вод территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья / Т.С. Папина, А.Н. Эйрих, Е.С. Орлова, И.Д. Рыбкина // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 212–224. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4684

UDC 556.3(504.433; 626.811)
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4684

Isotopic composition of groundwater in the drainless area of the Ob-Irtysh interfluve

T.S. Papina✉, A.N. Eirikh, E.S. Orlova, I.D. Rybkina

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation

✉ papina@iwep.ru

Abstract. Relevance. Genesis and features of the groundwater formation in the drainage region of the Ob-Irtysh interfluvium are of great interest for the development of recommendations for the sustainable joint use of soils and groundwater. Contents of the stable isotopes (^2H and ^{18}O) in groundwater and precipitation falling within the Ob-Irtysh interfluvium during the warm and cold periods of the year help to understand the mechanisms of formation of underground runoff in this area. **Objects.** Ground and underground waters mainly of the Kulunda alluvial plain – wells and boreholes, atmospheric precipitation falling on the territory of the Ob-Irtysh interfluvium. **Aim.** To assess the contribution of atmospheric precipitation of the cold and warm periods of the year to the runoff of groundwater in the territory of the Ob-Irtysh interfluvium using the data of the water stable isotopes of oxygen and hydrogen ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$). **Methods.** The analysis of the isotopic composition (δD and $\delta^{18}\text{O}$) of water and atmospheric precipitation was carried out at the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS using laser absorption IR spectrometry at PICARRO L2130-i (WS-CRDS). **Results and conclusions.** The assessment of the seasonal contributions of atmospheric precipitation to groundwater flow in the drainage region of the Ob-Irtysh interfluvium was carried out based on the stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) composition of groundwater and precipitation of the cold and warm periods. It was shown that, despite the prevalence of rainfalls over snowfalls in this region (almost up to 2 times), depending on the depth of the aquifers, the melted snow water contribution to the formation of their runoff can range from 47 to 97%.

Keywords: stable water isotopes, groundwater, precipitation, groundwater flow, Kulunda Plain

Acknowledgements: This research was carried out within the framework of the state task of the IWEP SB RAS No. 0306-2021-0004 "Assessment of seasonal features of atmospheric input and subsequent distribution of pollutants in the catchment area of key areas of the Ob basin depending on natural and climatic conditions" and No. 0306-2021-0002 "Study of the mechanisms of natural and anthropogenic changes in the quantity and quality of water resources in Siberia using hydrological models and information technologies".

For citation: Papina T.S., Eirikh A.N., Orlova E.S., Rybkina I.D. Isotopic composition of groundwater in the drainless area of the Ob-Irtysh interfluvium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 212–224. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4684

Введение

Использование изотопных методов при наблюдении за движением воды на протяжении всего гидрологического цикла – испарения, выпадения в виде осадков, инфильтрации, стока, эвапотранспирации и возвращения в океан или атмосферу – который затем повторяется, помогает лучше понимать гидрологическое функционирование водосборных бассейнов. Широкое применение данных изотопного состава, а именно стабильных изотопов ^2H (D) и ^{18}O водяного пара и атмосферных осадков, связанных с гидрогеохимическими данными, помогает не только изучать гидрологическое функционирование водосборных бассейнов [1–7], но и планировать организацию на их территории безопасного водоснабжения, включая выявление потенциальных областей пополнения запасов подземных вод [1–3, 6, 8]. При этом по данным МАГАТЭ именно подземные воды являются наименее изученным компонентом глобального гидрологического цикла [9].

В последние десятилетия анализ изотопных соотношений $^2\text{H}/^1\text{H}$ ($\delta^2\text{H}$ или δD) и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) стал широко применяться в исследованиях генезиса и динамики подземных вод [10–15], а также процессов взаимодействия подземных вод с вмещающими горными породами [16–18].

Питание подземных вод активного водообмена преимущественно осуществляется инфильтрацией атмосферных осадков. По мнению авторов [19] осадки, попав в водоносный горизонт, значительно

лучше сохраняют свой исходный изотопный состав относительно осадков, пополнявших поверхностные воды, а обновления подземной водоносной системы связано с подземной циркуляцией и контролируется геологическими структурами. Миграционные процессы и перемешивание подземных вод в водоносных горизонтах, где вода просачивается через трещины от верхних до нижних пластов бассейна, рассмотрены во многих исследованиях [15, 20–23]. Изучение генетической связи между подземными водами и атмосферными осадками, выпадающими на поверхность изучаемой территории, является важной составляющей при разработке рекомендаций устойчивого совместного использования почв и грунтовых (подземных) вод в регионах с постоянно растущими потребностями в землепользовании. К таким регионам относится территория Обь-Иртышского междуречья. В условиях изменения климата здесь усиливаются процессы опустынивания, уменьшается количество выпадающих осадков, увеличивается среднегодовая температура воздуха и, соответственно, уменьшается поверхностный сток и инфильтрация. В такой ситуации подземные воды выступают основным водоисточником, а понимание процессов, связанных с гидродинамическим режимом, является одним из ключевых.

В настоящей работе по содержанию стабильных изотопов кислорода и водорода ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) в воде подземных источников и атмосферных осадков Обь-Иртышского междуречья выполнена оценка

раздельного вклада атмосферных осадков холодного и теплого периодов года в водный подземный сток изучаемой территории.

Объекты и методика исследования

Территория исследования расположена на юго-восточной окраине Западно-Сибирского артезианского бассейна, являющегося одним из крупнейших бассейнов мира. По гидрогеологическому районированию бессточная область Обь-Иртышского междуречья приурочена к Иртыш-Обскому артезианскому бассейну II порядка и относится к провинции с устойчивым сезонным промерзанием зоны аэрации, где основное питание грунтовых вод осуществляется в весенний период за счет снеготаяния [24, 25].

Климат изучаемой территории характеризуется умеренной континентальностью и формируется под воздействием преимущественно антициклонального типа циркуляции воздушных масс. Зима малооблачная, холодная, с сильными ветрами и метелями, лето жаркое и сухое. Ветреная погода наблюдается более 200 дней в году преимущественно весной и осенью, преобладают ветра юго-западного направления – их среднегодовая скорость составляет 3,0–3,5 м/с. Средние за год температуры положительные: 0,3–0,5 °С. Средняя температура июля +19 °С, января –18 °С. Снежный покров устанавливается чаще всего к моменту понижения средней суточной температуры воздуха до –5 °С и имеет зависимость от местных погодных условий. Высота снежного покрова в среднем составляет 20 см [26, 27]. Среднегодовая сумма осадков изменяется в диапазоне от 250 до 400 мм. Наименьшее количество осадков наблюдается по западной части бессточной области [28].

В строении бассейна выделяются два структурных яруса. Нижний приурочен к складчатому палеозойскому фундаменту, воды которого залегают на больших глубинах и практического интереса не представляют. Верхний ярус – эпипалеозойский чехол, содержащий преимущественно напорные и безнапорные пластово-поровые воды в рыхлых слабоуплотнённых осадках кайнозоя и мезозоя. Мощность чехла может достигать 800–1000 м. В разрезе верхнего яруса выделяется до 20 водоносных горизонтов, часть из которых объединены в шесть основных перспективных комплексов. Вертикальный разрез Иртыш-Обского бассейна представляет собой переслаивание обводнённых песчано-гравийных слоёв с водоупорными отложениями. Отдельные участки рассматриваемой территории существенно различаются глубинами залегания подземных вод, степенью их минерализации, водообильностью горизонтов, естественными и эксплуатационными ресурсами. Водовмещающими отло-

жениями являются пески, супеси, суглинки. Глубина залегания уровня грунтовых вод (первого от поверхности водоносного горизонта) обычно находится в пределах 5–10 м, на некоторых участках может достигать 80–100 м и более [29].

В 2022 и 2023 гг. в ходе экспедиционных работ на территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья проведен отбор проб подземной воды в колодцах и скважинах, локация которых представлена на рис. 1, краткая характеристика типа водоисточника и глубины его залегания приведена в табл. 1. Отобранные пробы воды помещали в плотно закрывающиеся емкости объемом 50 мл и в кратчайшие сроки в охлажденном виде доставляли в лабораторию для анализа.

Пробы вод 5, 12 и 16 (табл. 1) приурочены к верхнечетвертичным (аллювиальным) отложениям касмалинской свиты, формирующимся в поймах рек и долинах озер. Водообильность отложений очень низкая, горизонт тесно связан с поверхностными водами рек, озер и болот, являющихся одним из источников их питания в весеннее время и тем самым влияющих на формирование минерализации и химического состава грунтовых вод. Глубина залегания кровли водоносного комплекса зависит от гипсометрического положения водозабора [30].

Пробы вод 1, 3, 6, 14, 15 приурочены к нижне-средне-четвертичным отложениям красnodубровской свиты. Подземные воды безнапорные, имеют спорадическое распространение и приурочены обычно к линзам и горизонтам песков и супесей в толще лессовидных суглинков. Общая мощность отложений свиты может достигать 120 м, максимальные глубины залегания характерны для наиболее высоких гипсометрических отметок поверхности. Мощности водоносных песков изменяются от 1,5 до 30 м, преобладающими являются 4–9 м. Водопроницаемость пород невысокая. Общее направление стока подземных вод западное, в сторону Кулундинской впадины. Питание подземных вод местное, за счет инфильтрации атмосферных осадков, возможно подпитывание водами нижележащих водоносных горизонтов. Местная разгрузка подземных вод происходит в долинах рек и оврагов [30].

Проба воды 8 относится к верхнеплиоценовым отложениям кочковской свиты. Горизонт имеет повсеместное распространение в пределах степного Алтая, исключая площадь Кулундинской аллювиальной равнины, но на поверхность выходит только в виде небольших контуров, вытянутых по границе равнины. Максимальные глубины залегания приурочены к водораздельным пространствам Приобского плато, минимальные – к долинам рек. Преобладают глубины установившихся уровней 5–25 м. Водообильность отложений пестрая, зависит от

местных условий залегания. Водопроницаемость пород высокая. Питание водоносного горизонта происходит за счет притока вод со стороны горного обрамления, взаимосвязи с водами выше и ниже-лежащих горизонтов и инфильтрации атмосферных осадков [30].

Проба воды 13 приурочена к среднечетвертичным отложениям кулундинской свиты, широко развитым в пределах Кулундинской аллювиальной равнины. Глубина залегания изменяется от 3 до 43 м, мощность водосодержащей толщи в основном колеблется в пределах 3–25 м. Водообильность отложений высокая. Общее направление стока подземных вод западное, разгрузка приурочена к впадинам озер. Питание осуществляется в основном инфильтрацией атмосферных осадков, вод поверхностных водотоков и, в меньшей степени, за счет подтока подземных вод из нижележащих напорных горизонтов [30, 31].

Пробы 2, 9, 10 приурочены к верхнемиоцен-нижнеплиоценовым отложениям павлодарской свиты неогенового водоносного комплекса. Глуби-

на залегания колеблется в широком диапазоне от 12 до 270 м: наименьшие характерны для Кулундинской равнины (проба 9), наибольшие – для Приобского плато (проба 10). Водовмещающие породы представлены серыми песками. В кровле водоносный горизонт перекрыт однообразными серыми глинами с прослоями песков общей мощностью 7 м. Нижним водупором горизонта также служат однообразные глины павлодарской свиты, вскрытой мощностью 5 м. Подземные воды напорные, водообильность высокая [30, 32, 33].

Проба 7 отобрана из водоносного горизонта средне-верхнемиоценовых отложений таволжанской свиты неогенового водоносного комплекса. Вскрывается в интервале 140–158 м. Воды напорные [34]. Характерной чертой режима подземных вод неогеновых отложений является его относительное постоянство во времени. Прямой связи с метеорологическими условиями не отмечается. Но взаимосвязь вод неогена с водами выше- и ниже-лежащих комплексов наблюдается на многих участках [30, 35].

Таблица 1. Нумерация и характеристика подземных водоисточников на территории Обь-Иртышского междуречья

Table 1. Numbering and characteristics of the underground water sources in the Ob-Irtysh interfluvium

№ пробы на карте Samples on the map	Населенный пункт Location	Район Area	Водоисточник Water source	Глубина до водной поверхности, м Depth to water surface, m
1	Мамонтово Mamontovo	Новичихинский Novichikhinsky	колодезь well	3,4
2	Токарево Tokarevo	Новичихинский Novichikhinsky	инд. скважина individual borehole	18
3	Токарево Tokarevo	Новичихинский Novichikhinsky	колодезь well	3,8
4	Новоергоровское Novoerogoryevskoe	Егорьевский Egoryevsky	скважина borehole	202
5	Новосоветский Novosovetsky	Егорьевский Egoryevsky	колодезь well	0,3
6	Новокормиха Novokormikha	Волчихинский Volchikhinsky	колодезь well	1,8
7	Ярославцев-Лог Yaroslavtsev-Log	Родинский Rodinsky	скважина borehole	158
8	Новотроицк Novotroitsk	Солтонский Soltonsky	колодезь well	5,2
9	Самбор Sambor	Табунский Tabunsky	скважина borehole	40
10	Асямовка Asyamovka	Бурлинский Burlinsky	колодезь well	12
11	Михайловка Mikhailovka	Бурлинский Burlinsky	скважина borehole	710
12	Устьянка Ustyanka	Бурлинский Burlinsky	колодезь well	5,2
13	Волчий-Ракит Volchiy-Rakit	Бурлинский Burlinsky	колодезь well	3,2
14	Верх-Пайва Verkh-Paiva	Баевский Baevsky	колодезь well	5,9
15	Гришинское Grishinskoe	Мамонтовский Mamontovsky	колодезь well	6,1
16	Бор-Форпост Bor-Forpost	Волчихинский Volchikhinsky	колодезь well	2,3
17	Бурла Burla	Бурлинский Burlinsky	скважина borehole	791

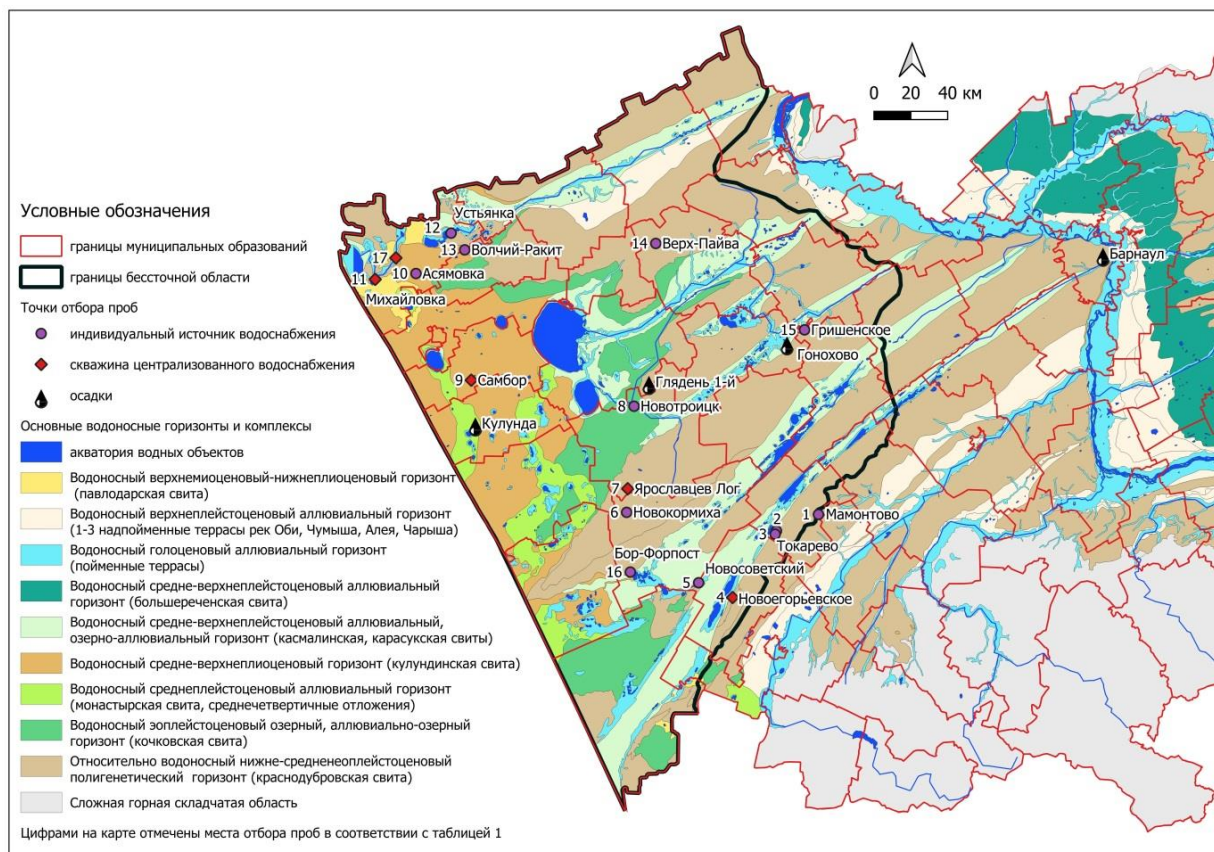


Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов наблюдений в соответствии с Гидрогеологической картой [40]
Fig. 1. Map-scheme of the location of observation points in accordance with the Hydrogeological map [40]

Проба 4 отобрана из водоносного горизонта верхнеолигоцен-нижнемиоценовых отложений знаменской свиты, залегающего в интервале 162–202 м. Свита широко распространена в степных районах Алтайского края. Пьезометрическая поверхность всего горизонта плавно снижается к долине р. Оби, а в общем плане – в сторону Кулундинской равнины. Питание подземных вод происходит за счет подтока со стороны горных сооружений и взаимосвязи с водами ниже- и вышележащих горизонтов. Режим относительно стабилен [30, 36].

Пробы 11, 17 были отобраны из скважин, вскрывающих верхнемеловые отложения ипатовской и покурской свит, соответственно. Свиты залегают в интервале 710–791 м. Подземные воды высоконапорные, самоизливающиеся, водообильность неравномерная. Питание происходит за счет перелива из вышележащих водоносных горизонтов и частичного подпитывания из зон разлома палеозойского фундамента [30, 37, 38].

Пробы атмосферных осадков (дождь, снег) отбирали непосредственно после их выпадения в пункте отбора осадков, расположенном в г. Барнауле на крыше здания Института водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН), на высоте 25 м от поверхности земли. Снеговые про-

бы отбирали в съемный плотный полиэтиленовый мешок, закрепленный во входном отверстии бочки, оснащенной защитой от выдувания. В лабораторных условиях снеговые пробы таяли при комнатной температуре в плотно закрытых специально подготовленных контейнерах [39]. Дождевые осадки собирали через большую пластиковую воронку в полиэтиленовую емкость с узким горлом, чтобы снизить возможность нежелательного испарения во время выпадения осадков.

Пробы подземных вод после доставки в лабораторию, пробы дождя после отбора, а талой снеговой воды после таяния сразу фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм, из фильтрата отбирали 3–5 параллельных проб и помещали их в герметичные пробирки, которые до начала изотопного анализа хранили в холодильнике. Всего за период работы было отобрано 185 проб атмосферных осадков и 32 пробы подземных вод.

Методы исследования

Определение изотопного (δD и $\delta^{18}O$) состава подземных вод и атмосферных осадков проводили в Химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i (WS-

CRDS). Точность измерения δD и $\delta^{18}O$ (1σ , $n=5$) составила $\pm 0,4$ и $\pm 0,1$ ‰, соответственно. Для калибровки прибора использовали Международные стандарты GRESP, USGS-47.

Согласно теоретическим основам положения изотопной систематики дейтерия и кислорода-18, разработанным в работах [41, 42], проводится измерение отношения $^2H/^1H$ (δD) и $^{18}O/^{16}O$ ($\delta^{18}O$) в исследуемой пробе относительно стандарта VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

$$\delta^{18}O(\delta D) = [(R_{пр}/R_{станд}) - 1] \times 1000\text{‰}, \quad (1)$$

где $R_{пр}$ и $R_{станд}$ – отношения $^2H/^1H$ или $^{18}O/^{16}O$ в измеряемой пробе и в стандарте.

В гидрохимических исследованиях наряду с измеряемыми параметрами изотопного состава воды широко используют расчетный критерий – дейтериевый эксцесс (d_{exc}), предложенный в [42], который рассчитывается как:

$$d_{exc} = \delta D - 8 \times \delta^{18}O. \quad (2)$$

Параметр d_{exc} связан с кинетическими процессами изотопного фракционирования, которые характеризуют процессы испарения или замерзания исходного изотопного состава воды.

Для расчёта средневзвешенных сезонных значений δD , $\delta^{18}O$ и d_{exc} в атмосферных осадках использовали формулу:

$$X = \Sigma(X_i A_i) / A, \quad (3)$$

где X – средневзвешенное значение δD , $\delta^{18}O$ или d_{exc} ; X_i – значение δD , $\delta^{18}O$ или d_{exc} в снеге (дожде) i -го снегопада (дождя); A_i – количество осадков в i -м снегопаде (дожде), мм в.э.; A – общее за сезон количество осадков, мм в.э.

Для оценки отдельного вклада зимних и летних атмосферных осадков в формирование подземных вод на разных глубинах Обь-Иртышского междуречья было использовано следующее уравнение [7]:

$$a \cdot X + b \cdot (1 - X) = c, \quad (4)$$

где X – доля вклада зимних и $(1-X)$ – доля вклада летних атмосферных осадков в подземный сток; a , b – средневзвешенное значение $\delta^{18}O$ в атмосферных осадках соответственно холодного и теплого периодов года, ‰; c – среднее значение за 2022–2023 гг. $\delta^{18}O$ в воде изучаемого водоносного горизонта, ‰.

Среднеквадратичную ошибку средневзвешенного значения рассчитывали согласно [43] по формуле:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\Sigma A_i (x_i - \bar{x})^2}{(A-1) \Sigma A_i}}, \quad (5)$$

где A_i – количество осадков в i -м единичном атмосферном выпадении, мм в.э.; x_i – изотопный состав (δD , $\delta^{18}O$ и d_{exc}) осадков в i -м единичном атмосфер-

ном выпадении, ‰; $\bar{x}$ – средневзвешенное значение за изучаемый сезон (интервал времени), ‰; A – общее количество осадков за сезон (интервал времени), мм в.э.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки вклада атмосферных осадков тепло- и холодного сезона в формирование подземного стока Кулундинской равнины использовали значения средневзвешенного изотопного состава дождевых (с апреля по октябрь) и снеговых (с ноября по март) осадков (расчет выполнен с помощью уравнений (1), (3), отобранных на экспериментальной площадке ИВЭП СО РАН (г. Барнаул). Эта экспериментальная площадка находится в 180–420 км от мест отбора проб подземных вод (рис. 1) и является ближайшим для изучаемой территории пунктом отбора и анализа проб атмосферных осадков на содержание в них стабильных изотопов $\delta^{18}O$ и δD . Размах варьирования изотопного состава проб атмосферных осадков, отобранных на экспериментальной площадке ИВЭП СО РАН, и их средневзвешенные значения приведены в табл. 2.

На наш взгляд, данные изотопного состава атмосферных осадков, отобранных на экспериментальной площадке ИВЭП СО РАН в 2021–2023 гг., можно использовать для оценки отдельного вклада атмосферных осадков тепло- и холодного периодов в подземный сток Кулундинской равнины по следующим причинам:

- 1) Известно, что изотопный состав атмосферных осадков, выпадающих на подстилающую поверхность, зависит как от температуры испарения атмосферной влаги из источника ее эмиссии, так и от температуры приземного слоя атмосферы в момент формирования осадков из водяного пара. По данным ледникового керна г. Белуха [44], ледовые слои которого формировались преимущественно за счет летних атмосферных осадков, утяжеление изотопного состава слоев за период 1800–2000 гг. составляло около 1,5 ‰. Если предположить, что глобальное потепление на юге Западной Сибири за последние 200 лет происходит как в теплое, так и в холодное время года, а водообмен изучаемых подземных вод происходит в пределах двух сотен лет, то вполне оправдано при расчете вкладов атмосферных осадков тепло- и холодного периодов в формуле (4) использовать изотопные данные осадков 2021–2023 гг.
- 2) Рельеф местности от пунктов отбора проб подземных вод до г. Барнаула является типично равнинным и аэрографические барьеры на нем практически полностью отсутствуют, что определяет классическое изменение изотопного со-

става влагонесущих воздушных масс при их продвижении на этом участке пути.

- 3) Отмечаемый GNIP (Global Net of Isotopic Precipitation) широтный и долготный градиент изменения изотопного состава осадков [45] при преимущественном продвижении влагонесущих воздушных масс с запада на восток будет проявляться в близкой степени как для снеговых, так и для дождевых выпадений.

Средневзвешенные значения изотопного состава осадков в теплый период 2022 и 2023 гг. были близки между собой и варьировали по $\delta^{18}\text{O}$ в пределах 1,1 ‰, а в холодный период 2021–2022 и 2022–2023 гг. – в пределах 0,5 ‰ (табл. 3). В то же время средневзвешенные значения изотопного состава зимних и летних осадков значительно различались между собой до 7,6 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и до 57,9 ‰ по δD . Значения дейтериевого эксцесса, рассчитанные по уравнению (2) (табл. 2), показывают, что максимальное истощение

воды атомами дейтерия (δD) относительно $\delta^{18}\text{O}$ приходится на летние атмосферные осадки (d_{exc} для средневзвешенных сезонных значений составлял 1,7–1,8 ‰), а минимальное истощение – для зимних осадков ($d_{\text{exc}}=4,0–5,0$ ‰).

Исследование подземной воды на территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья показало, что в 2022–2023 гг. ее изотопный состав варьировал в небольших пределах от –18,5 до –14,1 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от –143,6 до –112,7 ‰ по δD , в то время как изотопный состав проб атмосферных осадков в эти годы изменялся в широких пределах (табл. 3). Сравнение средних величин изотопного состава подземной воды и средневзвешенных годовых величин изотопного состава атмосферных осадков указывает на их близкие значения, как между собой, так между годами (табл. 3), что может свидетельствовать о метеорном генезисе подземных вод на территории Кулундинской равнины.

Таблица 2. Изотопный состав атмосферных осадков теплого периода (дождь) за апрель–октябрь 2022–2023 гг. и холодного (снег) с ноября 2021 г. по март 2023 г.

Table 2. Isotopic composition of atmospheric precipitation in the warm period (rain) for April–October 2022–2023 and cold period (snow) from November 2021 to March 2023

год year	δ ¹⁸ O, ‰				δD, ‰				dexc, ‰				n	Q
	среднее mean	max	min	σ _X	среднее mean	max	min	σ _X	среднее mean	max	min	σ _X		
Теплый период/Warm period														
2022	-10,7	4,2	-25,1	0,6	-83,9	20,2	-191,3	4,4	1,8	12,1	-32,5	0,7	56	156
2023	-11,8	-1,8	-22,3	0,6	-92,9	-28,7	-176,0	4,4	1,7	11,2	-26,5	0,8	64	233
2022/23	-11,3	1,2	-23,7	0,6	-88,4	-4,3	-183,7	4,4	1,8	11,7	-15,9	0,8	120	389
Холодный период/Cold period														
2021/22	-18,3	-12	-30,8	0,7	-141,8	-89,1	-245,7	5,9	5,0	12,2	-8,6	0,7	37	88
2022/23	-18,8	-11,5	-31,0	0,9	-146,2	-82,1	-252,8	7,4	4,0	11,1	-12,9	1,1	28	63
2021/23	-18,6	-11,8	-30,9	0,8	-144,0	-85,6	-249,3	6,7	4,5	11,7	-10,8	0,9	65	152

Среднее – средневзвешенное по количеству осадков; σ_X – среднеквадратичная ошибка средневзвешенного значения; n – количество отобранных проб; Q – среднее значение количества осадков, мм, по данным 11 метеостанций Кулундинской равнины [28].

Mean – weighted average of precipitation; σ_X – root mean square error of the weighted average; n – number of samples; Q – average value of precipitation, mm, according to the data from 11 weather stations of the Kulunda Plain [28].

Таблица 3. Диапазон варьирования и средние значения изотопного состава подземной воды Кулундинской равнины в 2022–2023 гг. и атмосферных осадков с ноября 2021 г. по ноябрь 2023 г.

Table 3. Range and average values of the isotopic composition of groundwater in the Kulunda Plain in 2022–2023, and atmospheric precipitation from November 2021 to November 2023

год year	$\delta^{18}\text{O}$, ‰				δD , ‰				dexс, ‰				n
	среднее mean	max	min	U	среднее mean	max	min	U*	среднее mean	max	min	U	
Подземная вода/Groundwater													
2022	-16,4	-14,1	-18,3	0,8	-128,8	-114,6	-143,6	5,5	2,4	8,3	-2,5	1,5	15
2023	-16,0	-14	-18,5	0,8	-126,8	-112,7	-143,6	5,6	1,0	4,9	-2,6	1,1	17
Атмосферные осадки/Atmospheric precipitation*													
2021/22	-16,1	4,2	-30,8	0,4	-125,5	20,2	-245,7	2,8	3,5	12,2	-32,5	0,3	93
2022/23	-15,9	-1,8	-31	0,3	-124,8	-28,7	-252,8	2,7	2,8	11,2	-26,5	0,3	92

U – ошибка среднего значения (для подземной воды указан доверительный интервал среднего значения; для атмосферных осадков – среднеквадратичная ошибка средневзвешенного значения); n – количество отобранных проб; * – для атмосферных осадков приведены средневзвешенные (по количеству осадков) значения за год.

U – error of the average value (confidence interval of the average – for groundwater; root mean square error of the weighted average – for precipitation); n – number of samples; * – annual weighted (based on precipitation) average values.

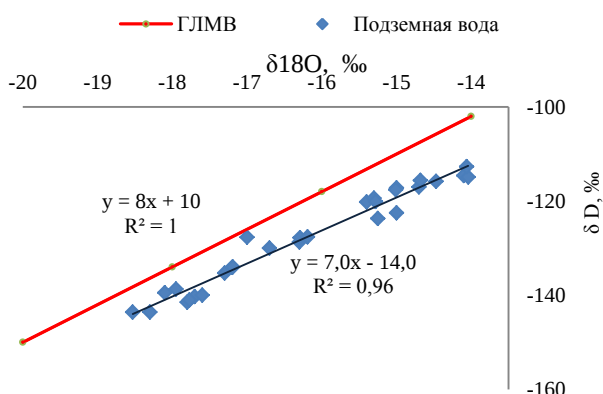


Рис. 2. Зависимость $\delta^{18}\text{O}$ – δD в подземных водах Обь-Иртышского междуречья (ЛЛПВ) в 2022–2023 гг.

Fig. 2. Local groundwater line for 2022–2023 (blue) and global meteoric water line (GMWL) (red)

Для оценки влияния процессов фракционирования на исходный состав атмосферной влаги, формирующей состав подземных вод Обь-Иртышского междуречья, проведено сопоставление соотношений изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD)

подземных вод с эмпирической зависимостью, получившей название глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ) [41, 46]. На рис. 2 представлена построенная по данным изотопного состава изучаемых водных проб локальная линия подземных вод (ЛЛПВ), которая описывается уравнением $\delta\text{D}=7,0*\delta^{18}\text{O}-14,0$. Уменьшение наклона ЛЛПВ относительно ГЛМВ (рис. 2) и также низкие значения дейтериевого эксцесса (d_{excs} , табл. 3) указывают на изменение исходного изотопного состава поступающей влаги вследствие испарительного фракционирования.

В табл. 4 приведены значения изотопного состава подземных вод, систематизированные в соответствии с возрастом водовмещающих отложений. В таблице также представлены результаты расчета значений вкладов атмосферных осадков теплого и холодного периодов в формирование подземного стока. Расчеты были выполнены по формуле (4) при использовании данных изотопного состава подземных вод, приведенных в данной таблице, и средне-взвешенных за два года значений $\delta^{18}\text{O}$ (или δD) в атмосферных осадках соответственно холодного и теплого периодов года, приведенных в табл. 3.

Таблица 4. Значения изотопного состава подземных вод, ранжированных по глубине и возрасту водоносного горизонта, а также вклад зимних (снег) и летних (дождь) атмосферных осадков в формирование подземного стока для изучаемых водоносных горизонтов Кулундинской равнины

Table 4. Values of the isotopic composition of groundwater, ranked by depth and age of the aquifer, as well as the contribution of winter (snow) and summer (rain) precipitation to the formation of groundwater flow for the studied aquifers of the Kulunda Plain

Водоносный комплекс Aquifer complex [32]	Наименование водоносного горизонта (свиты) Aquifer name (suite)	*Шифр пробы Sample code	Глубина, м Depth, m	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{excs} , ‰	Вклад Contribution, %	
							дождь rain	снег snow
Неоген-четвертичный Neogene-Quaternary	Касмалинская Kasmalinskaya	5, 12, 16	0,3–5,2	–14,7	–118,3	–0,8	53	47
	Краснодубровская Krasnodubrovskaya	1, 3, 6, 14, 15	1,8–6,1	–15,3	–121,2	1,1	44	56
	Кочковская Kochkovskaya	8	5,2	–15,3	–120,2	2,6	44	56
	Кулундинская Kulundinskaya	13	3,2	–17,8	–135,7	6,5	11	89
Неогеновый Neogene	Павлодарская Pavlodar	2, 9, 10	12–40	–17,5	–136,3	4,1	14	86
	Таволжанская Tavolzhanskaya	7	158	–17,8	–141,3	1,0	10	90
Верхнеолигоценовый–нижнемиоценовый Upper Oligocene–Lower Miocene	Знаменская Znamenskaya	4	202	–18,3	–143,6	2,8	3	97
Верхнемеловой Upper Cretaceous	Ипатовская Ipatovskaya	11	710	–17,7	–140,2	1,1	12	88
	Покурская Pokurskaya	17	791	–17,8	–139,9	2,5	10	90

*– шифр проб указан согласно табл. 1; для касмалинской, краснодубровской и павлодарской свит приведены средние значения приуроченных к ним проб, стандартные отклонения средних значений варьировали в интервале 0,1–0,6 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,1–3,1 ‰ для δD .

*– sample code is indicated according to Table 1; for the Kasmalinskaya, Krasnodubrovskaya and Pavlodar formations, the average sample values are given; the standard deviations of the average values varied in the range of 0.1–0.6 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and 0.1–3.1 ‰ for δD .

Анализ данных табл. 4 показывает, что воды более молодых неглубоких водоносных горизонтов, относящихся к неоген-четвертичному комплексу, за исключением пробы № 13 (водоносный горизонт кулундинской свиты), имеют максимально утяжеленный изотопный состав, который изменяется в пределах от $-14,7$ до $-15,3$ ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $-118,3$ до $-120,2$ ‰ по δD . Рассчитанные по уравнению (4) вклады талых снеговых и дождевых вод в формирование подземного стока этих горизонтов являются практически равными (47–56 % – снеговой сток, 44–53 % – дождевой сток). Проба воды № 13 из неглубокого колодца водоносного горизонта кулундинской свиты выбивается из общей закономерности неоген-четвертичного комплекса и имеет необычно облегченный изотопный состав, по нашему мнению, вследствие природных особенностей местоположения колодца (в большей степени – положения в рельефе). Данная проба приурочена к участку с выровненной открытой местностью, имеющей блюдцеобразную вогнутую форму, в окружении озерных котловин со скудной растительностью. Это одна из самых крайних северо-западных точек отбора проб характеризуется тем, что в течение лета здесь наблюдаются высокие температуры воздуха и выпадает очень малое количество дождевых осадков, которые не задерживаются на поверхности, а зачастую и вовсе не достигают земной поверхности, а поэтому не достигают зеркала грунтовых вод. В связи с чем основным источником питания для водоносного горизонта пробы воды № 13 выступают талые снеговые воды.

Наиболее изотопически облегченный состав отмечается в подземных водах нижележащих горизонтов таволжанской, знаменской, ипатовской и покурской свит, относящихся к наиболее возрастным (неоген-палеогеновым и меловым) водоносным комплексам (табл. 4). Для данных водоносных горизонтов основным источником питания являются талые снеговые воды, вклад которых в формирование подземного стока составляет 86–97 %, а на дождевое питание приходится только от 3 до 14 %.

Рассчитанные значения дейтериевого эксцесса показывают, что максимальное истощение атомов дейтерия (δD) относительно $\delta^{18}\text{O}$ наблюдается в грунтовых водах самого верхнего водоносного горизонта ($-0,8$ ‰). Остальные водоносные горизонты в сравнении с атмосферными осадками холодного периода (табл. 3) также обеднены атомами дейтерия (δD) относительно $\delta^{18}\text{O}$, что связано с дополнительным испарительным фракционированием талого снегового стока при его движении через почво-грунты верхних горизонтов.

Таким образом, несмотря на то, что количество осадков, выпадающих на изучаемую территорию в холодный период года, составляет не более 35 % от

их годового количества (табл. 3), поступление талых снеговых вод за короткий период активного снеготаяния (~2-х недель) обеспечивает их более глубокое проникновение и попадание во все водоносные горизонты. В теплый период года широкое распределение осадков во времени и существенное их испарение приводит к тому, что значительно меньший процент летних осадков поступает в водоносные слои, особенно в нижних горизонтах. При этом пополнение молодых неглубоких водоносных горизонтов, относящихся к неоген-четвертичному комплексу, происходит в равной степени как за счет снеготаяния, так и за счет дождевых выпадений, в то время как более глубокие водоносные горизонты неоген-палеогенового комплекса на 86–97 % формируются за счет талых снеговых вод.

Заключение

Сравнительный анализ данных изотопного состава (δD , $\delta^{18}\text{O}$) подземных вод активного водообмена Кулундинского района и средневзвешенных значений атмосферных осадков (2021–2023 гг.), выпадающих на территории Обь-Иртышского междуречья, показал, что подземные воды изучаемого региона имеют метеорный генезис. Сопоставление наклона локальной линии подземных вод относительно глобальной линии метеорных вод, а также уменьшение значения дейтериевого эксцесса (d_{exc}) указывают на протекание процессов испарительного фракционирования исходной поступающей в составе осадков влаги, причем изотопный состав подземных вод занимает промежуточное положение между зимними и летними атмосферными осадками.

Показано, что воды более молодых неглубоких водоносных горизонтов Кулундинской равнины, относящихся к неоген-четвертичному комплексу, за исключением участков с особенностями положения в рельефе (например, водоносный горизонт кулундинской свиты), имеют максимально утяжеленный изотопный состав (от $-14,7$ до $-15,3$ ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $-118,3$ до $-121,2$ ‰ по δD), а вклады талых снеговых и дождевых вод в формирование их подземного стока являются практически равными. В это же время подземные воды возрастных неоген-палеогеновых и меловых водоносных комплексов (нижележащие горизонты таволжанской, знаменской, ипатовской и покурской свит) имеют изотопически облегченный состав от $-17,5$ до $-18,3$ ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от $-136,3$ до $-143,6$ ‰ по δD . Для данных водоносных горизонтов основным источником питания являются талые снеговые воды, вклад которых в формирование подземного стока достигает 86–97 %, а на дождевое питание приходится только от 3 до 14 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Isotope studies in large river basins: a new global research focus / J.J. Gibson, P. Aggarwal, J. Hogan et al. // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2002. – Vol. 83. – № 52. – P. 613–617.
2. Spatio-temporal variability of piezometric response on two steep alpine hillslopes / D. Penna, N. Mantese, L. Hopp, G.D. Fontana, M. Borga // *Hydrological Processes*. – 2015. – Vol. 29. – № 2. – P. 198–211. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.10140>.
3. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events / D. Penna, H.J. Meerveld, G. Zuecco, G.D. Fontana, M. Borga // *Journal of Hydrology*. – 2016. – Vol. 537. – P. 382–397.
4. Расчленение гидрографа реки Джанкуат, Центральный Кавказ, с помощью изотопных методов / Ю.К. Васильчук, Е.П. Рец, Ю.Н. Чижова, И.В. Токарев, Н.Л. Фролова, Н.А. Буданцева, М.Б. Киреева, Н.А. Лошакова // *Водные ресурсы*. – 2016. – Т. 43. – № 6. – С. 579–594.
5. Два подхода к расчёту расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов / Ю.Н. Чижова, Е.П. Рец, Ю.К. Васильчук, И.В. Токарев, Н.А. Буданцева, М.Б. Киреева // *Лёд и снег*. – 2016. – Т. 56. – № 2. – С. 161–168. DOI: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-161-168>.
6. The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: evidence from water stable isotopes / M. Feng, W. Zhang, S. Zhang, Z. Sun, Y. Li, Y. Huan, W. Wang, P. Qi, Y. Zou, M. Jiang // *Journal of Hydrology*. – 2022. – Vol. 604. – P. 127209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127209>.
7. Impact of snowmelt conditions on the isotopic composition of the surface waters of the Upper Ob River during the flood period / T. Papina, A. Eirikh, A. Kotovshchikov, T. Noskova // *Water*. – 2023. – Vol. 15 (11). – P. 2096. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15112096>.
8. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/4038>.
9. Ortega L., Gil L. Isotope hydrology: rev. / *Water Resources*. – 2019. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull60-1/6010405_ru.pdf (дата обращения 03.08.2023).
10. Abbott M.D., Lini A., Bierman P.R. $\delta^{18}\text{O}$, δD and ^3H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA // *Journal of Hydrology*. – 2000. – Vol. 228 (1–2). – P. 101–112.
11. Исследование подземных вод в отдельных районах Карелии изотопно-геохимическими методами / И.В. Токарев, Г.С. Бородулина, Е.П. Каюкова, В.А. Поляков, Ю.В. Варнакова, С.В. Жданов, Т.В. Маркова // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. – 2008. – № 2. – С. 25–36.
12. Constraining groundwater discharge in a large watershed: Integrated isotopic, hydraulic, and thermal data from the Canadian shield / T. Gleeson, K. Novakowski, P.G. Cook, T.K. Kyser // *Water resources research*. – 2009. – Vol. 45. – W08402. – P. 1–16. DOI: 10.1029/2008WR007622.
13. Лаврушин В.Ю., Лисенков А.Б., Айдаркожина А.С. Генезис Ессентукского месторождения углекислых вод (Северный Кавказ) // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 77–91.
14. Лепокурова О.Е., Дребот В.В. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) подземных вод территории Торейских озёр (Восточное Забайкалье) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 20–29.
15. ^{18}O , ^2H , and ^3H isotopic data for understanding groundwater recharge and circulation systems in crystalline rocks terrain of Southeastern Brazil / M.S.M. Oliveira, M.A. Neves, F.A. Caxito, R.M. Moreira // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 116. – P. 103794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103794>.
16. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
17. Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Рыжкова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 59–72.
18. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фаре, А.А. Хвашевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 57–72.
19. Clark I.D., Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology*. – Boca Raton: CRC Press, 1997. – 342 p.
20. Using stable isotopes and hydraulic head data to investigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock aquifer / T. Praamsma, K. Novakowski, K. Kyser, K. Hall // *Journal of Hydrology*. – 2009. – Vol. 366 (1–4). – P. 35–45.
21. Groundwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer / C. Roques, L. Aquilina, O. Bour, J.C. Maréchal, B. Dewandel, H. Pauwels, R. Hochreutener // *Journal of Hydrology*. – 2014. – Vol. 519. – P. 3110–3128.
22. Hydrogeochemical evolution and groundwater quality assessment in the Dake Lake Basin, Northwest China / M. Lyu, Z. Pang, T. Huang, L. Yin // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2019. – Vol. 320 (3). – P. 865–883. DOI: 10.1007/s10967-019-06515-8.
23. Iron-oxidizer hotspots formed by intermittent oxic–anoxic fluid mixing in fractured rocks / O. Bochet, L. Bethencourt, A. Dufresne, J. Farasin, M. Pédro, T. Labasque, T. Le Borgne // *Nature Geoscience*. – 2020. – Vol. 13 (2). – P. 149–155.
24. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень выпуск 18 / под ред. В.А. Лыготина. – Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
25. Анализ изменений уровней подземных вод четвертичных отложений юго-восточной части Иртыш-Обского артезианского бассейна / А.А. Балобаненко, Д.И. Васильев, Е.М. Дутова, К.И. Кузеванов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 7. – С. 202–213.
26. География Сибири в начале XXI века / В.М. Плюсин, Ю.И. Винокуров, Б.А. Краснаярова, И.В. Андреева, О.С. Андреева, И.Д. Ахмедова, Н.И. Юкина. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. – Т. 5. – 447 с.

27. Почвенно-климатические ресурсы Алтайского края: справочник / под ред. Н.С. Халина, И.В. Назаровой, В.А. Даммер. – Барнаул: Параграф, 2020. – 131 с.
28. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных. URL: <http://mete.ru/> (дата обращения 08.02.2024).
29. Карабицина Л.П., Дым Л.С. Информационный отчет о работах, проведенных на объекте 3.3 «Региональное гидрогеологическое и геоэкологическое изучение территории Алтайского края и Республики Алтай за 2001–2002 гг.». – Малоенисейское: АлтФ ФБУ «ТФГИ по СФО», 2002. – Т. 1–2. – 139 с.
30. Авдеева Ю.П., Соцкова Е.А. Гидрогеологическая карта СССР условий водоснабжения рассредоточенного населения в особый период масштаба 1:500000 Алтайского края. Каталог водопунктов (колодцы и родники). – Новокузнецк: Западно-Сибирское геологическое управление, 1972. – 156 с.
31. Кулундинский канал: ландшафтно-индикационная оценка природных условий в зоне влияния и прогноз их изменений / Ю.И. Винокуров, Ю.М. Цимбалей, В.И. Булатов, Т.А. Пудовкина и др. / под ред. В.В. Воробьева, Ю.И. Винокурова. – Иркутск: Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт географии, 1985. – 198 с.
32. Земскова И.М., Смоленцев Ю.К., Полканов М.П. Ресурсы пресных и маломинерализованных подземных вод южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна / под ред. Е.В. Пиннекера. – М.: Недра, 1991. – 262 с.
33. Учетная карточка буровой скважины № 7349. URL: <https://efgi.ru/object/14618400> (дата обращения 03.10.2023).
34. Учетная карточка буровой скважины № 6821. URL: <https://efgi.ru/object/15993337> (дата обращения 03.10.2023).
35. Кузнецова М.А., Постникова О.В. Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край. – М.: Недра, 1972. – 344 с.
36. Учетная карточка буровой скважины № 1014. URL: <https://efgi.ru/object/20632273> (дата обращения 03.10.2023).
37. Учетная карточка буровой скважины № 4764. URL: <https://efgi.ru/object/22192327> (дата обращения 08.02.2024).
38. Учетная карточка буровой скважины № 7904. URL: <https://efgi.ru/object/38054870> (дата обращения 03.10.2023).
39. Микроэлементный и изотопный состав снежного покрова Катунского природного биосферного заповедника (Республика Алтай) / Т.С. Папина, А.Н. Эйрих, Н.С. Малыгина, С.С. Эйрих, О.В. Останин, Т.В. Яшина // Лёд и Снег. – 2018. – Т. 58. – № 1. – С. 41–55.
40. Государственный мониторинг состояния недр территории Сибирского федерального округа (Алтайский край) в 2014–2015 гг. Отчет по договору № 5/2013 от 01.10.13 г. Гос. контракт № 7Ф-13 от 10.09.13 / В.В. Девятаева, М.Ф. Гареев, К.А. Выставкин и др. – Боровиха: ОАО Алтайская ГТЭ, 2015. – 226 с.
41. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – Vol. 133. – P. 1702–1703.
42. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – Vol. 16 (4). – P. 436–468.
43. Энциклопедия по машиностроению XXL. URL: <https://mash-xxl.info/page/020002005146222220186085022149189162081227171243/> (дата обращения 03.10.2023).
44. Temperature response in the Altai region lags solar forcing / A. Eichler, S. Olivier, K. Henderson, A. Laube, J. Beer, T. Papina, M. Schwikowski // Geophysical Research Letters. – 2009. – Vol. 36 (1). DOI: 10.1029/2008GL035930.
45. Gat J.R., Mook W.G., Meijer H.A. Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications // Atmospheric water / Ed. by W.G. Mook. – Vienna, Austria: UNESCO/IAEA Series, 2001. – Vol. 2. – P. 7–63.
46. Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // Climate change in continental isotopic records. – 1993. – Vol. 78. – P. 1–36.

Информация об авторах

Татьяна Савельевна Папина, доктор химических наук, начальник Химико-аналитического центра, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. papina@iwer.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8388-7289>

Алла Николаевна Эйрих, кандидат технических наук, научный сотрудник Химико-аналитического центра, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. alnik@iwer.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3033-2172>

Елена Сергеевна Орлова, младший научный сотрудник лаборатории водных ресурсов и водопользования, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. el.orlova11@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0650-4055>

Ирина Дмитриевна Рыбкина, доктор географических наук, доцент, заведующая лабораторией водных ресурсов и водопользования, ведущий научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. irina.rybkina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0081-9652>

Поступила в редакцию: 06.05.2024

Поступила после рецензирования: 13.05.2024

Принята к публикации: 31.01.2025

REFERENCES

1. Gibson J.J., Aggarwal P., Hogan J. Isotope studies in large river basins: a new global research focus. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2002, vol. 83, no. 52, pp. 613–617.
2. Penna D., Mantese N., Hopp L., Dalla Fontana G., Borga M. Spatio-temporal variability of piezometric response on two steep alpine hillslopes. *Hydrological Processes*, 2015, vol. 29, no. 2, pp. 198–211. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.10140>.

3. Penna D., Meerveld H.J., Zuecco G., Fontana G.D., Borga M. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 537, pp. 382–397.
4. Vasilchuk Y.K., Rets E.P., Chizhova J.N., Tokarev I.V., Frolova N.L., Budantseva N.A., Loshakova N.A. Hydrograph separation of the Dzhankuat River, North Caucasus, with the use of isotope methods. *Water Resources*, 2016, vol. 43, pp. 847–861. (In Russ.)
5. Chizhova Yu.N., Rets Ye.P., Vasilchuk Yu.K., Tokarev I.V., Budantseva N.A., Kireyeva M.B. Two approaches to calculating the division of the hydrograph of a river flow with glacier feeding using isotope methods. *Ice and Snow*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 161–168. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-161-168>.
6. Feng M., Zhang W., Zhang S., Sun Z., Li Y., Huan Y., Wang W., Qi P., Zou Y., Jiang M. The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 604, pp. 127209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127209>.
7. Papina T., Eirikh A., Kotovshchikov A., Noskova T. Impact of snowmelt conditions on the isotopic composition of the surface waters of the Upper Ob River during the Flood Period. *Water*, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 2096. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15112096>.
8. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N. Stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon when interpreting formation conditions of surface water bodies of Yamalo-Nenets Autonomous Region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 7–19. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/4038>.
9. Ortega L., Gil L. Isotope hydrology: rev. *Water Resources*, 2019. Available at: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull60-1/6010405_ru.pdf (accessed 08 March 2023).
10. Abbott M.D., Lini A., Bierman P.R. $\delta^{18}\text{O}$, δD and ^3H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. *Journal of Hydrology*, 2000, vol. 228, no. 1–2, pp. 101–112.
11. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Kayukova E.P., Polyakov V.A., Varnakova Yu.V., Zhdanov S.V., Markova T.V. Study of groundwater in certain areas of Karelia using isotope-geochemical methods. *Bulletin of St. Petersburg University. Geosciences*, 2008, no. 2, pp. 25–36. (In Russ.)
12. Gleeson T., Novakowski K., Cook P.G., Kyser T.K. Constraining groundwater discharge in a large watershed: Integrated isotopic, hydraulic, and thermal data from the Canadian shield. *Water resources research*, 2009, vol. 45, no. 8, W08402. DOI: [10.1029/2008WR007622](https://doi.org/10.1029/2008WR007622).
13. Lavrushin V.Y., Lisenkov A.B., Aidarkozhina A.S. Genesis of the Yessentuki deposit of carbonated waters, North Caucasus. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, pp. 77–90. (In Russ.)
14. Lepokurova O.E., Drebot V.V. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) of groundwater in the area of the Torey Lakes (Eastern Transbaikalian Region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 20–29. (In Russ.)
15. Oliveira M.S.M., Neves M.A., Caxito F.A., Moreira R.M. ^{18}O , ^2H , and ^3H isotopic data for understanding groundwater recharge and circulation systems in crystalline rocks terrain of Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, vol. 116, pp. 103794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103794>.
16. Ferronskii V.I., Polyakov V.A. *Isotopy of the Earth's Hydrosphere*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p. (In Russ.)
17. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ryzhkova S.V. The first data on the isotopic composition of stratal waters of the developed oil fields in Novosibirsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 59–72. (In Russ.)
18. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Fage A.N., Khvashchevskaya A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V. First results of complex isotope-hydrogeochemical studies of the Novobibeevsky manifestation of radon waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 57–72. (In Russ.)
19. Clark I.D., Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Boca Raton, CRC Press, 1997. 342 p.
20. Praamsma T., Novakowski K., Kyser K., Hall K. Using stable isotopes and hydraulic head data to investigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 2009, vol. 366, no. 1–4, pp. 35–45.
21. Roques C., Aquilina L., Bour O., Maréchal J.C., Dewandel B., Pauwels H., Hochreutener R. Groundwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 519, pp. 3110–3128.
22. Lyu M., Pang Z., Huang T., Yin L. Hydrogeochemical evolution and groundwater quality assessment in the Dake Lake Basin, Northwest China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, vol. 320, no. 3, pp. 865–883. DOI: [10.1007/s10967-019-06515-8](https://doi.org/10.1007/s10967-019-06515-8).
23. Bochet O., Bethencourt L., Dufresne A., Farasin J., Pédrot M., Labasque T., Le T. Borgne Iron-oxidizer hotspots formed by intermittent oxic–anoxic fluid mixing in fractured rocks. *Nature Geoscience*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 149–155.
24. *Information bulletin on the state of the subsoil of the Siberian Federal District in 2021*. Ed. by V.A. Lgotina. Tomsk, Branch of the Siberian Regional Center (SMSC) Publ., 2022. Vol. 18, 204 p. (In Russ.)
25. Balobanenko A.A., Vasiliev D.I., Dutova E.M., Kuzevanov K.I. Analysis of changes in groundwater levels in Quaternary deposits in the southeastern part of the Irtysh-Ob artesian basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 7, pp. 202–213. (In Russ.)
26. Plyusnin V.M. *Geography of Siberia at the beginning of the 21st century*. Novosibirsk, GEO Publ., 2016. Vol. 5, 447 p. (In Russ.)
27. *Soil and climatic resources of the Altai Territory: reference book*. Eds. N.S. Khalina, I.V. Nazarova, V.A. Dammer. Barnaul, Paragraf Publ., 2020. 131 p. (In Russ.)
28. *Russian Research Institute of Hydrometeorological Information*. World Data Center. Available at: <http://meteo.ru/> (accessed 8 February 2023).
29. Karabitsina L.P., Dym L.S. *Information report on the work carried out at object 3.3 “Regional hydrogeological and geoecological study of the territory of the Altai Territory and the Altai Republic for 2001–2002.”* Maloenisejskoe, AltF FBU “TFGI in the Siberian Federal District” Publ., 2002. Vol. 1–2, 139 p. (In Russ.)

30. *Hydrogeological map of the USSR of water supply conditions for a dispersed population during a special period on a scale of 1:500000 of the Altai Territory. Catalog of water points (wells and springs)*. Eds. Yu.P. Avdeeva, E.A. Sotskova. Novokuznetsk, West Siberian Geological Department, 1972. 156 p. (In Russ.)
31. Vinokurov Yu.I., Tsimbaley Yu.M., Bulatov V.I., Pudovkina T.A. *Kulunda Canal. Landscape-indicative assessment of natural conditions in the zone of influence and forecast of their changes*. Eds. V.V. Vorobyov, Yu.I. Vinokurov. Irkutsk, USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Geography Publ., 1985. 198 p. (In Russ.)
32. Zemskova I.M., Smolentsev Yu.K., Polkanov M.P. *Resources of fresh and low-mineralized groundwater in the southern part of the West Siberian artesian basin*. Ed. by E.V. Pinnecker. Moscow, Nedra Publ., 1991. 259 p. (In Russ.)
33. Borehole no. 7349 registration card. Available at: <https://efgi.ru/object/14618400> (accessed 3 October 2023).
34. Borehole no. 6821 registration card. Available at: <https://efgi.ru/object/15993337> (accessed 3 October 2023).
35. Kuznetsova M.A., Postnikova O.V. *Hydrogeology of the USSR: Kemerovo Region and Altai Territory*. Moscow, Nedra Publ., 1972. Vol. 17, 344 p. (In Russ.)
36. Borehole no. 1014 registration card. Available at: <https://efgi.ru/object/20632273> (accessed 3 October 2023).
37. Borehole no. 4764 registration card. Available at: <https://efgi.ru/object/22192327> (accessed 8 February 2024).
38. Borehole no. 7904 registration card. Available at: <https://efgi.ru/object/38054870> (accessed 3 October 2023).
39. Papina T.S., Eirikh A.N., Malygina N.S., Eirich S.S., Ostanin O.V., Yashina T.V. Trace element and isotopic composition of the snow cover of the Katunsky Natural Biosphere Reserve (Altai Republic). *Ice and Snow*, 2018, vol. 58, no. 1, pp. 41–55. (In Russ.)
40. Devyataeva V.V., Gareev M.F., Vystavkin K.A. *State monitoring of the state of the subsoil of the territory of the Siberian Federal District (Altai Territory) in 2014–2015*. Report on contract No. 5/2013 dated October 1. 2013. State contract no. 7F-13 dated September 10. 2013. Borovikha, JSC Altai HE Publ., 2015. 226 p. (In Russ.)
41. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, no. 3465, pp. 1702–1703.
42. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. 16, no. 4, pp. 436–468.
43. *Encyclopedia of Mechanical Engineering XXL*. Available at: <https://mash-xxl.info/page/02000200514622220186085022149189162081227171243/> (accessed 3 October 2023).
44. Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Schwikowski M. Temperature response in the Altai region lags solar forcing. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, no. 1. DOI: 10.1029/2008GL035930.
45. Gat J.R., Mook W.G., Meijer H.A. Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications. *Atmospheric water*. Ed. by W.G. Mook. Vienna, Austria, UNESCO/IAEA, Series, 2001. Vol. 2, pp. 7–63.
46. Rozanski K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate change in continental isotopic records*, 1993, vol. 78, pp. 1–36.

Information about the authors

Tatyana S. Papina, Dr. Sc., Head of the Chemical Analytical Center, Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; papina@iwep.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8388-7289>

Alla N. Eirikh, Cand. Sc., Researcher Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. alnik@iwep.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3033-2172>

Elena S. Orlova, Junior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation, el.orlova11@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0650-4055>

Irina D. Rybkina, Dr. Sc., Leading Researcher, Head of the Water Resources Management Laboratory, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; irina.rybkina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0081-9652>

Received: 06.05.2024

Revised: 13.05.2024

Accepted: 31.01.2025

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.04.2025. Дата выхода журнала: 30.04.2025.
Формат 60х84/8 (А4). Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,17. Уч.-изд. л. 23,67.
Заказ 168-25. Тираж 500 экз. Цена свободная.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.