

ISSN (Online): 2658-4255

RUSSIAN ARCTIC

russian-arctic.info

Volume 5 № 4/2023



GEOECOLOGY

DETECTION OF GAS OUTLET
IN LAKE SHAKSHINSKOE (TRANS-BAIKAL TERRITORY)
BY REMOTE METHODS

Ph: Yan Silchenko
Teribersky lighthouse

RUSSIAN ARCTIC VOLUME 5 № 4 2023 SCIENTIFIC PEER-REVIEWED JOURNAL

CHIEF EDITOR

KIRA ZMIEVA

EDITORIAL BOARD

Belozersky Gennady Doctor of Sciences (St.Peterburg, Russia)
Belonenko Tatiana, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Bityukova Victoria Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Bryantsev Alexander, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Chashchin Valery, Doctor of Sciences, Prof (St. Petersburg, Russia)
Chashchin Maxim, Doctor of Sciences (St.Petersburg, Russia)
Chubarova Natalia, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Degteva Galina, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)
Dmitriev Vasily, Doctor of Sciences (St. Peterburg, Russia)
Eseev Marat, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)
Fridman Krill Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Gavrilov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Gecha Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Gorbanev Sergey, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Hrennikov Aleksander., Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Ivanov Vladimir, Doctor of sciences (Moscow, Russia)
Kapitanov Aleksey, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Kokin Sergey, PhD (Harbin, China)
Korobov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Kovchin Igor, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Lebedev Sergey, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Levykin Sergey, Doctor of Sciences, Prof (Orenburg, Russia)
Maksimov A.L., Doctor of Sciences, Prof (St. Petersburg, Russia)
Malinin Valery, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Mingazova Elmira, Doctor Sciences, professor (Moscow, Russia)
Mironov Evgeny, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Mitina Elena, Doctor of Sciences (Murmansk, Russia)
Nikuschenko Dmitry, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Opekunova Marina, Doctor of Sciences (St. Peterburg, Russia)
Prohorchuk Egor, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Repina Irina, Doctor of Sciences, Professor (Moscow, Russia)
Romanov Andrey, Doctor of Sciences (Barnaul, Russia)
Rusin Igor, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Semenov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Serebryannikov S., Doctor of Technical Sciences (Moscow, Russia)
Schwarzburg Leonid, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Stepanova Vera, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)
Talykova Lyudmila, Doctor of Sciences (Kirovsk, Russia)
Tishkov Arkady, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Tokarevich Nikolay, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Turichin Gleb, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)
Varivodov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Zvorykina Julia, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)
Chebrov Danila, PhD (Petropavlovsk Kamchatsky, Russia)
Ivanov Boris, PhD (St.Peterburg, Russia)
Karyakin Yuri, PhD (Moscow, Russia)
Khvostova Marina, PhD (Moscow, Russia)
Klimanov Igor, PhD (Moscow, Russia)
Lopukhina Maria (Moscow, Russian)
Medvedkov Aleksey, PhD (Moscow, Russia)
Nikanov Alexander, PhD (St.Petersburg, Russia)
Pisarev Sergey, PhD (St.Petersburg, Russia)
Ryazanova Natalia, PhD (Moscow, Russia)
Segizova Naylya, Doctor of Sciences
Sharonov Andrey, PhD (St.Petersburg, Russia)
Smolyanitsky Vasily, PhD (St.Petersburg, Russia)
Stepanov Rodion, PhD (Moscow, Russia)
Tretyakov Viktor, PhD (St.Peterburg, Russia)
Tsykalov Anatoly, PhD (Krasnoyarsk, Russia)
Yulin Alexander, PhD (St.Petersburg, Russia)
Hajime Yamaguchi, professor (Tokyo, Japan)
Younkoo Kim, professor (Seoul, Korea)
Takuji Waseda (Tokyo, Japan)
Rhee Han Woo, cadidate of Doctor of IR (Seoul, Korea)
Thomas Krumpfen, PhD in geoscience (Bremen, Germany)



EDITORIAL STAF

Science editor

Tatiana Alekseeva (AARI)

Executive secretary

Marina Belikova

PR

Olga Chahovskaya

MANUSCRIPT SUBMISSION

info@arctic-centre.com

ADDRESS

101000, Moscow, Armenian lane,
9/1/1 bld., room 319/44

MASS MEDIA registration

ЭЛ №ФС77-72859 от 22 мая 2018 года

FOUNDER AND PUBLISHER

LLC Center for Information and
Legal Support for the Development
of the Arctic
<http://arctic-centre.com>

CEO

Yu.V. Belikova

THE EDITORIAL THANKS

reviewers and editorial board members
for help in preparing this issue



The journal is licensed
under Creative Commons
Attribution 4.0 International
www.creativecommons.org

Issue date: 26.12.2023



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



CONTENTS

- 04** EDITORIAL
- 05** PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE TROPHIC STATUS OF LAKE BIENDA-STEMME (WESTERN SPITSBERGEN)
G.T. Frumin, A.S. Demeshkin
- 12** PREDICTIVE ASSESSMENT OF RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY AT OPERATION OF FLOATING NUCLEAR POWER PLANT "AKADEMIK LOMONOSOV"
V.M. Kuznetsov, E.B. Yurchevsky
- 27** DETECTION OF GAS OUTLET IN LAKE SHAKSHINSKOE (TRANS-BAIKAL TERRITORY) BY REMOTE METHODS
A.A. Gurulev, A.O. Orlov, V.A. Kazantsev, A.K. Kozlov, S.V. Tsyrenzhapov, D.V. Seredin
- 37** ASSESSMENT OF THE MANGANESE INDUCED NEUROTOXICITY AMONG FORMER SHIPYARD WELDERS IN A PROSPECTIVE STUDY
M.V. Chashchin, E.A. Kaik, E.V. Zibarev, S.M. Nikanova, Makeeva L.V., Chashchin A.M., Pogolova A.G., Zelenkin A.V.
- 45** FRACTAL MATHEMATICAL MODEL OF THE SERVICE LIFE OF POWER TRANSFORMERS OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS 6-10 KV
L.M. Inakhodova, A.L. Frolov
- 57** THE FATE OF THE KRASSIN'S STOKER
V.L. Bronnikov

У ВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!



Подходит к концу невероятно продуктивный, насыщенный арктическими событиями 2023 год! Программа председательства России в Арктическом совете, несмотря на все сложности текущего геополитического момента и отношений между арктическими государствами, выполнена в полном объеме. России удалось сохранить формат и подтвердить взаимодействие с международными партнерами.

Но важнейшие достижения, конечно, внутри страны, непосредственно в Российской Арктике. На одном из ключевых арктических мероприятий 2023 года – форуме «Арктика: настоящее и будущее» было особо отмечено огромное влияние созданной еще в 2020 году системы экономических преференций, приведшей к увеличению объема инвестиций до 1,75 трлн рублей. Более 760 инвестпроектов заявлено к реализации на арктической территории в будущем году, что приведет к созданию 40000 новых рабочих мест. На данный момент, по объёму инвестиций первое место занимает горнорудная промышленность – реализуется 44 проекта на 862 млрд рублей. Если говорить про отраслевую структуру, то среди 766 резидентов лидирует сфера услуг – это 197 проектов, строительная отрасль и девелопмент – 143 проекта, а в сфере туризма реализуется 127 проектов.

Более 36 млн тонн грузов будет перевезено до конца 2023 года по Северному морскому пути, что является абсолютным рекордом в истории перевозок по СМП. Госкорпорация «Росатом» в сотрудничестве с грузоотправителями прорабатывает обоснование строительства дополнительных четырёх атомных ледоколов для работы на Северном морском пути.

Коллектив редакции журнала «Российская Арктика» выражает надежду на дальнейшее столь же мощное развитие Арктического региона в наступающем 2024 году и представляет вашему вниманию очередной выпуск!

Приятного прочтения!

*С уважением,
Главный редактор,
Кира Змиева*

Научная статья

УДК 556.55

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-05-11



EDN: SCCYDB

Для цитирования:

Фрумин Г.Т., Демешкин А.С.
Вероятностная оценка
трофического статуса озера
Биенда-Стемме (Западный
Шпицберген) // Российская
Арктика. 2023. Т. 5. № 4.
С. 05-11.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-05-11>

Получена: 16.06.2023
Принята: 05.09.2023
Опубликована: 11.09.2023

For citation:

Frumin G.T., Demeshkin A.S.
Probabilistic assessment of
the trophic status of lake
Bienda-Stemme (Western
Spitsbergen). Russian Arctic,
2023, vol. 5, no. 4, pp. 05-11.
(In Russian).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-05-11>

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов

Работа выполнена в
Российском государственном
гидрометеорологическом
университете в рамках
Государственного задания
Министерства науки и
высшего образования
Российской Федерации,
проект № FSZU-2023-0002.

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА
ОЗЕРА БИЕНДА-СТЕММЕ (ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)**Г.Т. Фрумин^{1*}, А.С. Демешкин²

¹ Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
г. Санкт-Петербург, Россия

² Северо-Западный филиал «НПО «Тайфун», г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: [*gfrumin@mail.ru](mailto:gfrumin@mail.ru)**Аннотация**

Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема эвтрофирования. Разработанные классификации трофического статуса водных объектов ориентированы на разные показатели и их комплексы. Актуальность исследования обусловлена тем, что ранее трофический статус озера Биенда-Стемме не был изучен, что не позволяло корректно определить пригодность воды озера для питьевого и хозяйственного назначения для жителей поселка Баренцбург. Цель работы – оценить вероятность трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген). Для оценки трофического статуса озера применены математико-статистические модели, в которых в качестве основного дескриптора использованы среднегодовые концентрации фосфора общего. Впервые рассчитан трофический статус озера за период 2002-2022 годы. Установлено, что, в основном, трофический статус озера характеризуется как олиготрофно-мезотрофный.

Ключевые слова: эвтрофирование, трофический статус, вероятностная оценка, математико-статистические модели, озеро Биенда-Стемме (Западный Шпицберген)

**PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE TROPHIC STATUS
OF LAKE BIENDA-STEMME (WESTERN SPITSBERGEN)**G.T. Frumin^{1*}, A.S. Demeshkin²

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia

² North-Western branch of "NPO Typhoon", St. Petersburg, Russia

E-mail: [*gfrumin@mail.ru](mailto:gfrumin@mail.ru)**Abstract**

Among the modern problems of aquatic ecology, the central place is occupied by the problem of eutrophication. The developed classifications of the trophic status of water bodies are focused on different indicators and their complexes. The relevance of the study is due to the fact that the trophic status of the lake Bienda-Stemme was not previously studied, which did not allow to correctly determine the suitability of the lake water for drinking and household purposes for the inhabitants of the village of Barentsburg. The purpose of this work is to assess the probability of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (Western Svalbard). To assess the trophic status of the lake, mathematical and statistical models were used, in which the average annual concentrations of total phosphorus were used as the main descriptor. For the first time, the trophic status of the lake was calculated for the period 2002-2022. It has been established that, in general, the trophic status of the lake is characterized as oligotrophic-mesotrophic.

Keywords: eutrophication, trophic status, probabilistic assessment, mathematical and statistical models, Lake Bienda-Stemme (Western Svalbard)

Введение

Для корректной оценки пригодности воды озера Биенда-Стемме для питьевого и хозяйственно-бытового водопользования необходимы данные о его загрязненности вредными веществами и о трофическом статусе. Качество поверхностных вод озера за весь период гидрохимического мониторинга (2002-2022 гг.) полностью соответствовало установленным российским гигиеническим нормативам и ПДК, а также нормативам качества воды, установленным в странах Европейского Союза. Таким образом, по уровню загрязнённости вода озера Биенда-Стемме может использоваться для целей питьевого и хозяйственно-бытового водопользования без дополнительной водоподготовки.

К сожалению, до настоящего времени трофический статус озера не определялся.

Среди современных проблем гидроэкологии центральное место занимает проблема эвтрофирования [1-3,19] (синонимы: эвтрофикация, эвтрофирование, эвтрофикация). Согласно ГОСТу 17.1.1.01-77, «эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО начаты работы по мониторингу внутренних вод, контролю за эвтрофированием водоёмов земного шара [4].

Особую значимость рассматриваемой проблеме придает наличие на территории России и сопредельных государств трансграничных водных объектов (например, на Северо-Западе России это Чудско-Псковский озерный комплекс, река Нарва, Финский залив, Куршский залив Балтийского моря и др.) [5].

Развитие процесса антропогенного эвтрофирования приводит ко многим неблагоприятным последствиям с точки зрения водопользования и водопотребления (развитие «цветения» и ухудшение качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб).

Сине-зеленые водоросли, образующиеся в процессе эвтрофирования, в результате своей жизнедеятельности производят сильнейшие токсины (алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др.), которые сами не используют, но они, попадая в водную толщу, представляют опасность для живых организмов и человека. Токсины могут вызывать цирроз печени, дерматиты у людей, отравление и гибель животных.

В начальной стадии разработки трофической классификации водоёмов использовались различные критерии: содержание биогенных элементов, соотношение концентраций растворённого кислорода в эпилимнионе и гипolimнионе, интенсивность аккумуляции диоксида углерода в гипolimнионе, комплексы видов беспозвоночных и т.д. [6; 7].

Между этими критериями нет прочной связи, поэтому оцениваемые по ним типы озёр вырисовывались нечетко, более или менее надёжно очерчивались лишь два крайних класса озёр – олиготрофные и эвтрофные. Такое положение сохранялось длительное время, хотя «много раз указывалось, что олиготрофный и эвтрофный типы озёр представляют собой обобщённую характеристику крайних членов ряда природных объектов» [8-9].

Существующие классификации трофического статуса водных объектов ориентированы на разные показатели и их комплексы [10]. Вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоёма может быть очень высокой в случаях использования: малоинформативных индексов; одного единственного индекса трофического статуса; индекса или группы индексов, адаптированных для условий одной климатической зоны, для определения трофности водоёмов в другой климатической зоне; индексов, полученных для водных экосистем циклического типа, для водных экосистем транзитного типа, а также проведения идентификации трофического статуса водоёма по натурным исследованиям одного года (сезона, съёмки).

Каждый из известных методов оценки трофического статуса водных объектов имеет достоинства и недостатки. К примеру, использование индексов трофии, среди которых наиболее популярным в последние годы является индекс Карлсона не «сняло» проблему оценки трофности водной экосистемы. Так, например, при изучении глубоких водохранилищ США исследователи использовали 22 индекса (как химических, так и биологических). Одно из водохранилищ Техаса было отнесено ими к классу олиготрофных по 11 индексам, к классу мезотрофных по 4 индексам и к классу эвтрофных по 7 индексам [14].

В связи с изложенным, определённые перспективы могут быть связаны с применением метода вероятностной оценкой трофического статуса водных объектов.

В предыдущих исследованиях этот метод был применён для оценки трофического статуса некоторых пресноводных озёр России (Ладожское, Онежское, Псковское, Ильмень), Беларуси (Нарочь), Китая и Японии [18]. Цель проведенного исследования – оценить вероятность трофического статуса озера Биенда-Стемме.

Актуальность исследования обусловлена тем, что ранее трофический статус озера не был изучен, что не позволяло корректно определить пригодность воды озера для питьевого и хозяйственного назначения для жителей поселка Баренцбург.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые по данным гидрохимического мониторинга определена динамика трофического статуса озера за многолетний период 2002-2022 гг.

Объект и методы исследования

Озеро Биенда-Стемме расположено на западном берегу залива Гренфьорд (арх. Шпицберген) (табл. 1, рис. 1). Архипелаг Шпицберген, расположен в Северном Ледовитом океане, между 78°09'25" северной широты и 15°5'51" восточной долготы. Координаты озера 78°3'18" с.ш. и 13°57'55" в.д.

Таблица 1.

Морфометрические характеристики озера Биенда-Стемме

Характеристика	Величина	Характеристика	Величина
Площадь зеркала, км ²	0,013	Ширина, м	377
Площадь водосбора, км ²	5,2	Максимальная глубина, м	12,8
Максимальный объем, тыс. м ³	516	Средняя глубина, м	3,2
Длина, м	595	-	-



Рисунок 1. Залив Гренфьорд

Озеро Биенда-Стемме является источником воды питьевого и хозяйственного назначения для жителей посёлка Баренцбург [11]. Ледниковое озеро Биенда-Стемме расположено на противоположном берегу залива Гренфьорд. По трубопроводу, расположенному по дну залива Гренфьорд, вода поступает в Баренцбург.

Особенности химического состава вод озера и его изменение являются основополагающими показателями при проведении разнообразных исследований природоохранной направленности [12-15].

Озеро Биенда-Стемме расположено в межгорной котловине, вследствие чего питание озера осуществляется за счёт притока вод ледника Вардеборг, расположенного севернее озера, и вод ледника Вёринг, морена которого подпирает южный берег озера.

Особенностями этого региона являются его малонаселенность (плотность населения 0,05 человек/км²) и незначительная промышленная активность. Одной из основных нагрузок, оказывающих влияние на природу архипелага Шпицберген, является добыча угля и связанная с ней инфраструктура жилых посёлков. В последние годы увеличивается нагрузка на экосистему и за счёт туристической индустрии, соответственно возрастает количество авто- и мототранспорта, увеличивается число заходов судов в заливы, строится новая инфраструктура.

Пробы воды отбирались в зимне-весенний (время наибольшего снегонакопления) и летне-осенний (июль-сентябрь) периоды с подповерхностного (0,5 м ниже поверхности) и придонного (0,5 м выше дна) горизонтов. Отбор проб проводился в центральной, самой глубокой части озера с поверхностного и придонного горизонтов (0,5 и 9,0 метров, соответственно).

Для оценки трофического статуса озера использованы среднегодовые концентрации фосфора общего (TP) проб воды, отобранных в апреле и мае с подповерхностного и придонного горизонтов. Использование усредненных значений TP обусловлено близостью концентраций в подповерхностных и придонных горизонтах. К примеру, в 2003 г. TP = 9,00 и 8,50 мг/м³, в 2015 г. TP = 11,00 и 10,90 мг/м³, в 2019 г. TP = 1,46 и 1,41 мг/м³. При фотическом слое озера 4 метра (приблизительно) проведённое усреднение можно рассматривать как приемлемое.

Гидрохимические исследования проб проводились в аккредитованной химико-аналитической лаборатории СЗФ ФГБУ «НПО «Тайфун».

Использованы аттестованные методики, внесенные в федеральный реестр методик, допущенных к применению в органах государственного контроля. Исследования выполнялись в 2002—2022 гг.

Отбор проб воды производился Северо-Западным филиалом (СЗФ) ФГБУ НПО «Тайфун» [16]. Перечень гидрохимических анализов включал определение 31 показателя: pH, тяжелых металлов, полициклических ароматических углеводородов, нефтяных углеводородов, биогенных элементов и др. Определение содержания фосфора общего выполнялось колориметрическим методом с предварительным окислением пробы воды кипячением с персульфатом калия в соответствии с требованиями документа РД 52.24.387-2006. В 2005, 2006, 2016-2018 и 2021 гг. данные о концентрациях фосфора общего (TP) отсутствуют. Чувствительность метода определения 5 мг/м³.

Для оценки трофического статуса озера был использован вероятностный подход, ранее разработанный ОЭРК (Организация экономического развития и кооперации), и базирующийся на данных о содержании фосфора общего [17].

Для оценки уровня трофности были использованы пять градаций: μ_{VO} – вероятность ультраолиготрофного статуса, μ_{O} – вероятность олиготрофного статуса, μ_{M} – вероятность мезотрофного статуса, $\mu_{\text{Э}}$ – вероятность эвтрофного статуса и $\mu_{\text{ГТ}}$ – вероятность гипертрофного статуса.

Во всех случаях должно выполняться следующее соотношение:

$$\mu_{\text{VO}} + \mu_{\text{O}} + \mu_{\text{M}} + \mu_{\text{Э}} + \mu_{\text{ГТ}} = 1 \text{ или } 100\%$$

Кривые вероятностной классификации трофического статуса озёр, разработанные ОЭРК, были аппроксимированы аналитическими зависимостями (табл. 2) [18].

Таблица 2.
Формулы для расчётов вероятностей трофического статуса водоёмов
по средним за год концентрациям фосфора общего (мг/м³)

Трофический статус	Математико-статистические модели
Ультраолиготрофный	$\mu(\text{TP})_{\text{VO}} = 1 - \exp\{-\exp[-0,357 \cdot (\text{TP}) + 1,25]\}$
Олиготрофный	$\mu(\text{TP})_{\text{O}} = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,947 \cdot \ln(\text{TP}/8)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(\text{TP})_{\text{M}} = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,995 \cdot \ln(\text{TP}/26)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(\text{TP})_{\text{Э}} = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,964 \cdot \ln(\text{TP}/89)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(\text{TP})_{\text{ГТ}} = \exp\{-\exp[-0,0123 \cdot (\text{TP}) + 1,65]\}$

Результаты и обсуждение

По формулам, приведенным в табл. 2, были рассчитаны вероятности трофического статуса озера (табл. 3). Для расчётов использованы осредненные за год концентрации фосфора общего. Различия трофического статуса озера между сезонами не выявлялись.

Таблица 3.

Вероятностная оценка трофического статуса озера Биенда-Стемме

Год	TP, мг/м ³	μ_{y_0}	μ_0	μ_m	μ_s	Трофический статус
2002	8,5	0,15	0,65	0,19	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2003	8,8	0,14	0,65	0,21	0,00	Олиготрофно-мезотрофный
2004	12,0	0,05	0,57	0,37	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2007	11,5	0,06	0,59	0,34	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2008	10,0	0,09	0,63	0,27	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2009	11,5	0,06	0,59	0,34	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2010	18,0	0,01	0,37	0,58	0,04	Мезотрофно-олиготрофный
2011	10,0	0,09	0,63	0,27	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2012	10,8	0,07	0,61	0,31	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2013	6,1	0,33	0,62	0,05	0,00	Олиготрофно-мезотрофный
2014	5,4	0,40	0,57	0,03	0,00	Олиготрофно-мезотрофный
2015	11,0	0,07	0,60	0,32	0,01	Олиготрофно-мезотрофный
2020	7,9	0,19	0,66	0,15	0,00	Олиготрофно-мезотрофный
2022	12,5	0,04	0,55	0,39	0,02	Олиготрофно-мезотрофный
Среднее	10,3	0,13	0,59	0,27	0,01	Олиготрофно-мезотрофный

Как следует из данных, приведённых в табл. 3, трофический статус озера Биенда-Стемме, в основном, характеризуется как олиготрофно-мезотрофный (на 59% - олиготрофный и на 27% - мезотрофный). Такой трофический статус озера обусловлен незначительной антропогенной нагрузкой фосфором общим и низкой температурой. Так, по данным многолетних наблюдений, среднегодовая температура воздуха на острове Западный Шпицберген для посёлка Баренцбурга составляет -6,4°C [11]. За рассматриваемый период в апреле-мае средний диапазон температур воды озера (подповерхностный слой - придонный слой) 0,95-3,95°C, а в 2010 г. 3,95°C. Более высокая температура воды озера в 2010 г., возможно, стала причиной поступления фосфора из донных отложений в воду, что и привело к повышению концентрации фосфора общего в воде (18 мг/м³).

Диапазоны температур воды в местах отбора проб: подповерхностный слой 0,40-3,90°C, придонный слой 0,80-4,00°C (апрель - май), подповерхностный слой 1,10-6,60°C, придонный слой 1,00-5,90°C (июль - август - сентябрь).

Для оценки статистической значимости рассчитанных вероятностей был применён дисперсионный анализ для средних значений, приведённых в таблице 3. Для числа степеней свободы $n=14+14-2=26$ значение t критерия Стьюдента ($t_{\text{критическое}}$) равно 2,06 при уровне значимости 0,05. Было установлено, что разница между средними величинами μ_{y_0} и μ_0 ($t=12,8$), μ_0 и μ_m ($t=7,16$), μ_m и μ_s ($t=6,5$) статистически достоверна.

Заключение

Озеро Биенда-Стемме – основной источник воды питьевого и хозяйственного назначения для жителей посёлка Баренцбург. Впервые проведена вероятностная оценка трофического статуса озера за период 2002-2022 гг. Установлено, что за этот период трофический статус озера в основном характеризуется как олиготрофно-мезотрофный. Это означает, что с позиций трофности вода озера Биенда-Стемме пригодна для использования для питьевого и хозяйственного назначения для жителей посёлка Баренцбург без специальной обработки. Ранее состояние озера оценивалось лишь по уровню химического загрязнения без учёта его трофического статуса и эта информация передавалась в администрацию посёлка Баренцбург.

Список литературы:

1. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. // Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
2. Остроумов С.А. Синэкологические основы решения проблемы эвтрофирования. // ДАН, 2001. №5. С. 709-712.
3. Фрумин Г.Т., Гильдеева И.М. Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема. // Экологическая химия. 2013. № 4. С. 191-207.
4. Дмитриев В.В. Диагностика и моделирование водных экосистем. // СПб.: СПбГУ, 1995. 215 с.
5. Тимофеева Л.А., Фрумин Г.Т. Трансграничные водные объекты. // СПб.: СпецЛит, 2017. 159 с.
6. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. 1957. Vol. 1. Geography, physics and chemistry. New York: Wiley. 1015 p.
7. Ohle W. Bioactivity, production, and energy utilization of lakes // Limnology, Oceanography. 1956. Vol. 1, No. 3. P.139-149.
8. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Академия наук БССР, 1960. 329 с.
9. Бульон В.В. Первичная продукция и трофическая классификация водоемов. // СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С.147-157.
10. Неверова-Дзиопик Е., Цветкова Л.И. Оценка трофического состояния поверхностных вод: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.
11. Дёмин Ю.Н., Граевский А.П., Демешкин А.С., Власов С.В., Крылов С.С., Лалетин Н.А. Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности предприятий на архипелаге Шпицберген (посёлок Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 гг.: монография. СПб.: ААНИИ, 2011. 316 с.
12. Семенов А.В., Давыдов А.А., Ипатов А.Н. Гидрологическое обследование озера Биенда-Стемме (архипелаг Шпицберген). // Комплексные исследования природы Шпицбергена. 2003. Апатиты. С. 127-136.
13. Лалетин Н.А., Большиянов Д.Ю., Граевский А.П. Гидрохимическая характеристика и особенности состава вод Биенда-Стемме (о. Западный Шпицберген). // Вода: химия и экология. 2012. №7. С. 18-22.
14. Дёмин Ю.Н., Граевский А.П., Демешкин А.С., Власов С.В. Загрязнение почвенно-растительного комплекса в окрестностях рудника «Баренцбург» полициклическими ароматическими углеводородами. // Арктика: экология и экономика. 2012. №3(7). С. 62-73.
15. Frumin G.T., Demeshkin A.S. Environmental and Toxicological Assessment of the Quality of Water in the Lake Bienda-Stemme (Western Spitsbergen) // Russian Journal of General Chemistry. 2020. Vol. 90. No. 13. P. 2619–2621.
16. Фрумин Г.Т., Демешкин А.С., Маликов У.М. Экологически допустимые уровни металлов в озере Биенда-Стемме (Западный Шпицберген). // Арктика: экология и экономика. 2022. №2. С. 183-190.
17. OECD, 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris. 154 p.
18. Фрумин Г.Т., Хуан Жань-Жань. Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов: методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.
19. Bhagowati B., Ahamad K.U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling // Ecohydrology & Hydrobiology. 19 (1). P. 155-166.

References:

1. Khenderson-Sellers B., Marklend KH.R. Umirayushchiye ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya. L., Gidrometeoizdat Publ., 1990. 280 p. (In Russian).
2. Ostroumov S.A. Sinekologicheskiye osnovy resheniya problemy evtrofirovaniya. DAN, 2001, no. 5, pp. 709-712. (In Russian).
3. Frumin G.T., Gil'deyeva I.M. Evtrofirovaniye vodoyemov – global'naya ekologicheskaya problema. Ekologicheskaya khimiya, 2013, no. 4, pp. 191-207. (In Russian).
4. Dmitriyev V.V. Diagnostika i modelirovaniye vodnykh ekosistem. SPb. SPbGU, 1995, 215 p. (In Russian).
5. Timofeyeva L.A., Frumin G.T. Transgranichnyye vodnyye ob"yekty. SPb.SpetsLit Publ., 2017, 159 p. (In Russian).

6. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. Geography, physics and chemistry. New York, Wiley, 1957, vol. 1, 1015 p.
7. Ohle W. Bioactivity, production, and energy utilization of lakes. *Limnology, Oceanography*, 1956, vol. 1, no. 3, pp. 139-149.
8. Vinberg G.G. Pervichnaya produktsiya vodoyemov. Minsk, Akademiya nauk BSSR, 1960, 329 p. (In Russian).
9. Bul'on V.V. Pervichnaya produktsiya i troficheskaya klassifikatsiya vodoyemov. SPb., Gidrometeoizdat Publ., 1993, pp.147-157. (In Russian).
10. Neverova-Dziopik Ye., Tsvetkova L.I. Otsenka troficheskogo sostoyaniya poverkhnostnykh vod: monografiya. SPb., SPbGASU, 2020, 176 p. (In Russian).
11. Domin YU.N., Grayevskiy A.P., Demeshkin A.S., Vlasov S.V., Krylov S.S., Laletin N.A. Sostoyaniye i tendentsii izmeneniya zagryazneniya okruzhayushchey sredy v mestakh khozyaystvennoy deyatelnosti predpriyatiy na arhipelage Shpitsbergen (poselok Barentsburg i sopredel'nyye territorii) za period 2002–2010. SPb., AANII, 2011, 316 p. (In Russian).
12. Semenov A.V., Davydov A.A., Ipatov A.N. Gidrologicheskoye obsledovaniye ozera Biyenda-Stemme (arhipelag Shpitsbergen). Kompleksnyye issledovaniya prirody Shpitsbergena, Apatity, 2003, pp. 127-136. (In Russian).
13. Laletin N.A., Bol'shiyanov D.YU., Grayevskiy A.P. Gidrokhimicheskaya kharakteristika i osobennosti sostava vod Biyenda-Stemme (o. Zapadnyy Shpitsbergen). *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, no. 7, pp. 18-22. (In Russian).
14. Domin YU.N., Grayevskiy A.P., Demeshkin A.S., Vlasov S.V. Zagryazneniye pochvenno-rastitel'nogo kompleksa v okrestnostyakh rudnika "Barentsburg" politsiklicheskimi aromatcheskimi uglevodorodami. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, 3(7), pp. 62-73. (In Russian).
15. Frumin G.T., Demeshkin A.S. Environmental and Toxicological Assessment of the Quality of Water in the Lake Bienda-Stemme (Western Spitsbergen). *Russian Journal of General Chemistry*, 2020, vol. 90, no. 13, pp. 2619–2621.
16. Frumin G.T., Demeshkin A.S., Malikov U.M. Ekologicheski dopustimyye urovni metallov v ozere Biyenda-Stemme (Zapadnyy Shpitsbergen). *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2022, no. 2, pp. 183-190. (In Russian).
17. OECD. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. OECD, 1982, Paris, 154 p.
18. Frumin G.T., Khuan Zhan'-Zhan'. Veroyatnostnaya otsenka troficheskogo statusa vodnykh ob'yektov. Metodicheskoye posobiye. SPb., RGGMU, 2012, 28 p. (In Russian).
19. Bhagowati B., Ahamad K.U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19 (1), pp. 155-166.

Научная статья

УДК [621.039+621.311.24:621.039]:614.876(470+571)

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-12-26



EDN: PKJKI

Для цитирования:

Кузнецов В.М., Юрчевский Е.Б.
 Прогнозная оценка радиационной и экологической безопасности при эксплуатации плавучей атомной электростанции «Академик Ломоносов» // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 4. С. 12-26.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-12-26>

Получена: 03.07.2023
 Принята: 06.09.2023
 Опубликовано: 16.10.2023

For citation:

Kuznetsov V.M., Yurchevsky E.B.
 Predictive assessment of radiation and environmental safety at operation of floating nuclear power plant "Akademik Lomonosov".
 Russian Arctic, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 12-26.
 (In Russian).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-12-26>



ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАВУЧЕЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «АКАДЕМИК ЛОМОНОСОВ»

В.М. Кузнецов^{1*}, Е.Б. Юрчевский²¹ ООО «Группа компаний ИнтеллектСервис», Москва² ООО «Аквахим», МоскваE-mail: *kuznetsov1956@mail.ru**Аннотация**

Плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) проекта 20870, эксплуатируемая в городе Певек (Чаунский район, Чукотского автономного округа), самая северная АЭС в мире. ПАТЭС состоит из плавучего энергетического блока (ПЭБ), береговой площадки с сооружениями, обеспечивающими выдачу электрической и тепловой энергии потребителям, а также гидротехнических сооружений, обеспечивающих безопасную стоянку ПЭБ в акватории. Станция предназначена для энергообеспечения промышленных предприятий, морского порта, жилищного комплекса города. Проект реализовывался с 2007 года. С момента пуска по настоящее время практически отсутствует информация об итогах работы этой АЭС после пуска. Авторы статьи постарались восполнить этот пробел, выполнив свою прогнозную оценку радиационной и экологической безопасности эксплуатации ПАТЭС на основе анализа итогов эксплуатации прототипов и проектной документации.

Ключевые слова: плавучая атомная электростанция, анализ радиационной и экологической безопасности, отработавшее ядерное топливо, радиоактивные отходы, проектные и запроектные аварии

PREDICTIVE ASSESSMENT OF RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY AT OPERATION OF FLOATING NUCLEAR POWER PLANT "AKADEMIK LOMONOSOV"

V.M. Kuznetsov^{1*}, E.B. Yurchevsky²¹ Group of companies Intellectualservice LLC, Moscow, Russia² Aquahim LLC, Moscow, RussiaE-mail: *kuznetsov1956@mail.ru**Abstract**

The Project 20870 Floating Nuclear Power Plant (FNPP), operated in the town of Pevek (Chaunsky District, Chukotka Autonomous Okrug), is the world's northernmost nuclear power plant. The FNPP consists of a floating power unit (FPU), a shore platform with facilities that provide electricity and heat to consumers, and hydraulic engineering structures that ensure the safe parking of the FPU in the water area. The station is intended to supply power to industrial enterprises, the seaport and the city's housing complex. The project has been implemented since 2007. From the moment of start-up to the present there is practically no information in the results of this NPP operation after the start-up. The authors of the article have tried to fill this gap by making their own predictive evaluation of radiation and ecological safety of the FNPP operation based on the analysis of operating results of the prototypes and design documentation.

Keywords: floating nuclear power plant, radiation and environmental safety analysis, spent nuclear fuel, radioactive waste, design and beyond design basis accidents

Введение

Плавучая атомная теплоэлектростанция (далее ПАТЭС) расположена в Чаунском районе Чукотского автономного округа в г.Певек. Основной (базовый) элемент станции – плавучий энергоблок (ПЭБ) проекта 20870 с двумя водо-водяными реакторами КЛТ-40С и двумя паротурбинными установками с турбинами теплофикационного типа и электрогенераторами, скомпонованными в два самостоятельных блока, на которых осуществляется выработка электрической и тепловой энергии и выдача в береговые сети электроэнергии и теплофикационной воды. ПАЭС «Академик Ломоносов» предназначена для энергоснабжения и теплоснабжения Певека, ближайших пунктов и промышленных предприятий Чукотского автономного округа. ПАТЭС даст населению и экономике электроэнергию и тепло и в будущем заменит генерирующие мощности Чаунской ТЭЦ и Билибинской АЭС, которые составляют изолированный от единой энергосистемы энергоузел. В перспективе «Академик Ломоносов» должен стать первым отечественным референтным энергоблоком для потенциальных российских и зарубежных заказчиков. В России ПЭБ с КЛТ-40С представляют интерес для обеспечения электроэнергией и теплотой изолированных от источников энергии прибрежных потребителей Севера и Дальнего Востока. Госкорпорация «Росатом» оценивает возможность заказа примерно на 15 плавучих атомных теплоэлектростанций вдоль Северного морского пути (СМП), заявил ее глава Алексей Лихачев на сессии Петербургского международного экономического форума (ПМЭФ-2023) «Северный морской путь: новые вызовы». «Мы, по самым скромным подсчетам, видим сегодня заказ на где-то 15 плавучих энергоблоков вдоль линии СМП», — сказал он.

Для других стран такие ПЭБ могут быть использованы не только для тепло- и электроснабжения прибрежных и островных потребителей, но и для опреснения морской воды. Уже известно, что интерес к таким разработкам проявляют некоторые зарубежные страны, испытывающие проблемы с энергоснабжением. Ведутся переговоры с государствами Юго-Восточной Азии, Ближнего Востока и Латинской Америки. Также темой интересуются некоторые островные страны. Важно отметить, что создание и освоение этого сегмента мирового рынка идет в конкурентной среде. В числе активных участников разработок в этом направлении США, Китай, Япония, Франция. Конкуренция обуславливает необходимость скрупулезного отношения к вопросам безопасности при создании, транспортировке, монтаже и эксплуатации атомной энергоустановки. К сожалению, с момента пуска ПАЭС в 2020 году и по настоящее время, опубликована лишь минимальная информация в показателях работы этой АЭС. Авторы статьи постарались частично восполнить этот пробел, выполнив свою прогнозную оценку радиационной безопасности эксплуатации ПАТЭС на основе анализа итогов эксплуатации прототипов и проектной документации. В качестве нормативной базы для оценки безопасности эксплуатации ПАЭС были использованы современная национальная нормативная база по обеспечению безопасности в атомной энергетике, рекомендации Международного агентства по атомной энергетике, нормативная база Морского Регистра РФ для атомных судов, а также требования ПНАЭ Г 01-011-97 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций».

В процессе производственной деятельности ПАТЭС возможно образование 6 видов нерадиоактивных отходов производства и потребления. В 2020 году образовалось 17,180 т. отходов, в 2021 образовалось 16,788 т. ПАТЭС не осуществляет эксплуатацию собственных объектов захоронения или длительного хранения отходов. На ПАТЭС производится временное накопление отходов производства с последующей передачей отходов с целью обезвреживания и утилизации подрядным организациям на договорной основе. На все виды отходов ПАТЭС оформлены паспорта опасных отходов. По всем наименованиям отходов I-IV классов опасности подтверждены классы опасности.

Санитарно-защитная зона ПАТЭС ограничена территорией промышленной площадки ПАТЭС. Зона наблюдений отсутствует. Площадка станции приближена к основным потребителям тепловой и электрической энергии г. Певек, находится в городской черте, на незастроенной земле. Ближайшая жилая застройка находится в южном направлении от ПАТЭС на расстоянии около 400 м. В г. Певек население – 4972 человека [1].

Потенциальным источником радиоактивных выбросов в атмосферу от ПАТЭС является выброс активности системой вентиляции ПЭБ, на котором размещены все производства, связанные с обращением с радиоактивными материалами. Из образующихся при нормальной эксплуатации газообразных радиоактивных отходов за пределы ПЭБ поступают только инертные радиоактивные газы (ИРГ), источником которых является непосредственно реакторная установка — при работе на мощности и перезарядке

реактора. При нормальной эксплуатации ПАТЭС радиоактивные сбросы исключены. Контроль газоаerosольных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду осуществляется непрерывно с помощью Системы радиационного контроля СРК-05Р, а также ежемесячно лабораторным методом. Наибольший вклад в величину активности выброса вносили ИРГ, преимущественно Ag-41, в 2020 г. – Хе-133, выбросы которых составляли 64,8% и 97,6% допустимого выброса за год соответственно. Годовая доза на местности в СЗЗ ПАТЭС составила $1,31 \cdot 10^{-3}$ Зв, что в 1,7 раз выше годовой дозы в 2020 году ($0,77 \cdot 10^{-3}$ Зв) [2].

ПАТЭС не имеет аккредитованных лабораторий. На ПАТЭС отсутствуют системы экологического менеджмента, менеджмента качества, менеджмента охраны здоровья и безопасности труда.

За 2021 г. произошло 7 нарушений в работе станции. Все нарушения классифицированы в соответствии с федеральными нормами и правилами «Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе судов с ядерными энергетическими установками и радиационными источниками» (НП-088–11) как нарушения нормальной эксплуатации категории П-4. Нарушения в работе произошли главным образом из-за срабатываний аварийной защиты реакторных установок и экстренных снижений их мощности. При этом заметную долю нарушений в количестве 5, составляют течи парогенераторов ПГ-28С. [3].

Безопасность АСММ

При создании АСММ приоритетным направлением являлось предотвращение аварий и сокращение радиоактивных отходов. Одновременно реализовались меры по повышению надежности систем безопасности, внедрялись технические средства управления запроектными авариями, включая тяжелые аварии с повреждением активной зоны. Безопасность обеспечивается реализацией принципа глубокоэшелонированной защиты, который включает стратегию предотвращения аварий и ограничения их последствий, предусматривает применение систем физических барьеров, технических и организационных мер.

Эффективность организационных мер достигается за счет консервативного подхода при проектировании, обеспечения качества на всех этапах создания АСММ и включает: предотвращение и устранение отклонений от нормальной эксплуатации, своевременное выявление отказов за счет применения средств диагностики оборудования; предотвращение развития аварийных ситуаций в проектные аварии, проектных аварий в запроектные, локализацию вышедших при аварии радиоактивных веществ; управление запроектной аварией для предупреждения неблагоприятного развития и ограничения последствий; защиту персонала и населения с использованием мер в рамках плана противоаварийных мероприятий.

К техническим средствам обеспечения радиационной безопасности относятся: биологическая защита; физические барьеры на пути возможного распространения радионуклидов; организация замкнутых схем вентиляции и охлаждения для исключения выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду; системы безопасности и их компоненты (аварийный останов реактора, аварийный теплоотвод, барботажные устройства и др.).

Источники ионизирующего излучения внутри установки и за ее пределами окружены биологической защитой, ограничивающей или исключающей воздействие на персонал, население и окружающую среду. Дополнительно все помещения разделены на зоны с организацией санитарно-пропускного режима. Поддерживаемое в них разрежение сводит к минимуму выход радионуклидов в чистые помещения и за пределы установки.

При работе установки и технологическом обслуживании жидкие радиоактивные отходы образуются лишь при перегрузке активных зон и последующих дезактивационных работах. Их собирают в емкости и передают на переработку только при заводском ремонте. Твердые отходы накапливаются при перезарядке и ремонте установки и включают специнструмент, спецодежду, приборы и детали, обтирочный материал и др., которые хранят на АСММ в контейнерах и передают на завод только при ремонте.

Предотвращение распространения газообразных радиоактивных веществ в окружающую среду обеспечивает система вентиляции контролируемой зоны, в составе которой предусмотрены фильтры для очистки воздуха от радиоактивных aerosолей и иода. При эксплуатации ведется дозиметрический контроль и выполняются комплексные мероприятия по защите обслуживающего персонала, организована служба внешнего контроля прилегающей территории, мест проживания населения. Все радиационно опасные работы, связанные с выводом из эксплуатации АСММ, будут проводиться на

специализированном предприятии за пределами места ее постоянного нахождения. Радиационная обстановка на территории и прилегающей местности к концу периода эксплуатации АСММ будет нормальной и после ее отправки на судоремонтный завод, ранее занятая территория может использоваться без ограничений.

Дозы облучения

При эксплуатации радиационная обстановка будет определяться активностью оборудования и радиоактивными отходами. В этих условиях доза облучения персонала минимальна за счет эффективной радиационной защиты и ограничения присутствия в недопустимых местах. Основные дозовые нагрузки ожидаются при перегрузке активных зон, ионообменных фильтров первого контура, демонтаже и ремонте оборудования, а не в процессе эксплуатации. Радиационное воздействие на персонал при этих операциях ограничивается соответствующим регламентом и техническими средствами защиты.

Для сравнения отметим, что средняя годовая коллективная доза облучения персонала ледоколов составляет 3—50 чел·мЗв, индивидуальная — 1,5—2 мЗв/год на одну установку [4]. Учитывая, что КЛТ-40С аналогична, но имеет более эффективную защиту, ожидаемая доза будет в 1,5—3 раза ниже и составит 10—20 чел·мЗв и 0,5—0,8 мЗв/год соответственно (по НРБ-99 для персонала минимально допустимо 20 мЗв/год, населения — 1 мЗв/год. Доза внутреннего облучения будет минимальной вследствие фильтрации аэрозолей в помещениях блока.

Регламентное обслуживание и техническое освидетельствование оборудования проводят при перегрузке активной зоны один раз в 2,5 - 3 года, заводской ремонт - через 10—12 лет. Перегрузка начинается через 13 сут для первых трех кампаний реактора в условиях АСММ, после четвертой - не ранее 120 сут на судоремонтном заводе при замене выработавшего ресурс оборудования. Коллективная доза облучения в этих условиях составит 40 - 45 чел·мЗв, индивидуальная - до 1 мЗв/год, что соответствует ~5% установленного НРБ-99 дозового предела. Эти результаты удовлетворительно согласуются с эксплуатационными и ремонтными данными атомных ледоколов: коллективная доза 40—100 чел·мЗв, индивидуальная - 1 - 1,5 мЗв/год, что составляет 5-8 % дозового предела для персонала. При более сложных видах работ индивидуальная доза может достигать ~5 мЗв (25 % дозового предела). Приведенные оценки соответствуют рекомендациям СП АС-99, согласно которым коллективная доза облучения за перегрузку и ремонт не должна превышать 250 чел·мЗв.

Сведения о радиоактивных отходах образующиеся в процессе эксплуатации

По опыту эксплуатации атомных ледоколов объем и активность контурных и дезактивационных вод близки к установкам АСММ, но ожидаются в меньшем количестве: контурные воды до 0,1 м³, дезактивационные — до 50 м³, включая перезарядку, активность 10³—10³ кБк/л (табл. 1). Отходы относятся к категории низкоактивных, суммарная активность может достигать 20 ГБк. Твердые отходы образуются при перезарядке реактора и ремонте установки.

Таблица 1.

Ожидаемая максимальная объемная активность дозообразующих радионуклидов в эксплуатационных жидких радиоактивных отходах

Радионуклид	Активность, кБк/кг
Продукты коррозии:	
⁵⁴ Mn	20
⁶⁰ Co	20
Продукты деления:	
⁹⁰ Sn+ ⁹⁰ Y	60
¹³⁴ Cs	80
¹³⁷ Cs+ ¹³⁷ Ba	160
¹⁴⁴ Ce+ ¹⁴⁴ Pr	80

Условно они разделяются на текущие, образующиеся при работе и перезарядке, и разовые, включающие оборудование от ремонта (табл. 2). В совокупности с учетом среднего ремонта ожидается до 100 м³ отходов, среди них более 50 % горючие. Радиоактивность оборудования обусловлена активацией и радиоактивным загрязнением теплоносителя, определяется преимущественно Mn-54, Fe-55, Co-60, Ni-63, Sr-90 и Cs-137.

Таблица 2.

Ожидаемое максимальное количество твердых радиоактивных отходов при эксплуатации двух активных зон, включая их перезарядку

Категория отходов	Количество, м ³	Активность, ГБк
Низкоактивные	16,5	130
Среднеактивные	5	410
(ионообменные смолы)	1,2	74
Высокоактивные	1,5	1220
Всего	24,2	1834

В таблице 3 приведены обобщенные сведения о радиоактивных отходах, образующихся при эксплуатации АСММ.

Таблица 3.

Сведения о радиоактивных отходах, образующихся при эксплуатации АСММ

Вид РАО по агрегатному состоянию	Наименование РАО	Группа РАО	Количество РАО, м ³
1	2	3	4
Твердые радиоактивные отходы	Элементы оборудования РУ, хранилища РАО, отработанная шихта фильтров, специнструмент, спецодежда, средства индивидуальной защиты, кабельная продукция и пр.	низкоактивные	16,5
		среднеактивные	5,0
		высокоактивные	2,0
Жидкие радиоактивные отходы	Контурные воды	низкоактивные	2,1
	Дезактивационные воды	низкоактивные	53
	Воды контура охлаждения бака выдержки	низкоактивные	6,0
Газообразные радиоактивные отходы	Газовый выброс (работа на мощности)	низкоактивные	-
	Газовый выброс (перезарядка реактора)	низкоактивные	-
Суммарная активность РАО, Бк	Периодичность поступления (образования) отходов	Виды работ в рамках лицензируемого вида деятельности по обращению с РАО	
5	6	7	
1,3·10 ¹¹	За период эксплуатации двух активных зон, включая перезарядку двух реакторов	Сбор, хранение, транспортирование	
4·10 ¹¹			
До 4·10 ¹⁴			
2,5·10 ¹⁰	За период эксплуатации двух активных зон, включая перезарядку двух реакторов	Сбор, хранение, транспортирование	
4·10 ¹¹ Бк/год			
4·10 ¹¹ Бк/год	Постоянно в течение времени работы	-	
4·10 ¹¹ Бк/год	Один раз в три года (перезарядка реакторов)	-	

Твердые радиоактивные отходы Нормальная эксплуатация

Твердые радиоактивные отходы (ТРО), в основном, образуются при проведении перезарядки реактора и ремонте РУ и включают элементы оборудования РУ, хранилища, отработавшую шихту фильтров, специнструмент, спецодежду, средства индивидуальной защиты, кабельную продукцию, различного рода приборы и детали, обтирочный материал, органические отходы, резиновые изделия, часть хозяйственного мусора и т.д.

Твердые отходы по природе образования можно разделить на: ТРО, образующиеся за счет активации нейтронами; ТРО, образующиеся за счет загрязнения продуктами коррозии и деления; ТРО, образующиеся при переработке жидких РАО.

ТРО по периодичности образования в процессе эксплуатации АСММ можно условно разделить на текущие, образующиеся при работе РУ на мощности и перезарядке, и разовые, представляющие в основном радиоактивное оборудование РУ и хранилища

и образующиеся только два раза за весь срок службы АСММ при среднем ремонте, который осуществляется в заводских условиях вне места эксплуатации АСММ. К текущим ТРО относятся также кассеты фильтров системы вентиляции КЗ.

Количество и активность текущих твердых РАО, образующихся на АСММ (от обеих РУ) за период эксплуатации двух активных зон, включая перезарядку двух реакторов, представлены в таблице 4.

Таблица 4.
Максимальное количество и активность твердых РАО, образующихся при эксплуатации АСММ

Группа отходов	Количество, м ³	Активность, Бк	Периодичность поступления (образования) отходов
I (низкоактивные)	16,5	1,3·10 ¹¹	За период эксплуатации двух активных зон, включая перезарядку двух реакторов
II (среднеактивные)	5 (1.2) ¹⁾	4·10 ¹¹ (8·10 ¹⁰) ¹⁾	
III (высокоактивные)	2	До 4·10 ¹⁴ ²⁾	

1) В скобках отдельно указаны количество и активность ионообменных смол.

2) Активность определяется элементами реактора и активной зоны.

Проектные аварии

При проектных авариях разгерметизации 1 контура количество твердых РАО, образование которых вызвано самой аварией, будет незначительным. К таким отходам относится то оборудование, которое вышло из строя (повреждено) и к дальнейшей эксплуатации непригодно (трубопровод, различного рода уплотнения, прокладки и т.д.).

Основное количество твердых РАО при проектных авариях разгерметизации 1 контура будет образовываться при ликвидации их последствий, т.е. при проведении дезактивации и ремонта. Это спецодежда, средства индивидуальной защиты, различного рода приборы и детали, обтирочный материал, резиновые изделия, хозяйственный мусор и т.д. Конкретное количество таких отходов зависит от масштаба аварии разгерметизации 1 контура и соответствующего ремонта.

При таких неопределенных условиях можно говорить только об оценке масштаба количества твердых РАО, используя данные о перезарядке реактора и проведении ремонта на атомных ледоколах. Твердых РАО при проектных авариях разгерметизации 1 контура следует ожидать в количестве 10-15 м³. Радионуклидный состав таких отходов будет соответствовать радионуклидному составу теплоносителя 1 контура, а суммарная активность, как низкоактивных отходов, будет составлять до 10¹¹ Бк.

Жидкие радиоактивные отходы Нормальная эксплуатация

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) в общем случае разделяются на две группы по источнику образования: отходы, образующиеся при технологических операциях, проводимых непосредственно на РУ, так называемые контурные воды; отходы, образующиеся при соответствующих технологических операциях, связанных с проведением дезактивации, так называемые дезактивационные воды.

В процессе эксплуатации АСММ ЖРО образуются при выполнении следующих технологических операций: отбор проб 1 контура (3 раза в год); подренирование 1 контура из системы очистки при перегрузке (1 раз в 3 года); газоудаление из оборудования 1 контура (1 раз в год); дезактивация контролируемой зоны после перезарядки реактора (1 раз в 3 года); дезактивация контролируемой зоны в течение года (1 раз в год); дезактивация оборудования реакторной установки, перегрузочного оборудования; дезактивация деталей, специнструмента и спецпомещений (1 раз в 3 года).

Из таблицы 5 следует, что суммарная активность ЖРО, образующихся на АСММ (от обеих РУ) за период между перезарядкой реакторов, может достигать 2,5·10¹⁰ Бк, а сами ЖРО относятся к категории низкоактивных, т.к. объемная активность не превышает 10⁶ Бк/кг.

Таблица 5.
Максимальное количество ЖРО, образующихся на АСММ (от обеих РУ) за период эксплуатации двух активных зон, включая перезарядку двух реакторов

Количество жидких РАО, м ³		
Контурные воды	Дезактивационные воды	Воды контура охлаждения бака выдержки
2,1	53	6

В таблице 5 представлены расчетные данные по активности жидких РАО и определяющих ее радионуклидов. В таблице приведены максимальные ожидаемые значения активности, соответствующие эксплуатации активной зоны при состоянии, близком к предельному, т.е. расчетная активность теплоносителя 1 контура при работе на мощности составляла около $2 \cdot 10^8$ Бк/кг.

В практике эксплуатации атомных ледоколов такие значения активности весьма редки. Обычно среднее значение активности ЖРО в 5-10 раз меньше. При аварии связанной с разгерметизацией 1 контура радиоактивный теплоноситель поступает в ЗО. При этом постоянно производится мониторинг радиационной обстановки, как самой ЗО, так и всех помещений станции.

Причем в процессе аварии объемная концентрация радионуклидов будет уменьшаться за счет разбавления нерадиоактивной водой, поступающей в реактор из гидроаккумуляторов и цистерн САОЗ. Максимальное количество воды с наибольшей концентрацией радионуклидов образуется при авариях с разрывом полным сечением трубопроводов 1 контура системы КД.

Радиоактивная вода локализуется в ЗО и распределяется в последней следующим образом (на примере аварии с разрывом полным сечением трубопровода DN 80 системы КД): в реакторном помещении - 38 т; в барботажной цистерне (включая собственную воду) - 48 т; в аппаратном помещении - 1,2 т.

Это максимальное расчетное количество образовавшихся при аварии жидких РАО, т.к. в дальнейшем подача воды в реактор (аварийная проливка) осуществляется насосами рециркуляции с забором воды из реакторного помещения (т.е. повторного ее использования).

К жидким радиоактивным отходам следует отнести также отходы, которые будут образовываться при дезактивации помещений ЗО при ликвидации последствий аварии. Масштаб образования последних оценивается величиной около 30-50 м³. Таким образом, при аварии разгерметизации 1 контура в пределах ЗО образуется около 90 м³ жидких РАО в процессе самой аварии и около 30-50 м³ - при ликвидации ее последствий, т.е. всего 120-140 м³. Учитывая, что перед аварией вся радиоактивность была сконцентрирована в циркулирующем теплоносителе РУ, масса которого составляет 15 т, объемная концентрация радионуклидов при разбавлении проливочной водой уменьшится как минимум в 6 раз.

Максимальная объемная активность ЖРО и определяющих ее радионуклидов, образующихся при проектной аварии разгерметизации полным сечением трубопровода системы КД (рассматриваются только долгоживущие радионуклиды). Предполагалось, что перед аварией активность теплоносителя максимальная, т.е. соответствует предельному значению, выраженному через активность суммы радионуклидов иодов $2 \cdot 10^8$ Бк/кг (на 2 часа выдержки вне контура). Из вышеизложенного следует, жидкие РАО, образующиеся при проектных авариях, будут относиться к низкоактивным (объемная активность меньше 10^6 Бк/кг).

Газообразные радиоактивные отходы Нормальная эксплуатация

При нормальных условиях эксплуатации АСММ образование газообразных радиоактивных отходов происходит в результате: активации входящего в состав воздуха аргона в помещениях РУ; отбора проб теплоносителя 1 контура; проведения ремонтных работ и перезарядки реакторов, сопровождаемых вскрытием (разгерметизацией) 1 контура; хранения отработавшего ядерного топлива.

Поступление радионуклидов в окружающую среду

При нормальной эксплуатации в окружающую среду постоянно будет поступать незначительное количество газообразных отходов, которые образуются в результате активации аргона, отбора проб теплоносителя первого контура, проведения ремонтных работ и перезарядки реактора с вскрытием первого контура и хранения отработавшего ядерного топлива. Отметим, что за пределы АСММ будут выходить только радиоактивные благородные газы, так как аэрозоли улавливаются фильтрами (таблица 6). Максимальный выброс радиоактивных газов за пределы АСММ при нормальной эксплуатации составит до 370 ГБк/год при работе на мощности и до 740 ГБк/год при перезарядке реактора. Поступление жидких и твердых отходов исключено. В результате загрязнение морской воды, донных отложений и прилегающей территории не произойдет.

Таблица 6.

Активность газоаэрозольных поступлений во внутренние помещения АСММ от одной КЛТ-40С при нормальной эксплуатации, ГБк/год

Определяющие нуклиды	Активность
Работа на мощности:	
⁴¹ Ar	До 200
Радиоактивные благородные газы	0,04 - 0,4
Иод (сумма)	$0,4 \cdot 10^{-4}$ -0,4
Перезарядка, ремонт:	
Радиоактивные благородные газы	37-370
³ H	$0,4 \cdot 10^{-3}$ -0,04
Продукты коррозии и деления	0,04-0,4

Если при нормальной эксплуатации поступление радионуклидов в окружающую среду незначительное, то при авариях их количество возрастает в десятки и сотни раз, чем и определяется беспокойство населения, несмотря на то, что вероятность аварий соответствует международным требованиям и не превышает 10^{-6} 1/реактор·год. Аварии подразделяются на проектные и запроектные [4,5]. Наиболее неблагоприятными среди проектных являются разрыв трубки теплообменника первого—третьего контуров, запроектных — разрыв парового трубопровода-коллектора парогенератора с незакрытием локализирующей арматуры второго контура¹. Эти аварии приняты в проекте АСММ в качестве максимально возможных (таблица 7).

Таблица 7.

Выброс радионуклидов в окружающую среду при максимальной аварии, ГБк

Радионуклид	Проектная авария			Запроектная авария (сумма)
	0-1 сут	1-30 сут	Сумма	
⁴¹ Ar	4,8	$6,7 \cdot 10^{-6}$	4,8	81
⁸⁵ Kr	30	$2,3 \cdot 10^{-2}$	30	$5,1 \cdot 10^2$
⁸⁷ Kr	63	$1,3 \cdot 10^{-6}$	63	10^3
⁸⁸ Kr	73	$4,2 \cdot 10^{-3}$	73	$1,2 \cdot 10^3$
¹³³ Xe	$1,8 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^3$
¹³⁵ Xe	$1,8 \cdot 10^2$	1,8	$1,8 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$
¹³⁸ Xe	$1,3 \cdot 10^2$	-	$1,3 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^3$
Сумма	$6,6 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$	$7,8 \cdot 10^2$	10^4
Органический иод				
¹³¹ I	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	0,33
¹³² I	0,87	10^{-5}	0,87	15
¹³³ I	0,32	$2 \cdot 10^{-2}$	0,34	5,1
¹³⁴ I	1,9	-	1,9	30
¹³⁵ I	0,64	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,64	11
Сумма	3,7	$4,3 \cdot 10^{-2}$	3,7	61
Молекулярный иод				
¹³¹ I	0,29	$2,1 \cdot 10^{-6}$	0,29	5,7
¹³² I	13	10^{-9}	13	$1,9 \cdot 10^2$
¹³³ I	4,5	$1,9 \cdot 10^{-6}$	4,5	81
¹³⁴ I	29	-	29	$3,7 \cdot 10^2$
¹³⁵ I	9,3	$2,3 \cdot 10^{-7}$	9,3	$1,5 \cdot 10^2$
Сумма	56	$4,3 \cdot 10^{-6}$	56	$8 \cdot 10^2$
¹³⁴ Cs	$9,7 \cdot 10^{-3}$	-	$9,7 \cdot 10^{-3}$	0,20
¹³⁷ Cs	10^{-2}	-	10^{-2}	0,21
Сумма	$2 \cdot 10^{-2}$	-	$2 \cdot 10^{-2}$	0,41
Всего	~720	~120	~840	~1900

Авария, связанная с разгерметизацией первого контура, будет сопровождаться выбросом аэрозолей и газообразных радиоактивных веществ, первые из них будут улавливаться фильтрами, вторые поступать за пределы установки и далее через

вытяжную вентиляцию в окружающую среду. Теплоноситель первого контура будет локализован в отсеке. Радиоактивная вода в окружающую среду не попадет и распределится внутри: в реакторном помещении - до 38 м³, в барботажной цистерне, включая собственную воду, - до 48 м³ и аппаратном помещении - до 1,2 м³. В дальнейшем при дезактивации образуется еще 30 - 50 м³ отходов.

Твердые отходы будут включать вышедшее из строя оборудование: трубопроводы, уплотнения, прокладки и др. в количестве 10-15 м³ (70-100 Гбк). В результате за проектной аварии произойдет паровоздушный выброс в атмосферу и незначительное загрязнение прилегающей территории.

Характеристика системы обращения с ядерным топливом и радиоактивными отходами

Все системы обращения с ядерным топливом и радиоактивными материалами расположены внутри АСММ. На территории береговой площадки ПАТЭС хранение радиоактивных сред и обращение с ядерными материалами и радиационно-опасными средами не предусматривается, за исключением доставки на АСММ один раз в 3-4 года новых тепловыделяющих сборок (НТВС) для перезагрузки РУ. В соответствии с моделью эксплуатации АСММ, для обеспечения ее автономной эксплуатации в течение межремонтного периода, предусмотрено проведение четырех перезарядок каждой реакторной установки. Три перезарядки производятся на месте эксплуатации АСММ. Время четвертой перезарядки совпадает с проведением заводского ремонта и выполняется после транспортировки АСММ на специализированное предприятие.

Система обращения с ядерным топливом на АСММ обеспечивает: – прием, размещение, проверку и подготовку к загрузке в реакторную установку новых тепловыделяющих сборок; размещение, подготовку, проверку и обеспечение необходимыми энергосредами перегрузочного оборудования; грузоподъемные операции, выполняемые в процессе подготовки оборудования, проведения перезарядки и размещения отработавших тепловыделяющих сборок в хранилищах; хранение образующихся во время эксплуатации и в процессе перезарядки реакторной установки твердых и жидких радиоактивных отходов за весь межремонтный период.

При нормальной эксплуатации АСММ образуются твердые, жидкие и газообразные радиоактивные отходы. В соответствии с Постановлением Правительства РФ «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» от 19.10.2012 № 1069 (в ред. Постановления Правительства РФ от 04.02.2015 № 95) твердые и жидкие радиоактивные отходы, образующиеся при эксплуатации АСММ, относятся к удаляемым. На АСММ предусмотрены хранилища для ТРО и ЖРО, вместимость которых позволяет осуществлять их сбор и хранение за весь межремонтный период (10-12 лет) без их вывоза или переработки по месту эксплуатации.

В период заводского ремонта передача жидких и твердых радиоактивных отходов для переработки и захоронения осуществляется в соответствии с Договором, заключенным с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Деятельность по обращению с радиоактивными отходами при эксплуатации АСММ регламентирована международными и национальными нормативно-правовыми актами в области использования атомной энергии и радиационной безопасности. Разработана и утверждена «Инструкция по обращению с радиоактивными отходами» АО «Концерн Росэнергоатом», которая содержит основные организационно-технические требования по обеспечению радиационной безопасности при сборе, временном хранении, транспортировании в пределах АСММ радиоактивных отходов, образующихся как процессе эксплуатации, так и при проектной аварии. Обращение с РВ и РАО на АСММ осуществляется при проведении следующих технологических операций: использование РВ при эксплуатации АСММ; перевод РВ в РАО и передача их на захоронение; образование РАО при эксплуатации и ремонте РУ; образование РАО при хранении ОТВС; сбор, хранение РАО на объекте; передача РАО на другие объекты; удаление ГРО; перевод ЯМ в РАО.

Учет и контроль РВ и РАО радиоактивных веществ и радиоактивных отходов при эксплуатации АСММ осуществляется в соответствии с «Инструкцией по учету и контролю РВ и РАО», разработанной и утвержденной АО «Концерн Росэнергоатом». Учет и контроль РВ и РАО на АСММ является составной частью государственной системы учета и контроля РВ и РАО. Для организации наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния компонентов окружающей среды при эксплуатации ПЭБ в проектной документации «Плавучая атомная теплоэлектростанция на базе плавучего энергоблока с реакторными установками КЛТ-40С в г. Певек Чукотского АО» разработана

программа производственного экологического контроля (мониторинга).

Обращение с твердыми радиоактивными отходами

Система обращения с ТРО включает в себя: организационно-функциональную структуру АСММ и подразделений, отвечающих за обращение с РАО; комплекс организационно-технической и технологической документации, регламентирующей и обеспечивающий деятельность по обращению с РАО; подготовленный и допущенный к выполнению работ с РАО персонал; системы и оборудование, обеспечивающие обращение с РАО; хранилища; средства измерения РАО.

Система обращения с ТРО обеспечивает, при безусловном выполнении требований по безопасности, следующий порядок обращения с ТРО: отдельный, в соответствии с классификацией, сбор и сортировку ТРО; промежуточное хранение ТРО; учет и контроль ТРО; передача РАО для переработки и захоронения.

ТРО на АСММ в основном образуются при проведении перезарядок и ремонте РУ и включают в себя: демонтируемые с РУ сборки, приборы, детали, специнструмент, обтирочный материал, покрытия, спецодежду, посуду РХЛ, отработавшую шихту фильтров 1 и 3 контуров и другие ТРО. Условно ТРО разделяются на группы: ТРО, образующиеся за счет активации нейтронами, и ТРО, образующиеся за счет загрязнения продуктами коррозии и деления. По периодичности поступления ТРО, в процессе эксплуатации АСММ, условно разделены на «текущие», образующиеся при работе РУ на мощности и перезарядке, и «разовые», представляющие, в основном, радиоактивное оборудование РУ и образующиеся только два раза за весь срок службы АСММ при среднем ремонте.

При среднем ремонте АСММ образуется до 100 м³ ТРО весом около 130 т. К этим отходам добавятся и сопутствующие ТРО, характерные для перезарядки реактора, объем которых составит около 15 м³. Радионуклидный состав практически всех ТРО, образовавшихся при работе РУ на мощности и перезарядке реактора, близок к составу теплоносителя 1 контура. Радиоактивность заменяемого при среднем ремонте АСММ оборудования определяется нейтронной активацией и радиоактивным загрязнением от контакта его с теплоносителем. ТРО, образовавшиеся за счет нейтронной активации – высокоактивные. ТРО, образовавшиеся за счет загрязнения – среднеактивные. Наведенная радиоактивность определяется радионуклидами Mn-54, Fe-55, Co-60, Ni-63. Радиоактивность отложений в основном (80 % активности) определяется Mn-54 и Co-60. С учетом возможности образования ТРО за период эксплуатации 10-12 лет (межремонтный период), а также возможности транспортирования их к месту хранения с последующей выдачей на берег, на АСММ предусмотрены хранилище низкоактивных ТРО и хранилище средне- и высокоактивных ТРО. Хранилище низкоактивных ТРО предназначено для хранения спецодежды, обуви, различного вида покрытий и других, в основном мягких, горючих ТРО. Хранение отходов должно производиться в полиэтиленовых упаковках (мешках) на стеллажах. Хранилище средне- и высокоактивных ТРО совмещено с хранилищем ОТВС в едином блоке под единой биологической защитой (помещение хранилища ОТВС и ТРО). Хранилище средне- и высокоактивных представляет собой гнезда, в которых размещаются паллеты со стержнями СУЗ, штатные сборники отработавшей шихты и контейнеры ТРО. Загрузка (выгрузка) в гнезда хранения, а также все транспортные перемещения осуществляются в защитных контейнерах, которые входят в состав комплекта перегрузочного оборудования. Гнезда рассчитаны на прием и хранение ТРО, образующихся в результате трех перезарядок двух РУ. Транспортирование ТРО от РУ в хранилище выполняется с использованием защитных контейнеров.

Сортировка и разрезка ТРО в необходимый размер для размещения в контейнерах ТРО, производится на специальном участке помещения хранения перегрузочного оборудования АСММ.

В зависимости от уровня радиоактивного загрязнения и мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на расстоянии 0,1 м от поверхности, ТРО загружаются в разные сборники ТРО. Низкоактивные и среднеактивные ТРО загружаются в контейнеры ТРО, которые находятся в хранилище ОТВС и ТРО, которое расположено в помещении перегрузки ОТВС. В хранилище ОТВС и ТРО находятся 48 контейнеров ТРО, которые уложены в два штабеля, в каждом штабеле - по три яруса, в каждом ярусе - восемь контейнеров. Все контейнеры пронумерованы цифрами от «1» до «48». Для первичного сбора ТРО могут быть использованы пластиковые или бумажные мешки, которые затем загружаются в контейнеры ТРО. Контейнер ТРО состоит из корпуса и крышки, на корпусе контейнера приварены обухи, предназначенные для транспортировки контейнера. ТРО, отсортированные в соответствии с их классификацией по активности, физическим и химическим свойствам, методам

переработки размещаются в сборниках-контейнерах. В зависимости от предполагаемых методов переработки ТРО, размещаемых в сборник-контейнер, он маркируется с указанием метода переработки («на прессование», «на сжигание» и т.д.).

В местах расположения сборников-контейнеров, при необходимости, должно быть предусмотрено наличие защитных приспособлений для снижения дозовых нагрузок на персонал, осуществляющий обращение с ТРО.

После заполнения контейнера ТРО крышка контейнера обваривается или обматывается проволокой с пломбировкой закрутки. На контейнере закрепляется бирка на которую наносятся необходимые сведения в соответствии с требованиями СПОРО-2002)².

Мягкие низкоактивные отходы (спецодежда, протирочные салфетки и прочее) упаковываются в пластиковые мешки, которые после заполнения запаиваются и хранятся на стеллажах в помещении хранения низкоактивных ТРО АСММ. Масса мягких низкоактивных отходов в мешке не должна превышать 5 кг. На мешках закрепляется бирка с указанием порядкового номера мешка и других необходимых сведений в соответствии с требованиями СПОРО-2002. Высокоактивные нижние части гильз АЗ и ЭГ загружаются в пеналы гильз АЗ, которые находятся в хранилище ОТВС и ТРО, в количестве 6 штук, на боковой поверхности пробки пенала имеется порядковый номер пенала. В пенале имеется 14 ячеек для размещения нижних частей гильз со стержнями АЗ.

Высокоактивные нижние части гильз ТП загружаются в пеналы термометров, которые находятся в хранилище ОТВС и ТРО, в количестве 10 штук, на боковой поверхности пробки пенала имеется порядковый номер пенала. В пенале имеется 14 ячеек для размещения нижних частей гильз ТП. ПИНЫ, которые относятся в высокоактивным ТРО, загружаются в пенал ПИН, который находится в хранилище ОТВС и ТРО.

Пенал ПИН имеет девять ячеек для размещения ПИН. Отработавшая шихта фильтров 1 и 3 контуров реакторной установки, а также шихта фильтров хранилища ОТВС и ТРО загружаются в СОШ. При транспортировке СОШ к месту гидрорегулировки и обратно к месту хранения используется защитный контейнер. СОШ находятся в хранилище ОТВС и ТРО, в количестве 10 штук, каждый СОШ пронумерованы цифрами от «1» до «10». Отработавшая шихта фильтров 1 и 3 контуров загружается в СОШ в соответствии с документом «Система промывки, отмывки свежих ионитов и гидрорегулировка фильтров 1, 3 контуров. Техническое описание и инструкция по эксплуатации». Отработавшая шихта фильтров хранилища ОТВС и ТРО загружаются в СОШ в соответствии с документом «Система гидрорегулировки фильтров хранилища ОТВС и ТРО. Техническое описание и инструкция по эксплуатации». Также образующие на АСММ ТРО подлежат разделению на сжигаемые и несжигаемые.

К сжигаемым относятся спецодежда, ветошь, бумага, элементы вентиляционных фильтров, а также резиновые и полиэтиленовые материалы. К несжигаемым ТРО относятся: крупногабаритное оборудование реакторных установок (экранные сборки, выемные части насосов первого контура, трубные системы парогенераторов, арматура и т.д.); несжигаемые неметаллы (теплоизоляционные материалы, кабели, несжигаемые органические материалы (ПХВ, фторопласт), строительный мусор и др.) и металлические отходы; отработавшие ионообменные смолы фильтров первого и третьего контура; поврежденные или с истекшим сроком службы источники ионизирующего излучения; стекло и керамика; электрооборудование, электролампы и т.д. Хранение сжигаемых и несжигаемых ТРО производится отдельно.

Обращение с жидкими радиоактивными отходами

Комплекс технических средств по обращению с ЖРО, образующихся в процессе эксплуатации АСММ обеспечивает: организованный сбор дренажей из систем, обслуживающих РУ; организованный сбор радиоактивных вод из помещений; временное хранение ЖРО на АСММ и последующую их передачу на суда обеспечения или береговую техническую базу.

При эксплуатации АСММ образуются следующие виды ЖРО: малосолевые воды (дренажные воды 1-3 контуров); дезактивационные воды; воды охлаждения хранилищ ОТВС; воды санпропускника (в исключительных случаях); воды, образующиеся при гидрорегулировке фильтров 1 и 3 контуров.

ЖРО по источнику образования разделены на две группы: отходы, образующиеся при технологических операциях, проводимых непосредственно на РУ – контурные воды; отходы, образующиеся при операциях, связанных с дезактивацией – дезактивационные воды.

² Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Правила радиационной безопасности при эксплуатации атомных станций (ПРБ АС-99). М., 2000. 67 с.

Благодаря внедрению безотходной технологии, собственные ЖРО (контурные воды) РУ КЛТ-40С практически должны отсутствовать. Таким образом, основу ЖРО при эксплуатации РУ КЛТ-40С составляют дезактивационные воды. Среднее значение удельной активности ЖРО оценивается величиной 10^7 Бк/кг. Все ЖРО, образующиеся на АСММ, собираются в монжюсы.

На АСММ для сбора и хранения ЖРО предусмотрены следующие цистерны:

- в реакторном отсеке: 4 цистерны ЖРО «К» для сбора дезактивационных вод емкостью по 8 м^3 ; 4 цистерны ЖРО «Д» для сбора дезактивационных вод емкостью по 8 м^3 ; одна цистерна вод санпропускника емкостью $10,8 \text{ м}^3$.

- в перегрузочном отсеке: одна цистерна вод дезактивации помещений емкостью $45,2 \text{ м}^3$; одна цистерна вод дезактивации оборудования № 1 (кислотная) – $43,9 \text{ м}^3$; одна цистерна вод дезактивации оборудования № 2 (щелочная) – $43,9 \text{ м}^3$.

Общий запас емкостей для ЖРО на АСММ составляет: малосолевые воды – 32 м^3 ; воды дезактивации оборудования – 88 м^3 ; воды дезактивации помещений КЗ – $77,2 \text{ м}^3$.

Эти объемы позволяют осуществлять сбор и хранение ЖРО, образующихся за весь межремонтный период без их вывоза или переработку по месту эксплуатации. Передача ЖРО из одной цистерны в другую, а также выдача ЖРО за пределы АСММ производится только принудительно (с помощью электронасосов герметичного исполнения либо сжатого воздуха). Удаление ЖРО на другое судно или на берег осуществляется посредством съемных коммуникаций, исключающих протечки ЖРО. Оборудование поста выдачи ЖРО препятствует разливу ЖРО при перекачке или при аварийных ситуациях, связанных с повреждением коммуникаций. Предусмотрены быстрозапорные разобщительные устройства для срочного перекрытия трубопроводов при разрыве или самопроизвольном разъединении съемных коммуникаций.

Возможные аварийные ситуации с учетом степени, характера, масштаба экологических последствий, мер по предупреждению, мер по обеспечению готовности к ликвидации аварий, включая описание противоаварийных мероприятий

Перечень исходных событий проектных аварий и перечень запроектных аварий сформирован на основе имеющихся перечней для прототипной установки КЛТ-40 с учетом изменений в составе систем РУ КЛТ-40С, опыта проектирования и эксплуатации судовых ЯЭУ и реакторных установок для АЭС [5].

Рассмотрены аварийные режимы с изменением реактивности, нарушением теплоотвода от РУ и циркуляции теплоносителя через активную зону, аварии с потерей теплоносителя первого контура, аварии на остановленном реакторе, аварии при перегрузке и ремонтных работах, нарушения при обращении с ядерным топливом и РАО, потеря источников энергоснабжения, проведен анализ внутренних (пожары, затопления и запаривания помещений) и внешних воздействий на АСММ. Рассмотрение аварийных режимов и проектных аварий проводится с учетом функционирования предусмотренных в проекте систем безопасности и наложения регламентированного числа отказов в соответствии с требованиями нормативных документов.

Используется консервативный проектный подход, согласно которому анализ аварии выполняется для наиболее неблагоприятного исходного состояния с учетом отклонений при работе регуляторов, исходя из пессимистических допущений относительно эффективности систем безопасности и оборудования. При рассмотрении запроектных аварий, характеризующихся наложением дополнительных (сверх единичного) отказов, постулируются отказы в системах безопасности: системах управления реактивностью, системах теплоотвода и системах локализации. Сочетания отказов выбираются из условия усугубления протекания аварийного процесса. Во всех проектных предаварийных ситуациях, связанных с изменением реактивности, распределения энерговыделения в активной зоне и увеличением теплоотвода предотвращение отклонения параметров за допустимые значения обеспечивается свойствами внутренней самозащищенности реактора или системой регулирования; или использованием предусмотренных в проекте управляющих и защитных систем безопасности, которые вводятся в действие по параметрам различной физической природы [6].

Определяющей с точки зрения радиационных последствий проектной аварией является авария разрыва трубки теплообменника 1-3 контуров. В данной аварии в окружающую среду поступит $4,3 \cdot 10^{11}$ Бк ИРГ, $7,0 \cdot 10^{10}$ Бк изотопов йода, $3,7 \cdot 10^8$ Бк йода-131 и $5,7 \cdot 10^7$ Бк цезия - 134,137. Дозы облучения критической группы населения при наименее благоприятных метеорологических условиях значительно ниже уровней, при которых, в соответствии с НРБ-99/2009, требуется проведение защитных мероприятий по ограничению облучения населения. Эффективная доза облучения населения за первый год после аварии составит $0,6 \text{ мЗв}$, что значительно ниже

регламентируемой СП-АТЭС-2003 эффективной годовой дозы 5 мЗв. Доза облучения персонала в ЦПУ для одной смены за первые 4 часа не превышает $3,3 \cdot 10^{-3}$ мЗв, за 30 суток – $3,6 \cdot 10^{-3}$ мЗв, что значительно ниже максимального годового предела дозы для персонала группы А 50 мЗв.

В классе аварий с разгерметизацией первого контура наихудшие радиационные последствия на местности имеет запроектная авария разрыва парового трубопровода-коллектора парогенератора с не закрытием локализирующей арматуры второго контура.

Выброс активности в окружающую среду составит $2,1 \cdot 10^{13}$ Бк ИРГ, $8,6 \cdot 10^{11}$ Бк йодов, $5,0 \cdot 10^9$ Бк йода-131 и $9,0 \cdot 10^7$ Бк цезия-134,137. Дозы облучения критической группы населения при наименее благоприятных метеорологических условиях не превышают уровней, при которых, в соответствии с НРБ-99/2009, требуется проведение защитных мероприятий по ограничению облучения населения.

Доза облучения персонала в ЦПУ для одной смены за 30 суток составит $6 \cdot 10^{-8}$ мЗв, что значительно ниже годового предела дозы облучения персонала (20 мЗв/год). Эффективная доза облучения персонала за 30 суток за бортом АСММ составит $2,5 \cdot 10^{-3}$ мЗв, что значительно ниже регламентируемой НРБ-99/2009 планируемой дозы облучения при ликвидации аварии 100 мЗв.

В классе аварий на остановленном реакторе и при обращении с топливом наихудшие радиационные последствия на местности имеет запроектная авария падения контейнера с ОТВС с высоты 12 м. Выброс активности в окружающую среду составит $4,5 \cdot 10^{14}$ Бк ИРГ, $5,1 \cdot 10^{11}$ Бк йодов, $4,0 \cdot 10^{11}$ Бк йода-131 и $1,6 \cdot 10^{11}$ Бк цезия-134,137. Дозы облучения критической группы населения (детей) при наименее благоприятных метеорологических условиях на расстояниях, больших 130 м от АСММ, не превышают уровней, при которых, в соответствии с НРБ-99/2009, требуется проведение защитных мероприятий по ограничению облучения населения.

Анализ запроектной аварии с потерей теплоносителя первого контура РУ КЛТ-40С, сопровождающейся тяжелым повреждением (расплавлением) активной зоны (тяжелая авария).

Результаты анализа радиационных последствий показали следующее: размер зоны планирования защитных мероприятий определяется поглощенной дозой облучения щитовидной железы за первые 10 суток и не превышает 1 км; вне зоны планирования защитных мероприятий необходимо установить временные ограничения на потребление отдельных продуктов местного производства и дикорастущих плодов и ягод, выращенных в зоне радиусом до 13 км от места выброса; зона планирования мероприятий по обязательной эвакуации населения отсутствует. Размер зоны планирования защитных мероприятий не более 1 км при тяжелой аварии РУ КЛТ-40С отвечает современным отечественным и международным требованиям по безопасности АС.

Анализ происшествий, вызванных внешними воздействиями на АСММ, взрывами и пожарами на борту, показал в целом высокую степень безопасности АСММ. Ядерная и радиационная безопасность АСММ обеспечена в случае всех проектных аварий, вызванных внешними воздействиями.

Радиационные последствия в виде поступления ЖРО и теплоносителя первого контура в морскую среду возможны при следующих запроектных авариях, вызванных внешними воздействиями: таран АСММ в район реакторного отсека или хранилищ ОТВС и ТРО другим судном, скорость которого существенно больше критической; длительная посадка АСММ на скалистую отмель в штормовых условиях.

В случае запроектной аварии с затоплением АСММ на глубинах более 200 м при ударе о грунт возможно разрушение корпусных конструкций судна, хранилища ОТВС, защитного ограждения, ЗО, разгерметизация первого контура с последующим выходом продуктов деления из активных зон в морскую среду.

Мгновенный сброс радиоактивных вод из всех цистерн ЖРО и баков хранилищ ОТВС не представляет заметной экологической опасности вследствие непродолжительного существования пятна загрязнения. Максимальные радиус загрязнения составляет 2,34 км. Время существования пятна загрязнения не превосходит 1,5 суток.

Отдельного внимания заслуживает надежность трубной системы парогенераторов ПАЭС. Проведенный авторами анализ безопасности прототипов АСММ показал, что на протяжении более чем, 40 лет происходят течи выемной трубной системы парогенераторов (от 10 до 27 инцидентов в год). У прототипов для борьбы с такими нарушениями использовалось глушение трубок или замена самих парогенераторов в заводских условиях. К сожалению, доступная информация не разъясняет, как подобные нарушения будут ликвидироваться в условиях эксплуатации АСММ.

Проведенный анализ опыта эксплуатации прототипов ПАЭС и проектной документации показывают, что принятые проектно-конструкторские решения, использован-

ная нормативная база, консервативный подход в формировании пределов и функции безопасности на всех этапах разработки, создания, транспортировки и эксплуатации плавучей атомной энергоустановки обеспечивают надежную основу для обеспечения ее ядерной и радиационной безопасности как в период штатной эксплуатации так и в случаях проектных и запроектных аварий. Анализ подтверждает выводы Росатома по оценке установки как отвечающей высоким требованиям ядерной и радиационной безопасности. Однако, необходимо учитывать, что использованные при создании ПАЭС нормы и требования разработаны применительно к условиям стационарных АЭС и атомных судов, в первую очередь для ледоколов и лихтеровоза. Специальной российской нормативной базы, учитывающей особенности ПАЭС, как и международных правил и рекомендаций, пока не создано. Росатому РФ, параллельно с набором опыта эксплуатации референтного атомного плавучего энергоблока, необходимо разработать адекватную нормативную базу.

Выводы

1. С развитием ядерных технологий, разработкой судовых ядерных реакторов с лучшими экономическими показателями и более высоким уровнем безопасности, с соблюдением национальных и международных норм ядерной и радиационной безопасности и опираясь на опыт эксплуатации атомного ледокольного флота и судовых ЯППУ ВМФ, можно ожидать, что принятые при проектировании ПАЭС технические решения обеспечивают соблюдение национальных и международных норм ядерной и радиационной безопасности, опираются на длительный опыт эксплуатации отечественного атомного ледокольного флота. что функционирование ПАЭС не приведет к нарушению радиозэкологического равновесия в прибрежных и морских экосистемах в процессе ее длительной эксплуатации, а также к облучению персонала и населения выше рекомендуемых норм как при нормальной эксплуатации ПАЭС, так и в случае проектных и запроектных аварий.

2. Декларируемый в проекте ПАЭС с КЛТ-40С уровень ядерной, радиационной и экологической безопасности соответствует национальным нормам и правилам. Доза облучения персонала и населения при нормальной эксплуатации не превысит пределов, установленных национальными и международными санитарными нормами. Обращение на ПАЭС с ТРО и ЖРО соответствует отечественным и международным требованиям по безопасности на объектах атомной энергетике.

3. В настоящий момент в регионе Северного морского пути отсутствует система государственного радиационного и экологического мониторинга. Более чем, за 60-летний период функционирования атомного ледокольного флота и атомных подводных лодок не была создана необходимая инфраструктура в портах СМП для аварийного захода судов с ядерной энергетической установкой. Концерн «Росэнергоатом» до сих пор не ввел в действие систему объектового радиационного мониторинга плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» в г. Певек. Для устранения подобной ситуации необходимо создать систему радиационного мониторинга, целью которой являлся контроль обстановки, а также информационная поддержка органов государственной власти и управления. Среди основных целей ее функционирования являются следующие: совершенствование государственного контроля радиационной обстановки на территории АЗРФ для его приведения в соответствие с требованиями действующего законодательства; оперативное обеспечение органов государственной власти, местного самоуправления, территориальных органов, осуществляющих контроль и надзор радиационной безопасности, общественных организаций и населения информацией о текущем и ожидаемом состоянии радиационной обстановки, фактах, характере, масштабах и последствиях ее изменения; оперативное обеспечение Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций информацией, необходимой для защиты населения в связи с чрезвычайными радиационными ситуациями на территории АЗРФ; информационная поддержка и выработка рекомендаций для принятия управленческих решений в связи с фактическими или прогнозируемыми изменениями радиационной обстановки на территории АЗРФ.

4. В соответствии с изменениями в законе «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» № 68 от 21.12.1994 г. защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций федерального характера относится к полномочиям Правительства РФ, межмуниципального и регионального — органов государственной власти субъектов Российской Федерации и местного самоуправления. Изменения в законодательстве заставляют по-новому рассмотреть ситуацию с аварийным реагированием и радиационным мониторингом в связи с расширением полномочий и информирования территориальных органов власти. Ранее вопросы аварийного реагирования при радиационных авариях были компетенцией

исключительно ГК «Росатом» или федеральных органов исполнительной власти. В новой ситуации территориальные органы исполнительной власти должны в значительной степени полагаться на свои собственные силы.

5. В части нарушения технологических процессов следует продолжить исследования, направленные на минимизацию коррозионных повреждений теплообменных труб парогенераторов.

Список литературы:

1. Трутнев В.А., Симикин В.Ю., Осипов В.А. Отчет по экологической безопасности ПАТЭС за 2020 год. Певек. 2021. 22 с.
2. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2003 году. Ежегодник. Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Медиаагентство Росгидромета. Обнинск. 2022. 350 с.
3. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 г. Москва. 2022. С. 408.
4. Трутнев В.А., Симикин В.Ю., Осипов В.А. Отчет по экологической безопасности ПАТЭС за 2021 год. Певек. 2022. 21 с.
5. Атомная теплоэлектростанция малой мощности на базе плавучего энергоблока с реакторными установками КЛТ-40 С (Обращение с радиоактивными отходами). СПб.: ОАО ЦКБ «Айсберг», 2001. 87 с.
6. Кузнецов В.М. // Плавучие АЭС России. 2-е изд. доп. и пер. М.: Агентство Ракурс Продакшн. 2001. 111 с.

References:

1. Trutnev V.A., Simikin V.Yu., Osipov V.A. PATPP Environmental Safety Report 2020. Pevek, 2021, 22 p.
2. Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2003. Yearbook. Ed. by S.M. Vakulovskiy. Moscow: Media Agency of Roshydromet, 2022, 350 p.
3. Annual Report on Activity of Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision in 2021. Moscow, 2022, p. 408
4. Trutnev V.A., Simikin V.Y., Osipov V.A. Report on ecological safety of PATES for 2021. Pevek, 2022, 21 p.
5. Small-capacity nuclear power plant based on a floating power unit with КЛТ-40 С reactor units (Radioactive Waste Management). SPb, JSC Central Design Bureau "Aisberg", 2001, 87 p.
6. Kuznetsov V.M. // Floating NPPs of Russia. 2nd edition, revision. Moscow, Rakurs Production Agency, 2001, 111 p.

Научная статья

УДК 528.88

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-27-36



EDN: JXOUBF

Для цитирования:

Гурулев А.А., Орлов А.О., Казанцев В.А., Козлов А.К. [и др.] Обнаружение выхода газа в озере Шакшинское (Забайкальский край) дистанционными методами // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 4. С. 27-36. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-27-36>

Получена: 27.10.2023
Принята: 07.11.2023
Опубликована: 13.11.2023

For citation:

Gurulev A.A., Orlov A.O., Kazantsev V.A., Kozlov A.K. [et al.] Detection of gas outlet in Lake Shakshinskoe (Trans-Baikal Territory) by remote methods. Russian Arctic, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 27-36. (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-27-36>

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫХОДА ГАЗА В ОЗЕРЕ ШАКШИНСКОЕ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ) ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

А.А. Гурулев* , А.О. Орлов , В.А. Казанцев , А.К. Козлов , С.В. Цыренжапов , Д.В. Середин 

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия

E-mail: *lgc255@mail.ru

Аннотация

Деградация многолетнемерзлых пород в Арктической зоне способствует активному выходу газов из недр Земли. Схожий процесс наблюдается и в умеренных широтах, например, в Забайкалье. В работе приведены результаты спутниковых и подспутниковых измерений на оз. Шакшинское, расположенного в Забайкальском крае. С искусственных спутников Земли в тепловом инфракрасном диапазоне в центре водоема в 2021 году в летний период времени было зафиксировано повышенное значение температуры на 3°C...4°C поверхностных вод водоема площадью около 0,07 км² при общей площади озера 52 км². Данный эффект связывается с обильным выходом газа из недр Земли, активному выходу которого ранее препятствовали многолетнемерзлые породы. По всей видимости произошло их подтаивание. В марте 2022 г. были выполнены натурные измерения аномальной области водоема, которые заключались в изъятии проб газа из подо льда для проведения его химического анализа и в радиометрических исследованиях ледяного покрова в микроволновом диапазоне. Результаты показали, что данный газ содержит азот (до 98%), а также некоторые тяжелые углеводороды. Значение радиояркостной температуры ледяного покрова в сантиметровом диапазоне длин волн в данной области имело повышенное значение, что связывается с наличием большого количества газовых включений в ледяном покрове, которые захватывались в момент его становления.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пресный ледяной покров, выход газа, микроволновый диапазон, инфракрасный диапазон, тепловое излучение

DETECTION OF GAS OUTLET IN LAKE SHAKSHINSKOE (TRANS-BAIKAL TERRITORY) BY REMOTE METHODS

A.A. Gurulev* , A.O. Orlov , V.A. Kazantsev , A.K. Kozlov , S.V. Tsyrenzhapov , D.V. Seredin 

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

E-mail: *lgc255@mail.ru

Abstract

The degradation of permafrost in the Arctic zone contributes to the active release of gases from the bowels of the Earth. A similar process is observed in temperate latitudes, for example, in Transbaikalia. The paper presents the results of satellite and subsatellite measurements on the lake. Shakshinskoe, located in the Trans-Baikal Territory. From artificial Earth satellites in the thermal infrared range in the center of the reservoir in 2021, in the summer period, an increased temperature value of 3°C ... 4°C of the surface waters of the reservoir with an area of about 0.07 km² with a total lake area of 52 km² was recorded. We associate this effect with the abundant release of gas from the bowels of the Earth, the active release of which was previously prevented by permafrost rocks. Apparently, their melting took place. In March 2022

full-scale measurements of the anomalous area of the reservoir were performed, which consisted of: taking gas samples from under the ice to conduct its chemical analysis; radiometric studies of the ice cover in the microwave range. The results showed that this gas contains nitrogen (up to 98%) and some heavy hydrocarbons. The value of the radio brightness temperature in the centimeter wavelength range of the ice cover in this area was of increased importance, which is associated with the presence of an increased content of gas inclusions in the ice cover, which was captured at the time of its formation.

Keywords: remote sensing, fresh ice cover, gas output, microwave range, infrared range, thermal radiation

Введение

Как известно, в Арктике скорость повышения среднегодовой температуры, начиная с 70-х годов выше в два с половиной раза, чем глобальный рост температуры Земли [1]. Данный факт приводит к резкому уменьшению площади ледяного покрова в Арктической зоне. Так, за последние сорок лет его площадь (сентябрьский лед) уменьшилась на 40% [2]. Последствием этого явилось активное таяние многолетнемерзлых грунтов [3], которое приводит, в частности, к увеличению притока пресной воды в акваторию Обской губы [4]. Причем данный процесс наблюдается во всей Арктике [5].

Опреснение Обской губы связывается с деградацией многолетнемерзлых пород, которое происходит из-за глобального повышения температуры приземного слоя атмосферы. Следует отметить, что подводная мерзлота деградирует быстрее, чем многолетнемерзлые породы на суше [6]. В работе [7] показано, что в российской Арктике она деградирует со средней скоростью 14 см в год за последние 30 лет по данным полученным путем анализа кернов, изъятых из под вод северных морей. Скорость уменьшения мерзлоты в подводной части Арктической зоны превышает скорость таяния мерзлоты на суше почти в два раза. При деградации мерзлотных пород происходит выделение газов, в том числе и метана, в результате чего в Арктическом регионе концентрация метана в приземном слое атмосферы выше на 8%...10% [8], чем в других регионах Земли. В морях Восточной Арктики потоки метана в атмосферу соизмеримы с его потоками из акватории всего Мирового океана [9].

Газ может выходить из земных недр не обязательно постепенно - его выход может иметь взрывной характер. О данном факте говорит большое количество воронок, которые обнаружены на полуострове Ямал [10]. О том, что данный процесс носит взрывной характер, свидетельствует разброс грунта на некоторое расстояние от воронки [11]. Подтверждение выхода газа, в результате которого образуются воронки, было сделано в большом количестве исследований [12]. В этих исследованиях были выполнены натурные измерения по наличию углеводородных газов в средах, расположенных рядом с образовавшимися воронками.

Многолетнемерзлые породы Арктического региона простираются до 50° северной широты. Не является исключением и Забайкальский край, где существуют многолетнемерзлые и сезонноталые почвенные покровы, данный факт отражен в работе [13]. В частности, в последнее время происходит деградация островковой мерзлоты и в городе Чита. Описанное явление в Забайкальском крае на данный момент активно не исследуется, что видно по отсутствию научных результатов по данной проблематике.

Материалы и методы

Для исследования деградации подводных многолетнемерзлых пород было выбрано озеро Шакшинское, расположенное в Забайкальском крае в 40 км от г. Чита. Глубина данного водоема достигает пяти метров. Водоем является пресным с минерализацией исходных вод около 120 мг/л и из-за относительно небольшой его глубины - эвтрофированным. Площадь водного зеркала составляет 52 км². В зимний период времени озеро покрывается ледяным покровом, толщина которого в весенний период времени может достигать 150 см, с минерализацией льда около 2 мг/кг в конце зимнего периода времени. Внутри данного объекта присутствуют различного рода примеси (фрагменты высшей водной растительности, газовые включения и т.п.), которые захватываются в момент его становления. Снежный покров на ледяном покрове не превышает 15 см в центре водоема.

В центре оз. Шакшинское наблюдается выход газа, который был обнаружен при исследовании мощности теплового излучения ледяного покрова данного водоема с самолета, что отражено в работе [14]. Затем за этим «пятном» активно велись

наблюдения [15]. В августе 2021 году оно активизировалось и стало «проявляться» при различных методах исследований, в частности, на космических изображениях. Активизация выхода газа нами связывается с деградацией многолетнемерзлых пород, находящихся под дном озера.

Для исследования деградации мерзлоты под водоемом нами были проанализированы спутниковые снимки в видимом диапазоне со спутников Landsat-8, Sentinel-2 и Канопус-В. Исследовались снимки в момент отсутствия ледяного покрова, т.е. в летнее время и ранней осенью. Видимый диапазон позволяет решать ряд задач, связанных с процессами, происходящими в водоеме, в частности, путем использования сканера цвета, можно регистрировать концентрацию хлорофилла [16], который также можно зафиксировать по космоснимкам на оз. Шакшинское. При выходе газа со дна озера будет наблюдаться изменение концентрации хлорофилла в данном месте, что фиксируется с помощью космоснимков в видимом диапазоне, даже после активной фазы газирования. Для анализа температуры водной поверхности озера использовался тепловой инфракрасный диапазон данных спутников. По мощности теплового излучения на длинах волн 10...14 мкм определяется температура поверхностного слоя воды в микронном слое. Для анализа наличия метана в атмосфере над водной поверхностью использовался ближний инфракрасный диапазон, находящийся в области длин волн 3...6 мкм.

Ледяной покров является индикатором состояния водного объекта. В течение времени своего существования он накапливает различного рода примеси из окружающей среды, как из атмосферы, так и из воды. Оптимальным методом дистанционного исследования представленного объекта является радиометрический метод в микроволновом диапазоне. Суть метода заключается в регистрации собственного теплового излучения, например, в сантиметровом диапазоне. Данное излучение формируется в слоях достаточно большой толщины пресного ледяного покрова, в отличие от миллиметрового диапазона, и таким образом можно определять включения внутри исследуемого объекта [17]. Так в работе [14] показано, что с помощью радиотеплового излучения ледяного покрова на оз. Шакшинское выявляются области выхода газовых включений и высшая водная растительность, вмороженная в лед.



Рисунок 1. Фотография радиометрического комплекса на длины волн 2,3 см, 3 см, 5,6 см, установленного на автомобиль

Для решения поставленной задачи мы использовали радиометрическую аппаратуру, установленную на автомобиль. Фотография установки показана на рисунке 1. Исследования были выполнены на длинах волн 2,3 см, 3 см и 5,6 см. Измерения выполнялись на вертикальной поляризации. Угол наблюдения составлял 45°. Калибровка приборов осуществлялась по отраженному от металлического листа излучению безоблачного неба и излучению эталона черного тела в этом диапазоне длин волн. Запись сигналов с радиометров осуществлялась на систему сбора данных фирмы «Agilent». В результате нами были выполнены трассовые записи радиояркостной температуры ледяного покрова, характеризующей мощность теплового излучения.

Для анализа газа выходящего с глубины водоема в зимний период времени, был осуществлен отбор проб 12 марта 2022 года по следующей методике. На глубину 2 метра от поверхности (верхнего слоя ледяного покрова) помещалась воронка с закрепленной на ней емкостью, заполненной водой. При выходе газа со дна водоема пузырь с газом поднимался вверх, попадал в воронку, а затем и в емкость, вытесняя из нее часть воды. Через сутки после установки для сбора подледного газа производилась выемка емкости на поверхность ледяного покрова. Взятие проб было выполнено непосредственно в области активного выхода газа (в области «пятна»), а также в местах, где по ранее выполненным исследованиям данного водоема происходил выход газа на поверхность воды в результате разложения органического вещества в донных отложениях. Затем пробы газа были направлены для газохроматографического анализа на 22 компонента в ООО ПГК «Сибгеоком» в г. Иркутск.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа космических снимков оз. Шакшинское были получены следующие факты. В августе 2021 года на исследуемом водоеме на космоснимках в видимом диапазоне наблюдалось явление, похожее на выход газа (рис. 2а). Это явление было зафиксировано на изображениях в виде белого пятна в центре водоема, которое имело форму «запятой». Ассоциация пятна на оз. Шакшинское с выходом газа, связана со схожестью изображений данного явления в морях. Например, с тем, что было обнаружено при выходе газа в Балтийском море в конце сентября 2022 года на трубопроводах «Северный поток» и «Северный поток-2» в результате чрезвычайного происшествия, во время которого произошла утечка газа в окружающую среду – на рисунке 2б.

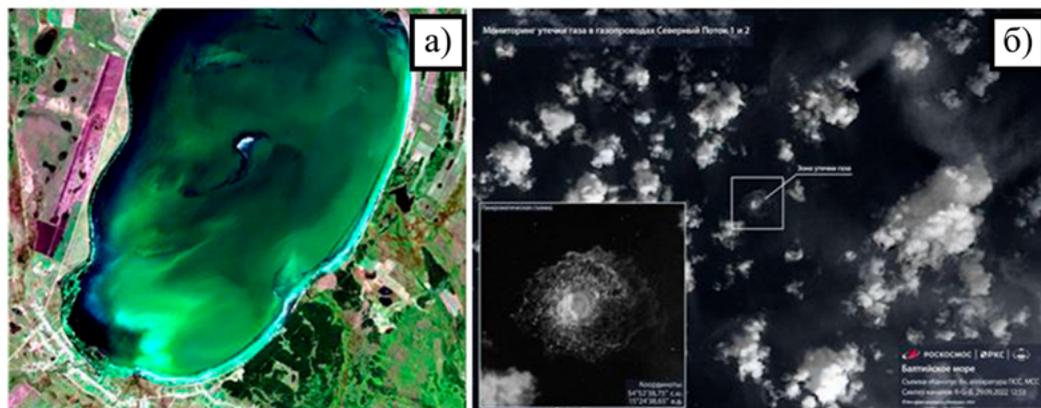


Рисунок 2. а) озеро Шакшинское. Спутник – Sentinel-2. Комбинированный RGB. 29 августа 2021 года; б) утечка газа из трубопровода "Северный поток". Спутник – "Канопус-В". 29 сентября 2022 года. Снимок опубликован в telegram-канале Госкорпорации «Роскосмос»¹

Следует отметить, что анализ снимков оз. Шакшинское за другие годы, в том числе и в 2022 и 2023 гг. не выявил эффекта такой интенсивности газоотделения, который был зафиксирован в августе 2021 года.

При разрушении ледяного покрова на исследуемом водоеме (май 2021 г.) первоначальное разрушение ледяного покрова наблюдалось вблизи «запятой», что показано на снимке, выполненном с космического аппарата «Канопус-В-ИК» в панхроматической съемочной системе (ПСС), в спектральном диапазоне 0,54...0,86 мкм 19 мая 2022 года (рисунок 3).

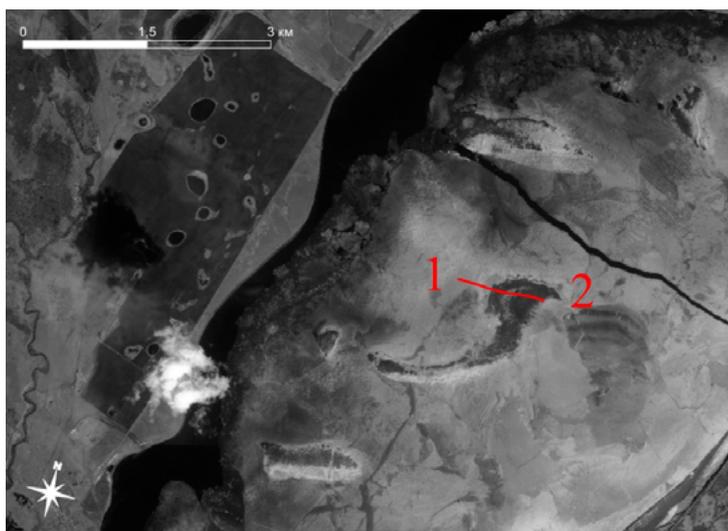


Рисунок 3. Космоснимок оз. Шакшинское в панхроматическом режиме. Дата: 19 мая 2022 год. 1-2 трасса для измерения мощности радиотеплового излучения

В результате наземных радиометрических исследований ледяного покрова оз. Шакшинское с использованием микроволновых радиометров было обнаружено

1 https://t.me/roscosmos_gk/6920

повышение радиоярких температур в месте выхода газа в виде «запятой», что показано на рисунке 4 на дистанции от 300 м до 550 м. Трассовая запись была осуществлена по треку 1-2, показанному на рисунке 3.

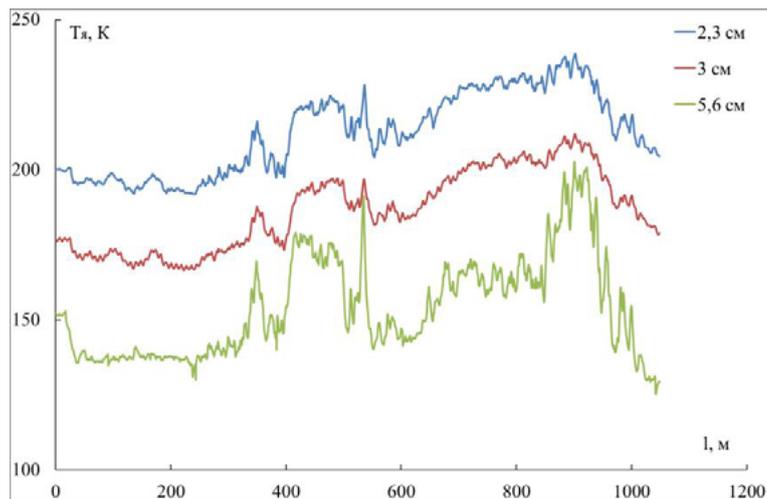


Рисунок 4. Трассовая запись радиоярких температур (ТЯ) на длинах волн 2,3 см, 3 см и 5,6 см через исследуемую область («запятая»). 17 марта 2022 г.

Как видно из приведенных графиков, существенных вариаций мощности радиотеплового излучения на дистанции 0...300 м практически не наблюдается. На этом участке ледяной покров не имеет ярко выраженных особенностей. На ледяном участке, где наблюдается «запятая», в ледяном покрове были визуально зафиксированы включения в виде пузырей и скопления органического вещества (вмерзшая в лед высшая водная растительность), которые и привели к существенному возрастанию радиоярких температур. Приращение ТЯ достигает 20 К на длине волны электромагнитного излучения 2,3 см и 30 К для длины волны 5,6 см. Некоторое увеличение радиояркой температуры в районе 900 м по трассе можно объяснить накоплением газовых пузырей в ледяном покрове [18]. Иногда выход газа подо льдом может создать под ледяным покровом куполообразную структуру, возникающую при механических деформациях льда, которая ранее была обнаружена на исследуемом водоеме [19]. При измерении уровня водной поверхности озера до верхнего слоя льда (измерения осуществлялись в лунке) было зафиксировано повышенное значение данной величины, что может говорить о наличии отмеченной выше куполообразной структуры. Это показано на рисунке 5 на участке ~ 900 м. По всей видимости, в результате наличия напряженного состояния льда под действием куполообразного образования ледяного покрова, образовались волны течения во льду, которые и привели к повышению мощности теплового излучения участка ледяного покрова в сантиметровом диапазоне. Ранее, обнаружение волн течения в пресном ледяном покрове было осуществлено по радиолокационным снимкам [20].

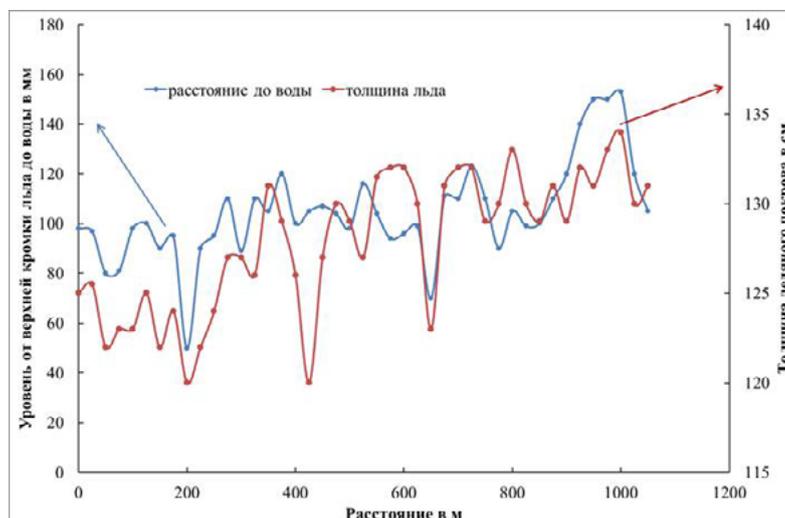


Рисунок 5. Изменение по трассе толщины ледяного покрова и уровня водной поверхности до верхнего слоя ледяного покрова. 16 марта 2022 г.

Следует отметить, что на месте «запятой» на ледяном покрове наблюдалось обильное присутствие высшей водной растительности вместе с корневой системой. Причиной её массового выброса на ледяную поверхность водоема мог быть кратковременный выброс газовой смеси со дна озера. Во время прорыва газа из недр Земли корневая система водной растительности теряла сцепление с почвой и вместе с газом поднималась на поверхность озера. Так как этот процесс наблюдался перед началом ледостава, то во время становления ледяного покрова происходил захват данных образований льдом. При этом процессе и происходило увеличение температуры участка водного объекта в виде «запятой», которое и фиксировалось в тепловом инфракрасном диапазоне с космических аппаратов. Повышение температуры воды в исследуемой области в зимний период времени не наблюдалось. Такой вывод был сделан по прямым измерениям температуры воды, находящейся подо льдом, а также в лунке по толщине льда, значение которой приведено на рисунке 5. Имеющиеся изменения толщины льда связаны с естественными ее вариациями, а именно со значениями толщины снега на ледяном покрове. При большей толщине снега ее величина минимальна, даже при относительно небольших вариациях толщины снежного покрова и плотности снега на исследуемом участке водоема.

Активное выделение газа прекратилось, по данным космосъемки, в конце сентября 2021 года, однако сам процесс газирования не прекратился, что позволило взять пробы донного газа. В результате анализов проб были получены результаты, которые представлены в таблицах 1 и 2. Пробы под номерами 1, 2 и 3 соответствовали точкам изъятия газа вне участка «запятой», ближе к берегу.

Таблица 1.

Результаты газохроматографического анализа газа, об%

№ п/п	Дата отбора	Название пробы	Вид пробы	Объем пробы (см ³)	Дата анализа	Содержание компонента, об %				
						бензол	толуол	этилбензол	м,п-ксилол	о-ксилол
1	21.03.2022	1	Газ	3	29.03.2022	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	1,36*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
2	21.03.2022	2	Газ	2	29.03.2022	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
3	21.03.2022	3	Газ	3	29.03.2022	<1*10 ⁻⁷	1,09*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	1,2*10 ⁻⁷
4	21.03.2022	4	Газ	5	29.03.2022	1,21*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
Показатель точности ±Δ, объемная доля %						-	-	-	-	-
НД на метод испытания						ПНД Ф 13.1:3.68-09				

Таблица 2.

Результаты газохроматографического анализа газа, об%

№ п/п	Дата отбора	Название пробы	Вид пробы	Объем пробы (см ³)	Дата анализа	Содержание компонента, об %															
						Не Гелий	H ₂ Водород	CO ₂ Ди-оксид угле-рода	O ₂ Кис-ло-род	N ₂ Азот	CH ₄ Метан	C ₂ H ₆ Этан	C ₂ H ₄ Этилен	C ₃ H ₈ Пропан	C ₃ H ₆ Пропи-лен	iC ₄ H ₁₀ Изобутан	nC ₄ H ₁₀ Н-бутан	C ₄ H ₈ Бутилен	iC ₅ H ₁₂ Изопен-тан	nC ₅ H ₁₂ Н-пентан	C ₆ H ₁₄ Гексан
1	21.03.22	1	Газ	3	29.03.22	<0,004	2,94*10 ⁻¹	<0,01	3,25	77,37	17,59	7,39*10 ⁻⁷	1,37	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	3,57*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	6,64*10 ⁻⁷	1,4*10 ⁻⁶
2	21.03.22	2	Газ	2	29.03.22	<0,004	<0,004	<0,01	24,31	75,54	<1*10 ⁻⁶	6,31*10 ⁻⁶	3,2*10 ⁻³	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	2,75*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<0,2	<1*10 ⁻⁷	6,53*10 ⁻⁷	1,11*10 ⁻⁶
3	21.03.22	3	Газ	3	29.03.22	<0,004	<0,004	<0,01	26,53	73,36	<1*10 ⁻⁶	7,63*10 ⁻⁶	3,08*10 ⁻³	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	5*10 ⁻⁷	<0,2	<1*10 ⁻⁷	1,39*10 ⁻⁶	1,25*10 ⁻⁶
4	21.03.22	4	Газ	5	29.03.22	<0,004	<0,004	<0,01	1,2	98,65	<1*10 ⁻⁶	7*10 ⁻⁶	2,77*10 ⁻⁴	9,54*10 ⁻⁷	2,47*10 ⁻⁵	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<0,2	3,57*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷	<1*10 ⁻⁷
Показатель точности ±Δ, объемная доля %						-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
НД на метод испытаний						СТО ИГ -026-2011															

Как видно из полученных данных, в особой точке на оз. Шакшинское в составе газа наблюдается аномально высокое значение концентрации азота ~98% и некоторых тяжелых углеводородов. Для проверки надежности данных нами были взяты повторные пробы газа по аналогичной методике в апреле 2022 года. Результаты были практически аналогичными предыдущим. Уровень азота в пробах был также высок (85%...93%). В ближнем инфракрасном диапазоне в области «запятой» было также отмечено увеличение уровня содержания метана в августе 2021 года. В конце сентября данного года метан над водной поверхностью уже отсутствовал, т.е. его

концентрация уменьшилась настолько, что сенсоры, находящиеся на космических аппаратах не зафиксировали его присутствия.

Причиной высокого содержания азота и углеродистых соединений в газовых пробах исследуемого участка озера, по всей видимости, являются не химические процессы, происходящие внутри донных осадков озера (разложение органики), а выход газа из недр Земли. В этом месте может быть расположено месторождение ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ и т.п.).

В районе Ивано-Арахлейских озер существуют многолетнемерзлые породы. Так вблизи населенного пункта Преображенка, находящегося в 15 км от исследуемого участка оз. Шакшинское были исследованы данные породы, что показано в статье [21]. Под действием климатических изменений, а именно потепления климата, по всей видимости, произошла деградация подводной мерзлоты и накопившийся под ней газ в августе 2021 года вышел наружу, что и было зафиксировано с помощью космического мониторинга Земли в видимом и инфракрасном диапазонах.

Выводы

Таким образом, в Забайкальском крае дистанционными методами было зафиксировано разрушение многолетнемерзлых пород находящихся под водной толщей озера Шакшинское.

1. Деградация мерзлоты фиксировалась по космоснимкам в видимом и инфракрасном диапазонах при выходе газовой смеси на водную поверхность водоема.

2. Пресный ледяной покров является индикатором состояния водного объекта и отражает процессы, происходящие внутри водоема. При захвате газов в ледяной покров они регистрируются микроволновыми методами.

3. Микроволновый радиометрический метод исследования пресных ледяных покровов является эффективным, так как по мощности теплового излучения можно судить о свойствах ледяного покрова и судить о наличии различного рода примесей в нем. Предлагаемый способ наиболее эффективен для областей с длительным существованием отрицательных температур, поскольку для его реализации необходим ледяной покров без признаков таяния. Небольшие количества воды во льду резко ухудшают его пропускающую способность в микроволновом диапазоне. Кроме того, как известно, микроволновое излучение достаточно слабо затухает в облачных образованиях, в отличие от излучений в оптическом диапазоне. Отличительные особенности делают микроволновые методы весьма удобными для использования в Арктике.

Список литературы:

1. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>.
2. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change // The Cryosphere Discuss. 2015. V. 9. P. 1077–1131. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-1077-2015>.
3. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)).
4. Тихонов В.В., Романов А.Н., Хвостов И.В., Алексеева Т.А., Синицкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской Губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199>.
5. Kokelj S.V., Kokoszka J., van der Sluijs J., Rudy A.C.A., Tunnicliffe J., Shakil S., Tank S.E., Zolkos S. Thawdriven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks // The Cryosphere. 2021. V. 15. No. 7. P. 3059–3081. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3059-2021>.
6. Paulla C.K., Dallimore S.R., Jinc Y.K., Caressa D.W., Lundstena E., Gwiazda R., Anderson K., Clark J.H., Youngblute S., Melling H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. V. 119. No. 12. P. e2119105119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>.

7. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature communications*. 2017. V. 8. P. 15872. <https://doi.org/10.1038/ncomms15872>.
8. Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Густафссон О., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Метан в поверхностных водах окраинных морей северной Евразии // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 465. № 4. С. 441. <https://doi.org/10.7868/S0869565215340149>.
9. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D., Leifer I., Rekant P. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the east siberian Arctic shelf // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Т. 115. № 8. С. 08007. <https://doi.org/10.1029/2009JC005602>.
10. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород - новый вид геокриологической опасности // *Геозология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2019. № 6. С. 30-41. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019630-41>.
11. Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования "Ямальский кратер" // *Криосфера Земли*. 2015. Т. XIX. № 4. С. 94-106.
12. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // *Криосфера Земли*. 2015. Т. 19. № 2. С. 15-25.
13. Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Географические закономерности летнего термического режима почв в Забайкалье // *География и природные ресурсы*. 2017. № 4. С. 105-113.
14. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Поляков С.В. Особенности радиояркости пресного ледяного покрова, содержащего газы включения // *Исследование Земли из космоса*. 1992. № 5. С. 13-21.
15. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 228-240
16. Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Оценка по спутниковым данным межгодовых и сезонных изменений температуры поверхности атлантического океана и концентрации хлорофилла в поверхностном слое в период 1998-2008 гг // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 1. С. 238-247.
17. Du J., Kimball J.S., Duguay C., Kim Y., Watts J.D. Satellite microwave assessment of northern hemisphere Lake ice phenology from 2002 to 2015 // *Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 47-63. <https://doi.org/10.5194/tc-11-47-2017>.
18. Бордонский Г.С., Золотарева Л.Н., Крылов С.Д. Оценка пространственного распределения высшей водной растительности по радиотепловому излучению ледяного покрова в СВЧ-диапазоне // *Исследование Земли из космоса*. 1994. № 3. С. 96-102.
19. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Особенности структуры пропарины в ледяном покрове, образованной выходами газа // *Лёд и снег*. 2018. Т. 58. № 3. С. 405-416.
20. Гурулев А.А., Бордонский Г.С., Орлов А.О. Регистрация автоволн пластического течения в ледяных структурах при радиолокационных измерениях // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 222-229.
21. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н., Станиловская Ю.В. Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // *Инженерная геология*. 2014. № 1. С. 40-64.

References:

1. Semenov V.A. Sovremennye issledovaniya klimata Arktiki: progress, smena koncepcij, aktual'nye zadachi [Modern studies of the Arctic climate: progress, change of concepts, actual tasks]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. [Izvestiya RAS. Physics of the atmosphere and ocean], 2021, vol. 57, no. 1, pp. 21-33. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>.

2. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change. *The Cryosphere Discuss*, 2015, vol. 9, pp. 1077–1131. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-1077-2015>.
3. Vasil'ev A.A., Gravis A.G., Gubar'kov A.A., Drozdov D.S., Korostelev YU.V., Malkova G.V., Oblogov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streleckaya I.D., Streleckij D.A., Ustinova E.V., SHirokov R.S. Degradaciya merzloty: rezul'taty mnogoletnego geokriologicheskogo monitoringa v zapadnom sektore rossijskoj Arktiki [Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the western sector of the Russian Arctic]. *Kriosfera Zemli [Cryosphere of the Earth]*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15-30. (In Russian). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)).
4. Tihonov V.V., Romanov A.N., Hvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinickij A.I., Tihonova M.V., SHarkov E.A., Komarova N.YU. Mezhdgodovye variacii sobstvennogo mikrovolnovogo izlucheniya Obskoj Guby v period ledostava i ih svyaz' s gidrologicheskimi i klimaticheskimi izmeneniyami regiona [Interannual variations of own microwave radiation of the Gulf of Ob during the ice age and their relationship with hydrological and climatic changes in the region]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 2021, vol. 18, no. 6, pp. 185-199. (In Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199>.
5. Kokelj S.V., Kokoszka J., van der Sluijs J., Rudy A.C.A., Tunnicliffe J., Shakil S., Tank S.E., Zolkos S. Thawdriven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks. *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, no. 7, pp. 3059–3081. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3059-2021>.
6. Paulla C.K., Dallimore S.R., Jinc Y.K., Caressa D.W., Lundstena E., Gwiazda R., Andersona K., Clarked J.H., Youngblute S., Mellingf H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, pp. e2119105119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>.
7. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskoy V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature communications*, 2017, vol. 8, pp. 15872. <https://doi.org/10.1038/ncomms15872>.
8. Kosmach D.A., Sergienko V.I., Dudarev O.V., Kurilenko A.V., Gustafsson O., Semiletov I.P., SHahova N.E. Metan v poverhnostnyh vodah okrainnyh morej severnoj Evrazii [Methane in the surface waters of the marginal seas of northern Eurasia]. *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2015, vol. 465, no 4, pp. 441. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0869565215340149>.
9. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D., Leifer I., Rekant P. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the east siberian Arctic shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, vol. 115, no 8, pp. 08007. <https://doi.org/10.1029/2009JC005602>.
10. Himenkov A.N., Sergeev D.O., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskij D.B. Vzryvnye processy v oblasti rasprostraneniya mnogoletnemerzlyh porod - novyj vid geokriologicheskoy opasnosti [Explosive processes in the field of permafrost propagation - a new type of geocryological hazard]. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]*, 2019, no. 6, pp. 30-41. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019630-41>.
11. Olenchenko V.V., Sinickij A.I., Antonov E.YU., El'cov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I. Rezul'taty geofizicheskikh issledovanij territorii geologicheskogo novoobrazovaniya "Yamal'skij krater" [Results of geophysical studies of the territory of the geological formation "Yamal crater"]. *Kriosfera Zemli [Cryosphere of the Earth]*, 2015, vol. XIX, no. 4, pp. 94–106. (In Russian).
12. Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Lejbman M.O., Zimin M.V., Homutov A.V. Geomorfologicheskie usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybrosa i dinamika etoj formy na central'nom YAmale [Geomorphological conditions for the formation of a gas emission funnel and the dynamics of this form in central Yamal]. *Kriosfera Zemli [Cryosphere of the Earth]*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 15-25. (In Russian).
13. Trofimova I.E., Balybina A.S. Geograficheskie zakonomernosti letnego termicheskogo rezhima pochv v Zabajkal'e [Geographical patterns of the summer thermal regime of soils in Transbaikalia]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2017, no. 4, pp. 105-113. (In Russian).
14. Bordonsky G.S., Krylov S.D., Polyakov S.V. Osobennosti radioyarkosti presnogo ledyanogo pokrova, sodержashchego gazovye vklyucheniya [Features of radio brightness of fresh ice cover containing gas inclusions]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Exploration of the Earth from space]*, 1992, no. 5, pp. 13-21. (In Russian).

15. Bordonskij G.S., Gurulev A.A., Orlov A.O., Cyrenzhapov S.V. Razlichie kartin radarnyh i radiometricheskikh izmerenij (na primere ledyanogo pokrova evtrofirovannogo ozera) [The difference between radar and radiometric measurements (on the example of the ice cover of a eutrophied lake)]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2014, vol. 11, no. 2, pp. 228-240. (in Russian).
16. Kopelevich O.V., SHeberstov S.V. Ocenka po sputnikovym dannym mezhdgodovyh i sezonnyh izmenenij temperatury poverhnosti atlanticheskogo okeana i koncentracii hlorofilla v poverhnostnom sloe v period 1998-2008 gg [Estimation by satellite data of interannual and seasonal changes in the Atlantic Ocean surface temperature and chlorophyll concentration in the surface layer in the period 1998-2008]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2010, vol. 7, no. 1, pp. 238-247. (in Russian).
17. Du J., Kimball J.S., Duguay C., Kim Y., Watts J.D. Satellite microwave assessment of northern hemisphere Lake ice phenology from 2002 to 2015. *Cryosphere*, 2017, vol. 11, pp. 47-63. <https://doi.org/10.5194/tc-11-47-2017>.
18. Bordonskij G.S., Zolotareva L.N., Krylov S.D. Ocenka prostranstvennogo raspredeleniya vysshej vodnoj rastitel'nosti po radioteplovomu izlucheniyu ledyanogo pokrova v SVCH-diapazone [Assessment of the spatial distribution of higher aquatic vegetation by radiothermal radiation of the ice cover in the microwave range]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space], 1994, no. 3, pp. 96-102. (in Russian).
19. Bordonskij G.S., Krylov S.D., Gurulev A.A., Orlov A.O., Cyrenzhapov S.V. Osobennosti struktury propariny v ledyanom pokrove, obrazovannoj vyhodami gaza [Features of the structure of the proparina in the ice cover formed by gas outlets]. *Lyod i sneg* [Ice and snow], 2018, vol. 58, no. 3, pp. 405-416. (in Russian).
20. Gurulev A.A., Bordonskij G.S., Orlov A.O. Registraciya avtovoln plasticheskogo techeniya v ledyanyh strukturah pri radiolokacionnyh izmereniyah [Registration of autowaves of plastic flow in ice structures with radar measurements]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2023, vol. 20, no. 3, pp. 222-229. (in Russian).
21. Vasil'chuk YU.K., Budanceva N.A., Vasil'chuk A.K., Chizhova YU.N., Stanilovskaya YU.V. Migracionnye bugry pucheniya v kriolitozone Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka [Migration heave mounds in the cryolithozones of Eastern Siberia and the Far East]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2014, no. 1, pp. 40-64. (in Russian).

Научная статья

УДК 528.88

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-37-44



EDN: BYBJLD

Для цитирования:

Чашчин М.В., Кайк Е.А., Зибарев Е.В., Никанова С.М.

[и др.] Оценка тяжести течения хронической марганцевой интоксикации у сварщиков судостроительных предприятий в проспективном исследовании // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 4. С. 37-44.

<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-37-44>

Получена: 07.10.2023

Принята: 10.11.2023

Опубликована: 15.12.2023

For citation:

Chashchin M.V., Kaik E.A., Zibarev E.V., Nikanova S.M. [et al.] Assessment of the manganese induced neurotoxicity among former shipyard welders in a prospective study. Russian Arctic, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 37-44. (In Russian).

<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-37-44>

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



ОЦЕНКА ТЯЖЕСТИ ТЕЧЕНИЯ ХРОНИЧЕСКОЙ МАРГАНЦЕВОЙ ИНТОКСИКАЦИИ У СВАРЩИКОВ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ПРОСПЕКТИВНОМ ИССЛЕДОВАНИИ

М.В. Чашчин^{1,2} * , Е.А. Кайк¹, Е.В. Зибарев⁴, С.М. Никанова⁴, Л.В. Макеева³, А.М. Чашчин¹, А.Г. Погорова³, А.В. Зеленкин³

¹ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³ Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Москва, Россия

E-mail: *max_chashchin@inbox.ru

Аннотация

В персонализированной медицине особую актуальность приобретают исследования, расширяющие подходы к изучению патофизиологических механизмов воздействия производственных факторов на организм человека. Целью настоящего исследования стала оценка неврологического статуса бывших сварщиков с хронической марганцевой интоксикацией в проспективном исследовании с применением современных методов психофизиологического тестирования. В исследовании приняли участие 27 пациентов с хронической марганцевой интоксикацией и 54 человека из группы контроля. Средний стаж работы в профессии сварщик составил 23,1 года. В повторном обследовании через 6 лет участвовали 63,0% сварщиков и 72,0% состава группы контроля. Причинами сокращения участников основной группы исследования стали: 7,4% случаев смерти, 14,8% случаев смены места жительства и 14,8% случаев отказа по состоянию здоровья. Объем обследования включал сбор анамнеза, осмотр врача-невролога и комплекс психофизиологических тестов. Анализ результатов пациентов показал, что у них с течением времени нарастает гипокинетический синдром. Показатели специального теста ухудшились на 31,9% от первоначальных значений ($p=0,004$). Интенсивность тремора рук у пациентов за период наблюдения увеличилась в 2 раза и составила для доминантной руки 0,15 и 0,30 м/сек² в 1-ом и 2-ом обследовании соответственно ($p<0,001$). Негативный тренд имели параметры дисперсии тремора рук. Установлено, что профессиональная марганцевая интоксикация имеет течение тяжелого нейродегенеративного заболевания со склонностью к прогрессированию после длительного прекращения контакта пациента с вредными производственными факторами. Ухудшение состояния здоровья пациентов связано с нарастанием тяжести проявлений гипокинетического синдрома. Другим прогностическим признаком нарастания патологических реакций является изменение параметров тремора рук. Полученные данные имеют большое научное и клиническое значение для применения методов персонализированной медицины в практике врача-профпатолога и невролога.

Ключевые слова: хроническая марганцевая интоксикация, психофизиологические тесты, неврологический статус, персонализированная медицина, сварщики, судостроение

ASSESSMENT OF THE MANGANESE INDUCED NEUROTOXICITY AMONG FORMER SHIPYARD WELDERS IN A PROSPECTIVE STUDY

M.V. Chashchin^{1,2*} , E.A. Kaik¹, E.V. Zibarev⁴, S.M. Nikanova⁴, Makeeva L.V.³, Chashchin A.M.¹, Pogolova A.G.³, Zelenkin A.V.³

¹ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia

² The Higher School of Economics, Moscow, Russia

³ North-West Public Health Research Center, St.-Petersburg, Russia

⁴ The Federal State Budgetary Scientific Institution "Izmerov Research Institute of Occupational Health", Moscow, Russia

E-mail: * max_chashchin@inbox.ru

Abstract

In personalized medicine, research that expands approaches to studying the pathophysiological mechanisms of welding exposure to manganese. The purpose of this study was to evaluate the manganese induced neurotoxicity of former welders with chronic manganese intoxication in a prospective study using modern methods of psychophysiological testing. The study involved 27 patients and 54 people from the control group. The average length of work experience as a welder was 23.1 years. 63.0% of welders and 72.0% of the control group participated in the re-examination after 6 years. 37% of patients did not take part in the re-examination because 7.4% of deaths, 14.8% of cases of change of residence and 14.8% of cases of refusal for health reasons. The scope of the examination included anamnesis collection, examination by a neurologist and a set of psychophysiological tests. Analysis of the patients' results showed that their hypokinetic syndrome increases over time. The performance of the special test worsened by 31.9% from the initial values ($p=0.004$). The intensity of hand tremor in patients increased by 2 times during the observation period and amounted to 0.15 and 0.30 m/sec² for the dominant hand in the 1st and 2nd examinations, respectively ($p<0.001$). The hand tremor dispersion parameters had a negative trend. It has been established that manganese intoxication has a course of severe neurodegenerative disease with a tendency to progress after a long-term cessation of welding exposure of manganese compounds. The deterioration of the patient's health is associated with an increase in the severity of the manifestations of hypokinetic syndrome. Another prognostic sign of an increase in pathological reactions is a change in the parameters of hand tremor. The data obtained are of great scientific and clinical significance for the application of personalized medicine methods in the practice of occupational health specialists and neurologists.

Keywords: manganism, psychophysiological tests, neurological status, personalized medicine, welders, shipbuilding

Введение

Новая Морская доктрина Российской Федерации, утвержденная указом Президента Российской Федерации от 31 июля 2022 года № 512, к жизненно важным районам обеспечения национальных интересов Российской Федерации в Мировом океане относит Арктический бассейн, в том числе акваторию Северного морского пути. Одним из приоритетных направлений доктрины является обновление специализированных флотов, включая ледокольный, аварийно-спасательный и другие флота. Особая роль в реализации этих планов принадлежит верфям города Санкт-Петербурга, где были созданы и спущены на воду самые передовые в мире атомные ледоколы проекта 22220: «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия» и «Чукотка», а также корабли военно-мор-

ского флота, обеспечивающие защиту морских границ Российской Арктики¹. Главной составляющей успеха судостроения города на Неве являются люди – профессионалы: инженеры, мастера и рабочие. На всех судостроительных предприятиях особое внимание уделяется мероприятиям, направленным на сохранение здоровья работников. Однако не всегда профилактические мероприятия оказываются эффективными. Согласно официальным данным, обрабатывающие производства, включая судостроение, занимают второе место в структуре показателей профессиональной заболеваемости в Российской Федерации по основным видам экономической деятельности [1]. Одним из наиболее инвалидизирующих профессиональных заболеваний, регистрируемых в сварочном производстве верфей, является хроническая марганцевая интоксикация (ХМИ) (код МКБ-10 T57.2) [2, 3]. Несмотря на значимость проблемы диагностики, лечения и профилактики этой болезни в научной литературе недостаточно исследований, посвящённых изучению тяжести течения и клиническим исходам ХМИ. В связи с этим целью исследования стала оценка неврологического статуса пациентов, страдающих хронической марганцевой интоксикацией профессиональной этиологии, в динамике с применением современных методов психофизиологического тестирования.

Материалы и методы

Программа научного проекта соответствовала перспективному исследованию. В качестве объектов методом рандомизации были выбраны 27 пациентов клиники профессиональных заболеваний ФБУН СЗНЦ гигиены и общественного здоровья, страдающих хронической марганцевой интоксикацией (код МКБ-10 T57.2), а также 54 человека из группы контроля, которые подбирались по принципу меченых пар, где каждому больному с ХМИ соответствовали два человека того же пола и возраста (+2 года). Средний стаж работы участников исследования в профессии сварщик, до момента установления диагноза профессионального заболевания и прекращения производственного контакта с соединениями марганца, составил 23,1 года, минимальный стаж - 15 лет, а максимальный - 30 лет. Группа контроля была сформирована из работников двух профессий (токари и слесари) одного предприятия. Данная группа подбиралась с учетом профессионального маршрута и с условием того, что в прошлом у участников проекта отсутствовал контакт с любым вредным производственным фактором, способным вызывать нарушения функции центральной нервной системы. Отбор в обе группы исключал участие в исследовании людей, принимающих препараты с психоактивными веществами или злоупотребляющих алкоголем. Исследование состояло из двух этапов: первый и второй этап обследования. Последний состоялся через 6 лет после первого. В нем приняли участие 17 пациентов с ХМИ (63% от ранее принявших участие) и 39 (72% от ранее принявших участие) человек из группы контроля. Уменьшение количества участников 2-го этапа исследования в основной группе было связано со следующими причинами: 7,4% человек умерли, 14,8% человек сменили регион постоянного места жительства и 14,8% человек отказались от участия по состоянию здоровья. В группе контроля по истечении 6 лет умерли 1,8% человек, 16,6% сменили место жительства и 9,2% человек отказались от дальнейшего участия. В таблице 1 представлена характеристика участников исследования.

Таблица 1.

Характеристика участников исследования

	Пациенты (сварщики) (n=27)	Контрольная группа (n=54)	p-значение
Возраст (лет)	49,9 (41-58)	47,5 (41-66)	-
Стаж работы в профессии (лет)	23,1 (15-30)	-	-
Образование (лет)	10,8 (4-16)	12,6 (9-19)	0,009
Курильщики (в %)	38	37	-
Алкоголь (л/год)	2,2 (0-56,2)	2,4 (0-35,4)	-
sCDT (%)	0,6 (0-9,3)	0,7 (0-6,6)	-
Средние концентрации Mn в крови	8,7 (5,2-19,1)	7,1 (3,8-14,3)	0,01

Объем обследования включал в себя сбор анамнеза с помощью специально разработанного опросника, осмотр врача-невролога и комплекс психофизиологических тестов, в том числе: тесты на скорость зрительно-моторной реакции и память (тест № 6); тесты на оценку эффективности мелкой моторики (тест № 1); динамометрию (тест № 3); тест на наличие брадикинии верхних и нижних конечностей (тест № 2 и № 4); 2 теста количественного измерения частоты и дисперсии тремора рук (тест № 5 и № 7),

тест на оценку постуральных колебаний тела (тест №8). Например, цифро-символьный тест состоял в том, чтобы участник перекодировал символы в цифры. При этом в качестве результата исследователь учитывал количество правильно записанных символов за 90 секунд, отведенных на выполнение теста. Арифметический тест заключался в регистрации максимального количества цифр, которые испытуемый повторял сразу после устного воспроизведения исследователем в том же или в обратном порядке. Тест на мелкую моторику и координацию движений рук проводился с использованием набора, который состоял из 25 металлических палочек и рифленной перфорированной платформы, содержащей отверстия размером 5x5 мм, размещенных под углом в различных направлениях. Перед участником стояла задача вставить все 25 палочек с максимальной скоростью. Результат манипуляции регистрировался исследователем в единицах времени. Тест на выявление симптома Крюше-Верже верхних и нижних конечностей проводился с помощью устройств, позволяющих зарегистрировать определенное количество нажатий на ручной или ножной рычаг за 10 секунд [4]. Участнику предоставляли возможность сделать два подхода, после чего исследователь записывал среднее арифметическое значение результата. В ранее проведенных исследованиях хорошо зарекомендовал себя один из тестов количественного измерения параметров тремора, где участнику предлагалось удерживать «металлическую палочку» в отверстии так, чтобы не касаться его краев. Процедура выполнялась последовательно с использованием девяти отверстий разного диаметра (от большего к меньшему). Результат теста выражался в количестве касаний и их длительности за 15 минут экспозиции [5]. Для более сложных тестов исследователи применили компьютерную диагностическую программу CATSYS, с помощью которой проводили регистрацию некоторых параметров функционального состояния центральной нервной системы, в том числе параметров тремора, оценку постуральных колебаний с открытыми и закрытыми глазами. Согласно действующим требованиям все участники подписали добровольное информированное согласие, а протокол исследования получил одобрение этического комитета ФБУН СЗНЦ гигиены и общественного здоровья. Анализ и обработка результатов научного проекта проводилась с помощью пакета статистических программ SPSS®, версия 25.0. Непрерывные переменные подвергались логарифмическому преобразованию, когда асимметрия распределения превышала 2,0. Для групповых сравнений непрерывных переменных использовался дисперсионный анализ (ANOVA) и парный t-критерий Стьюдента.

Результаты

В таблице 2 представлены результаты психофизиологического тестирования пациентов с хронической марганцевой интоксикацией. Установлено, что тест на мелкую моторику и координацию движения рук (тест №1) бывшие сварщики выполняли лучше, чем группа контроля. Различия сравниваемых показателей были статически значимы и составили для левой руки (недоминантной) при первом обследовании 71 секунду и 78 секунд при втором обследовании ($p < 0,01$).

Таблица 2.
Результаты психофизиологического тестирования пациентов с хронической марганцевой интоксикацией

Показатели		1-й этап обследования	2-ой этап обследования	p-значение
Тест 1 (сек.)	Доминантная рука	104 (63-284)	99 (71-194)	-
	Недоминантная рука	108 (77-303)	106 (72-249)	-
Тест 2 (п)	Доминантная рука	27,9 (3-55)	23,4 (5-48)	0,03
	Недоминантная рука	28,5 (2-53)	19,4 (6-40)	0,004
Тест 3 (кг)	Доминантная рука	33,5 (11-50)	31,2 (8-56)	-
	Недоминантная рука	30,7 (7-53)	29,0 (5-51)	-
Тест 4	Доминантная рука	29,5 (8-46)	24,4 (5-47)	-
	Недоминантная рука	26,5 (6-48)	23,7 (5-48)	-
Тест 5	Доминантная рука			
	Время (сек.)	20,0 (1,9-41)	32,0 (11-63)	0,004
	Количество (п)	334 (20-1136)	482 (161-1181)	0,02
	Недоминантная рука			
	Время (сек.)	22,7 (5,2-75)	34,5 (13-94)	0,03
	Количество (п)	299 (62-1121)	444 (171-946)	0,002

Показатели		1-й этап обследования	2-ой этап обследования	p-значение
Тест 6 (n)	Цифровая последовательность			
	Вперед	5,1 (4-8)	5,3 (4-9)	-
	Назад	3,3 (2-6)	3,3 (2-5)	-
	Цифровые символы	31,9 (17-48)	27,5 (9-44)	-
Анкета	Количество симптомов в вопроснике	12,6 (9-16)	13,8 (11-16)	0,006

Противоположный результат был получен при сравнении результатов теста №2 (постукивание указательным пальцем правой и левой руки). Средние показатели пациентов с ХМИ были оценены в 27,9 и 23,4 количества нажатий за единицу времени (КНЕВ) для доминантной руки на первом и втором этапе исследования соответственно ($p < 0,05$), а для недоминантной руки – в 28,5 и 19,4 КНЕВ соответственно ($p < 0,01$). Для лиц из контрольной группы статистически значимых различий между этими показателями установлено не было. Анализ параметров динамометрии (тест №3) показал схожий результат, что и тест №1. Значимое снижение силы кистевой сжатия за 6 лет было выявлено только в группе контроля. Для правой руки (доминантной) средний показатель кистевой силы уменьшился на 6,8%, а на левой руке на 7,4% ($p < 0,05$). Различий при сравнении результатов теста №4 выявлено не было. Тест на устойчивость рук (тест №5) продемонстрировал наличие значимых различий между первым и вторым обследованием в обеих группах, за исключением результатов испытания на доминантной руке у сварщиков, где значительно возросло время касания границ контакта, с 20.0 до 32.0 секунд ($p < 0,01$). Тест №6, заключающийся в запоминании цифровых символов и воспроизведение участниками числовой последовательности в прямом и обратном порядке, обеими группами был выполнен одинаково хорошо. Анализ результатов анкетирования показал, что количество симптомов, ассоциированных с нарушением когнитивных функций, в группе пациентов с ХМИ с течением времени увеличилось на 8,7% ($p < 0,01$). В таблице 2 представлены результаты исследования, полученные с помощью компьютерной диагностической программы CATSYS. Установлено, что интенсивность тремора рук у пациентов с ХМИ за период наблюдения увеличилась в 2 раза и составила для доминантной руки 0,15 и 0,30 м/сек² в 1-ом и 2-ом обследовании соответственно ($p < 0,001$).

Таблица 3.
Результаты измерения параметров тремора рук и оценки поструральных колебаний у пациентов с хронической марганцевой интоксикацией

Показатели		1-й этап обследования	2-ой этап обследования	p-значение
Параметры измерения тремора				
Тест 7	Доминантная рука			
	Интенсивность (м/сек ²)	0,15 (0,08-0,70)	0,30 (0,10-0,98)	0,001
	Центральная частота (Гц)	7,7 (4,8-11,6)	6,4 (3,0-8,9)	0,02
	Дисперсия (Гц)	2,7 (1,0-4,2)	2,1 (0,4-4,0)	0,01
	Недоминантная рука			
	Интенсивность (м/сек ²)	0,15 (0,08-0,33)	0,26 (0,10-0,90)	0,009
	Центральная частота (Гц)	7,6 (4,0-12,1)	6,4 (3,6-8,1)	0,02
Дисперсия (Гц)	3,2 (1,2-4,9)	2,7 (0,4-5,2)	-	
Анализ поструральных колебаний тела				
Тест 8	Глаза открыты			
	Интенсивность (мм)	6,0 (3,1-13,9)	7,4 (3,3-15,1)	0,04
	Устойчивость (мм/сек)	12,7 (6,0-24,7)	16,4 (7,8-47,6)	-
	Площадь (мм ²)	366 (104-1183)	676 (212-2720)	0,006
	Глаза закрыты			
	Интенсивность (мм)	10,5 (3,6-35,9)	12,0 (6,3-30,9)	-
	Устойчивость (мм/сек)	23,5 (11,8-71,1)	30,8 (11,7-98,1)	-
	Площадь (мм ²)	1127 (274-10872)	1552 (479-7108)	-

Негативный тренд имели параметры дисперсии тремора рук бывших сварщиков. Однако наблюдалось статистически значимое увеличение частоты центрального вектора тремора рук в обеих группах. Средние значения параметров поструральных колебаний всех участников исследования в тесте с открытыми глазами имели тенденцию к ухуд-

шению в динамике, а различия между характеристиками интенсивности и площади колебаний были статистически значимы. Результат теста с закрытыми глазами у сварщиков хотя и имел отрицательную динамику, но его значения не укладывались в 95 % доверительный интервал.

Обсуждение

Анализ результатов психофизиологического тестирования через 6 лет после первого обследования показал, что у пациентов с хронической марганцевой интоксикацией отмечается статистически значимое нарастание частоты симптома Крюше-Верже. Наибольшие патологические изменения выявлены при измерении физиологических параметров, выполняемых левой (недоминантной) рукой, когда характеристика теста, указывающего на одно из проявлений гипокинетического синдрома, ухудшилась на 31,9% и составила 28,5 КНЕВ в первом обследовании и 19,4 КНЕВ во втором ($p=0,004$). При этом в группе контроля за аналогичный период наблюдения этот показатель увеличился только на 3,8%, составив 41,7 КНЕВ и 40,1 КНЕВ соответственно. Результаты исследования показывают, что со временем у большинства пациентов происходит усиление тяжести течения заболевания и его прогрессирование в виде развития брадикаинизии, которое прямо не связано с увеличением возраста пациента. Полученные нами данные хорошо согласуются с другими исследованиями, в которых сообщалось об ухудшении неврологического статуса больных, страдающих интоксикацией марганца [3, 6]. Отдельного обсуждения требуют три клинических случая, в которых у пациентов клиники профессиональных заболеваний с нормальными результатами психофизиологического тестирования на исходном уровне при повторном обследовании через 6 лет развился тяжелый брадикинетический синдром с нарушением контроля равновесия. Во многом это напоминает особенности течения болезни Паркинсона, когда симптомы её развиваются внезапно с быстрым прогрессированием [7]. В научной литературе недостаточно сведений, описывающих возможность резкого ухудшения состояния больных в результате индуцированной марганцем нейроинтоксикации после длительного прекращения контакта с вредными производственными факторами. В связи с этим актуальным является дальнейшее изучение влияния патофизиологических механизмов воздействия марганца на организм человека, а также поиск критериев ранней диагностики хронической марганцевой интоксикации, основанных на методах персонализированной медицины. В научной литературе продолжается дискуссия об актуальности изучения патоморфологических и клинических различий между болезнью Паркинсона и индуцированной марганцем нейроинтоксикации. Последнее приобретает особое значение в контексте увеличениями пенсионного возраста работников, средней продолжительности жизни человека и распространения нейродегенеративных заболеваний в старших возрастных группах. В ряде исследований убедительно показано, что болезнь Паркинсона прогрессирует с потерей дофаминергических нейронов черной субстанции головного мозга [8]. Основные патофизиологические механизмы и причины этой специфической локализованной нейродегенерации в настоящее время неизвестны. Однако экспериментальные данные указывают на связь между прогрессированием болезни Паркинсона и активными формами кислорода в комплексе с несбалансированным гомеостазом металлов, в том числе марганца, железа и цинка [9]. Отдельная научная дискуссия, с нашей точки зрения, должна быть посвящена поиску объяснения двух феноменов, выявленных в ходе исследования. Первый феномен связан с необходимостью учета и оценки влияния имеющихся профессиональных навыков сварщиков на результат выполнения некоторых психофизиологических тестов, в том числе теста на мелкую моторику и координацию движения рук. Можно предположить, что специфика профессиональной деятельности человека, связанная с тренировкой концентрации внимания и координации движения рук и необходимая для сварки сложных швов и металлических соединений, является причиной безупречного выполнения психофизиологических тестов. С другой стороны более ранний выход на пенсию сварщиков, возможно, ассоциирован с более худшим выполнением тестов на память и скорость реакции по сравнению с группой контроля. Вероятность взаимосвязи этих феноменов отражена в системном научном обзоре, где авторы приходят к выводу о том, что существует большой пробел в знаниях о возрастном снижении когнитивных функций в результате выхода человека на трудовую пенсию [10, 11]. В научной литературе также недостаточно исследований, посвященных оценке влияния длительного отдыха на восстановление или сохранение моторных (двигательных) функций у работников сварочного производства и других.

Заключение

Таким образом, результаты исследования хорошо демонстрируют, что профессио-

нальная марганцевая интоксикация имеет течение тяжелого нейродегенеративного заболевания со склонностью к прогрессированию после длительного прекращения контакта работника с вредными производственными факторами. Ухудшение состояния здоровья пациентов связано с нарастанием тяжести проявлений гипокинетического синдрома. Другим прогностическим признаком нарастания патологических реакций является изменение параметров тремора рук. В связи с тем, что вышеуказанные патологические реакции нервной системы пациентов могут проявляться более, чем через 5 лет после установления диагноза профессионального заболевания, то, с целью уточнения стадии заболевания и корректировки лечения, существует необходимость включения в клинический протокол нейрофизиологического тестирования. Полученные данные имеют большое научное, клиническое значение и служат убедительным доказательством актуальности использования методов персонализированной медицины в практической деятельности врача-невролога и врача-профпатолога.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Дагу Элленгсону (Dag G. Ellingsen), Ингвару Томассену (Yngvar Thomassen) и другим сотрудникам Национального института профессионального здоровья (г. Осло) за помощь в организации лабораторных исследований.

Список литературы:

1. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации в 2022 году». М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 2023. 368 с.
2. Чашин М.В., Кайк Е.А., Климова Е.Г. Особенности дифференциальной диагностики профессиональных заболеваний у сварщиков // Медицина труда и промышленная экология. 2019. № 59 (9). С. 800 – 801.
3. Константинова Т.Н., Лахман О.Л., Катаманова Е.В., Картапольцева Н.В., Мещерягин В.А., Русанова Д.В., Андреева О.К. Клинические случаи профессиональной марганцевой интоксикации // Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 1. С. 27 – 31.
4. Reed, J.C., Reed, H.B.C. The Halstead—Reitan Neuropsychological Battery. In: Goldstein, G., Incagnoli, T.M. (eds) Contemporary Approaches to Neuropsychological Assessment. Critical Issues in Neuropsychology. Springer, Boston, MA. 1997. P. 93 – 94. http://doi.org/10.1007/978-1-4757-9820-3_4.
5. Bast-Pettersen R, Ellingsen DG. The Klove-Matthews static steadiness test compared with the DPD TREMOR—comparison of a fine motor control task with measures of tremor in smokers and manganese-exposed workers // Neurotoxicology. 2005. Vol. 26. P. 331–342.
6. Huang C-C, Lu C-S, Chu N-S, Hochberg F, Lilienfeld D, Olanow W. et al. Progression after chronic manganese exposure // Neurology. 1998. Vol. 43. P. 1479–1483.
7. Бойко А.В. Провоцирующие факторы дебюта моторных симптомов болезни Паркинсона // Международный неврологический журнал. 2017. № 5 (91). С. 15-19. <http://doi.org/10.22141/2224-0713.5.91.2017.110852>.
8. Колачева А.А., Козина Е.А., Волина Е.В., Угрюмов М.В. Дегенерация нигростриатных дофаминергических нейронов на экспериментальной модели ранней клинической стадии болезни Паркинсона // Нейрохимия. 2014. Т. 31. № 3. С. 225-235.
9. Bastian Blume, Vera Schwantes, Michael Witting, Heiko Hayen, Philippe Schmitt-Kopplin, Patrick O. Helmer and Bernhard Michalke. Lipidomic and Metallomic Alteration of *Caenorhabditis elegans* after Acute and Chronic Manganese, Iron, and Zinc Exposure with a Link to Neurodegenerative Disorders // Proteome Res. 2023. Vol. 22 (3). P. 837–850. <http://doi.org/10.1021/acs.jproteome.2c00578>.
10. Meng A, Nexo MA, Borg V. The impact of retirement on age related cognitive decline—a systematic review // BMC Geriatr. 2017. Vol. 17(160). <http://doi.org/10.1186/s12877-017-0556-7>.
11. Kadir Atalay, Garry F. Barrett, Anita Staneva. The effect of retirement on elderly cognitive functioning // Journal of Health Economics. 2019. Vol. 66. P. 37-53. <http://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2019.04.006>.

References:

1. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya Rossijskoj Federacii v 2022 godu» [State report "On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population of the Russian Federation in 2022."] Gosudarstvennyj doklad. – M.: Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ej i blagopoluchiya cheloveka [Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare], 2023, 368 p. (In Russian).
2. Chashchin M.V., Kajk E.A., Klimova E.G. Osobennosti differencial'noj diagnostiki professional'nyh zabolevanij u svarshchikov [Features of differential diagnosis of occupational diseases in welders] // *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya* [Occupational medicine and industrial ecology], 2019, no. 59 (9), pp. 800 – 801. (In Russian).
3. Konstantinova T.N., Lahman O.L., Katamanova E.V., Kartapol'ceva N.V., Meshcheryagin V.A., Rusanova D.V., Andreeva O.K. Klinicheskie sluchai professional'noj margancevoj intoksikacii [Clinical cases of occupational manganese intoxication] // *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya* [Occupational medicine and industrial ecology], 2009, no. 1, pp. 27 – 31. (In Russian).
4. Reed, J.C., Reed, H.B.C. The Halstead—Reitan Neuropsychological Battery. In: Goldstein, G., Incagnoli, T.M. (eds) *Contemporary Approaches to Neuropsychological Assessment. Critical Issues in Neuropsychology*. Springer, Boston, MA, 1997, pp. 93 – 94. http://doi.org/10.1007/978-1-4757-9820-3_4.
5. Bast-Pettersen R, Ellingsen DG. The Klove-Matthews static steadiness test compared with the DPD TREMOR—comparison of a fine motor control task with measures of tremor in smokers and manganese-exposed workers // *Neurotoxicology*, 2005, vol. 26, pp. 331–342.
6. Huang C-C, Lu C-S, Chu N-S, Hochberg F, Lilienfeld D, Olanow W. et al. Progression after chronic manganese exposure // *Neurology*, 1998. vol. 43, pp. 1479–1483.
7. Bojko A.V. Provociruyushchie faktory debyuta motornyh simptomov bolezni Parkinsona [Provoking factors for the onset of motor symptoms of Parkinson's disease] // *Mezhdunarodnyj nevrologicheskij zhurnal* [International Journal of Neurology], 2017, no. 5 (91), pp. 15-19. (In Russian). <http://doi.org/10.22141/2224-0713.5.91.2017.110852>.
8. Kolacheva A.A., Kozina E.A., Volina E.V., Ugryumov M.V. Degeneraciya nigrostriatnyh dofaminergicheskikh neyronov na eksperimental'noj modeli rannej klinicheskoj stadii bolezni Parkinsona [Degeneration of nigrostriatal dopaminergic neurons in an experimental model of early clinical stage Parkinson's disease] // *Nejrohimiya* [Neurochemistry], 2014, vol. 31 (3), pp. 225-235. (In Russian).
9. Bastian Blume, Vera Schwantes, Michael Witting, Heiko Hayen, Philippe Schmitt-Kopplin, Patrick O. Helmer and Bernhard Michalke. Lipidomic and Metallomic Alteration of *Caenorhabditis elegans* after Acute and Chronic Manganese, Iron, and Zinc Exposure with a Link to Neurodegenerative Disorders // *Proteome Res*, 2023, vol. 22 (3), pp. 837–850. <http://doi.org/10.1021/acs.jproteome.2c00578>.
10. Meng A, Nexo MA, Borg V. The impact of retirement on age related cognitive decline—a systematic review // *BMC Geriatr*, 2017, vol. 17(160). <http://doi.org/10.1186/s12877-017-0556-7>.
11. Kadir Atalay, Garry F. Barrett, Anita Staneva. The effect of retirement on elderly cognitive functioning // *Journal of Health Economics*, 2019, vol. 66, pp. 37-53. <http://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2019.04.006>.

Научная статья

УДК 621.314.21

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-45-56



EDN: CFPTZS

Для цитирования:

Инаходова Л.М., Фролов А.Л.
Фрактальная математическая модель срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 6-10 кВ // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 4. С. 45-56.
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-45-56>

Получена: 02.05.2023
Принята: 08.11.2023
Опубликована: 08.12.2023

For citation:

Inakhodova L.M., Frolov A.L.
Fractal mathematical model of the service life of power transformers of distribution electric networks 6-10 kV. Russian Arctic, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 45-56. (In Russian).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-45-56>



ФРАКТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-10 КВ

Л.М. Инаходова, А.Л. Фролов*

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

E-mail: *frolov.aees@gmail.com**Аннотация**

Данная статья посвящена вопросам составления математической модели для определения срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных сетей 6-10 кВ с помощью метода фрактального анализа. Применение метода фрактального анализа при исследовании силовых трансформаторов позволяет дать количественную оценку эксплуатационных параметров активной части силового трансформатора в зависимости от срока эксплуатации. В ходе исследований разработана математическая модель, описывающая изменение индекса фрактальности на временных участках не зависимо от его изменения в течение жизненного цикла силового трансформатора, позволяющая производить диагностику состояния активной части силового трансформатора [16] на любом сроке эксплуатации путем применения статистического анализа. Исследования проводились на силовых трансформаторах марок ТМ ТМГ ТМЗ мощностью 400 кВА парка трансформаторов распределительных электрических сетей новых и с дефектами активной части.

Ключевые слова: фрактальный анализ, индекс фрактальности, математическая модель, силовой трансформатор, срок эксплуатации, амплитудно-частотная характеристика, полиномиальное распределение.

FRactal mathematical model of the service life of power transformers of distribution electric networks 6-10 kV

L.M. Inakhodova, A.L. Frolov*

Samara State Technical University, Samara, Russia

E-mail: *frolov.aees@gmail.com**Abstract**

This article is devoted to the issues of compiling a mathematical model for determining the service life of power transformers of 6-10 kV distribution networks using the fractal analysis method. The use of the fractal analysis method in the study of power transformers makes it possible to quantify the operational parameters of the active part of a power transformer depending on the service life. In the course of the research, a mathematical model was developed that describes the change in the fractality index in time sections, regardless of its change during the life cycle of a power transformer, which allows diagnosing the state of the active part of a power transformer at any period of operation by applying statistical analysis. The studies were carried out on power transformers of the TM TMG TMZ brands with a capacity of 400 kVA of a park of transformers for distribution electrical networks, new and with defects in the active part.

Keywords: fractal analysis, fractality index, mathematical model, power transformer, service life, frequency response, polynomial distribution

Введение

Диагностика силового оборудования электрических сетей в современных условиях требует создания новых методов и методик диагностирования и обработки полученных результатов. Наиболее остро стоит вопрос о критичности выявленных неисправностей в целом, необходимости и рациональности дальнейших действий по локализации и устранению неисправных узлов или частей объекта диагностирования [17]. При проведении диагностирования силовых трансформаторов (СТ) с помощью электрических методов неразрушающего контроля особое внимание стоит уделить методам чувствительным к появлению остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов, таких как метод низковольтных импульсов и метод анализа частотного отклика, которые рассматриваются в работах Хренникова А.Ю. [21], [22], Завидей В.И. [4], Александрова Н.М. [5], и др., а также исследованиям [3] факторов, влияющих на срок эксплуатации трансформаторов и вызывающих их аварийные отключения. Данные методы, а также метод фрактального анализа легли в основу анализа и исследования зависимости степени износа активной части силового трансформатора при различных сроках и условиях эксплуатации от наличия дефектов активной части силового трансформатора. Метод фрактального анализа позволяет за счет чувствительности к структуре и форме графика амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) описывать специфические физические процессы, для которых другие методы неприменимы. Методы фрактального анализа показали свою эффективность в области энергетики при реализации процессов анализа и обработки данных моделей физических процессов в работах Балагула Ю.М. [1], Purkait, Prithwiraj & Chakravorti, Sivaji [23] и др. Целью работы является создание фрактальной математической модели срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 6-10 кВ с учетом условий экстремально низких температур для достижения которой необходимо определить наличие и степень развития дефекта активной части силового трансформатора, включая основную изоляцию [6], [15], методом фрактального анализа АЧХ группы силовых трансформаторов.

Материалы и методы

Для определения зависимости изменения АЧХ силового трансформатора от наличия дефекта его активной части [2], а также срока и условий его эксплуатации, были проведены измерения с записью АЧХ группы силовых трансформаторов ТМГ 400/6 (рис. 1), которые эксплуатировались в условиях умеренного и арктического климата [7]. Анализ АЧХ новых силовых трансформаторов показал, что их графики АЧХ в той или иной степени подобны графикам, полученным в результате моделирования. Однако, в зависимости от мощности силового трансформатора – амплитуда и частота резонансных пиков существенно отличается от результатов моделирования. В той же мере на результаты повлияли условия и методы, повышающие эффективность эксплуатации силовых трансформаторов [8].

Для сравнительного анализа АЧХ воспользовались методом исследования самоподобия графиков и определения индекса фрактальности для каждого из них. Полученные индексы фрактальности графиков АЧХ исследуемых новых силовых трансформаторов изменяются нелинейно в зависимости от срока и условий эксплуатации силовых трансформаторов, оставаясь практически неизменными при средних значениях срока эксплуатации трансформаторов от 0 до 60 лет (таблица 1).

Таблица 1

Индексы фрактальности силовых трансформаторов с повреждениями

МАРКА	СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ, лет	ИНДЕКС ФРАКТАЛЬНОСТИ	ПРИМЕЧАНИЕ
ТМГ 400/6	0	0,35	-
ТМГ 400/6	5	0,352	Воздействие ВГ
ТМГ 400/6	10	0,37	Воздействие пониженных температур
ТМ 400/6	16	0,377	Воздействие пониженных температур
ТМГ 400/6	22	0,386	Воздействие ВГ
ТМЗ 400/6	28	0,391	Воздействие ВГ
ТМЗ 400/6	32	0,41	Воздействие ВГ
ТМГ 400/6	34	0,42	Воздействие ВГ
ТМ 400/6	37	0,492	Воздействие пониженных температур

МАРКА	СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ, лет	ИНДЕКС ФРАКТАЛЬНОСТИ	ПРИМЕЧАНИЕ
ТМ 400/6	45	0,5	Воздействие ВГ
ТМГ 400/6	48	0,613	Воздействие ВГ
ТМ 400/6	60	0,618	Воздействие ВГ

Примечание. Воздействие пониженных температур при длительной эксплуатации СТ в равной степени снижает остаточный ресурс подобно воздействию высших гармоник (ВГ) [10], [24].

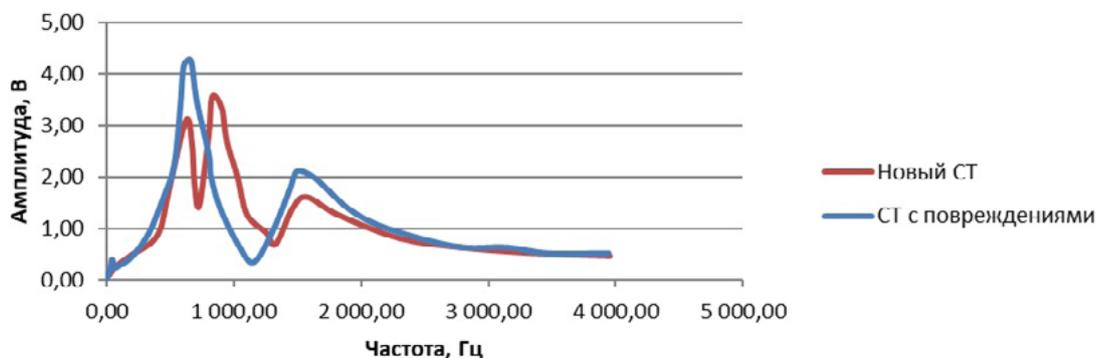


Рисунок 1. Сравнение АЧХ силовых трансформаторов мощностью 400 кВА

Из графика на рисунке 1 видно, что при возникновении повреждений в активной части силовых трансформаторов марок ТМ, ТМГ, ТМЗ мощностью 400 кВА, таких как: межвитковые замыкания, нарушение главной и продольной изоляции обмоток, смещение обмоток, нарушение изоляции между отдельными листами шихтованной стали магнитопровода, - частоты резонансов, а также их амплитуды изменяются. При этом, наблюдается уменьшение количества пиков резонансов и увеличение амплитуды резонансов при наличии повреждений в среднем на 22,3%.

Для исследования двух графиков рассчитаны их индексы фрактальности с помощью клеточного анализа (метода фрактального анализа). Для графика «Новый СТ» индекс фрактальности составил 0,32. Для графика «СТ с повреждениями» индекс фрактальности составил 0,58. Для определения конкретных видов повреждений СТ необходимы исследования зависимости индекса фрактальности от изменения параметров схемы замещения силового трансформатора (емкости, индуктивности).

Для решения поставленной задачи определения резонансов АЧХ нового силового трансформатора проведено исследование универсальной расчетной модели силового трансформатора с усредненными параметрами схемы замещения силовых трансформаторов 6-10 кВ марок ТМ, ТМГ, ТМЗ с мощностью 400 кВА в ПО Multisim (рис 2) [18]. Под «усредненными параметрами» приняты средние арифметические значения электрических параметров схемы замещения группы исследуемых силовых трансформаторов.

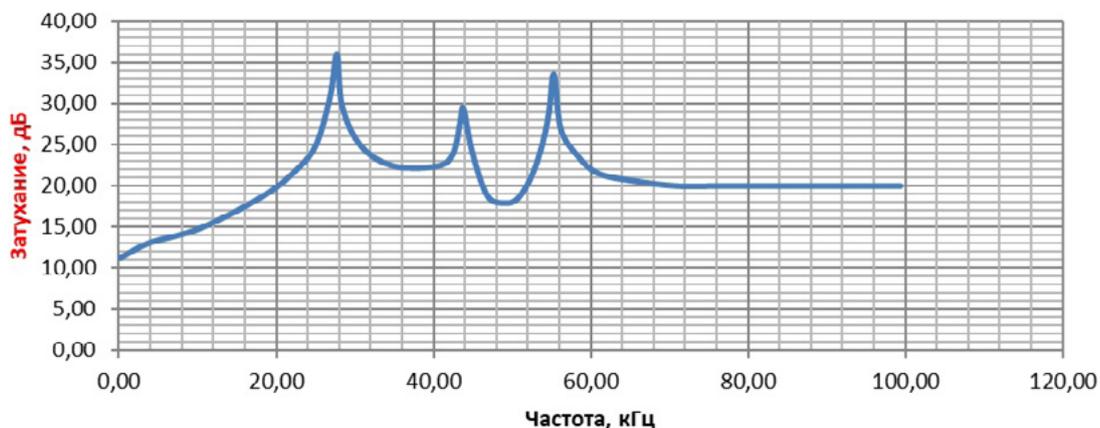


Рисунок 2. АЧХ модели нового силового трансформатора в ПО Multisim

Как видно из рисунка 2, амплитудные пики расчетной модели силового трансформатора в ПО Multisim соответствуют экспериментальным исследованиям (рисунок 1), проведенным на новых силовых трансформаторах марок ТМ-400, ТМГ-400, ТМЗ-400.

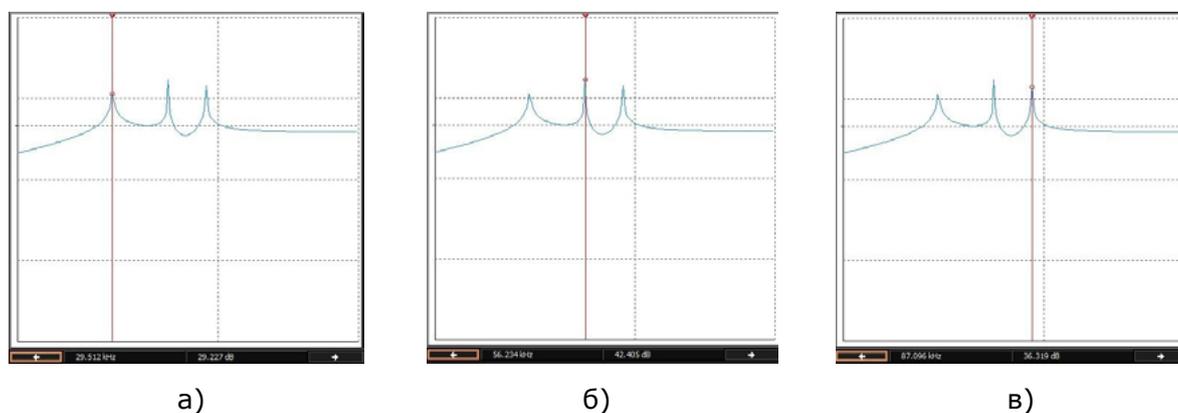


Рисунок 3. АЧХ схемы замещения нового СТ

Для получения АЧХ схемы замещения СТ в ПО Multisim проведено моделирование данной схемы с получением графиков АЧХ и их исследования на предмет резонансов. На рисунке 3 представлен график АЧХ с маркерами, установленными в точках наибольшей амплитуды: а) первый резонанс, б) и в) - второй и третий резонансы соответственно. Полученные значения в токах резонансов будут являться базовыми при проведении сравнительного анализа значений в точках резонансов для графиков с измененными параметрами емкости и индуктивности. Параметры резонансов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры резонансов АЧХ схемы замещения СТ

График АЧХ	Частота, кГц	Уровень, дБ
а)	29,5	29,2
б)	56,2	42,4
в)	87,1	36,3

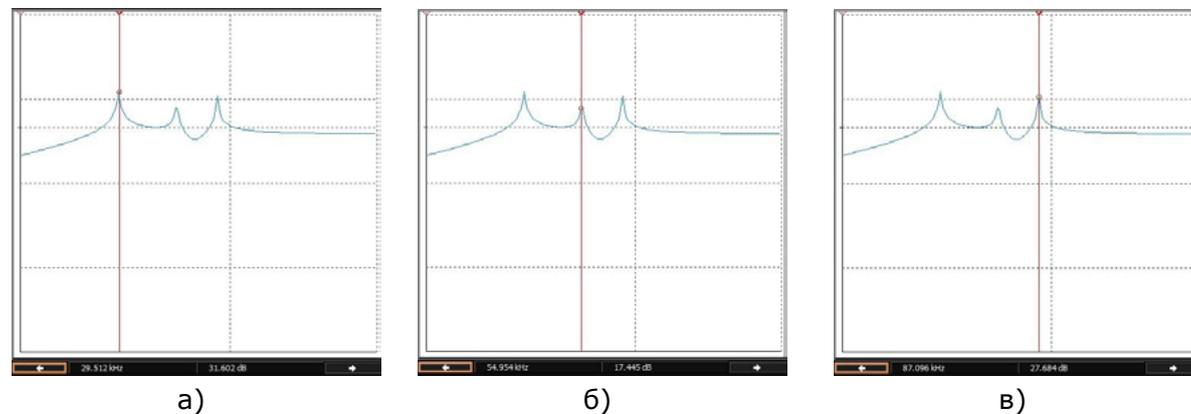


Рисунок 4. АЧХ схемы замещения СТ с измененными емкостями

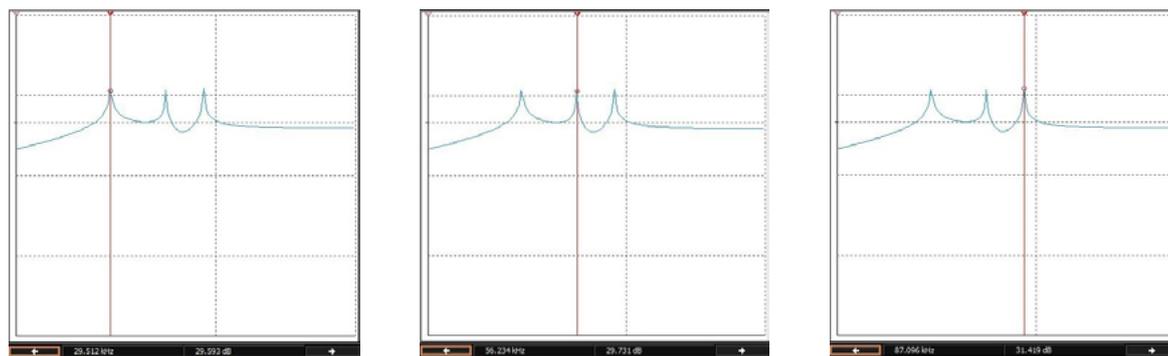
АЧХ схемы замещения СТ с измененными параметрами, соответствующими наличию таких дефектов в активной части СТ как межобмоточные замыкания, нарушение главной изоляции СТ, вызывают изменение емкости в схеме замещения СТ, в свою очередь межвитковые, межслойные замыкания, а также нарушение изоляции шихтованной стали магнитопровода, вызывают изменение индуктивности в схеме замещения СТ. На рисунке 4 представлен график АЧХ схемы замещения СТ с измененными емкостями, где: а) первый резонанс б) и в) второй и третий резонансы соответственно. Параметры данных резонансов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры резонансов АЧХ схемы замещения СТ с измененными емкостями

График АЧХ	Частота, кГц	Уровень, дБ
а)	29,5	31,6
б)	55,0	17,4
в)	87,1	27,7

Из приведенных данных в таблице 3 видно, что увеличение значений проходных межобмоточных емкостей на величину не более 5% от исходных приводит к смещению второго резонанса вниз по частоте более чем на 1кГц, а изменение сигнала по уровню – более чем в 2 раза, что является показателем изменений в системе межобмоточной изоляции трансформатора [19].



а) б) в)
Рис. 5. АЧХ схемы замещения СТ с измененными индуктивностями

Таблица 4

Параметры резонансов АЧХ схемы замещения СТ с измененными индуктивностями

График АЧХ	Частота, кГц	Уровень, дБ
а)	29,5	29,6
б)	56,2	29,7
в)	87,1	31,4

Из приведенных данных в таблице 4, в соответствии с рисунком 5, видно, что изменение значения индуктивности одной из обмоток не влияет на частоты резонансов, однако, приводит к изменению всех трех величин резонансов по уровню, что является показателем изменений механического состояния обмоток трансформатора. С целью выявления зависимости формы и структуры графика от наличия повреждений активной части исследуем полученные АЧХ силовых трансформаторов с помощью метода клеточного фрактального анализа (рисунок 6).

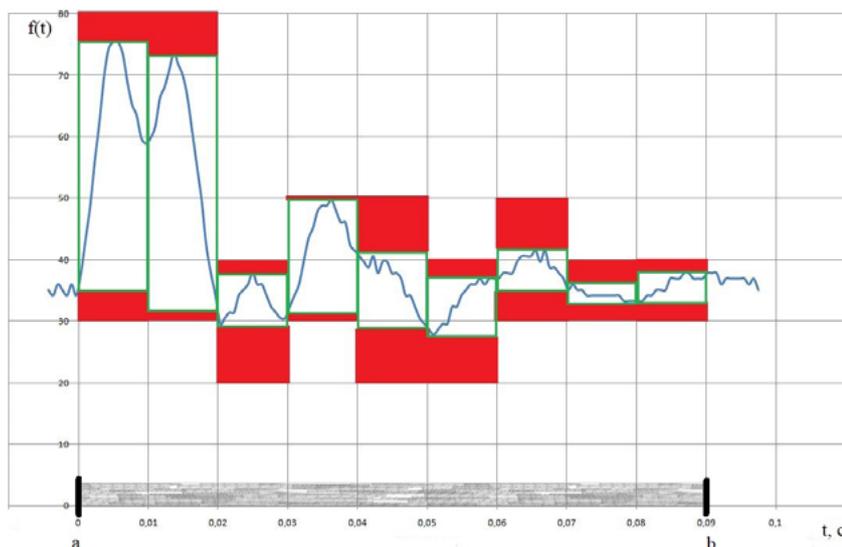


Рисунок 6. Построение минимального клеточного покрытия графика осциллограммы (выходной сигнал), где $f(t)$ – амплитуда сигнала в мВ, t, c – время в секундах.

Для исследования фрактальной структуры, полученных в ходе проведения исследования осциллограмм новых СТ и с повреждениями, предлагается использовать вычисление их фрактальной размерности путем определения их клеточной размерности D_c . D_c – размер наименьшей клетки со стороной ϵ , на которые можно разбить плоскость графика, каждая из которых содержит хотя бы одну точку графика. Для этого необходимо разбить плоскость графика полученной осциллограммы на клетки размером ϵ и определить число клеток $N(\epsilon)$, в которых определена хотя бы одна точ-

ка графика. Для определения числа клеток выбран конечный участок, определяемый отрезком $[a, b]$ на горизонтальной оси. График функции покрываем прямоугольниками с основанием ε и высотой равной амплитуде колебаний $A_i(\varepsilon)$, определяющей разности максимального и минимального значения функции на отрезке ε .

Таким образом, для вычисления величин индексов фрактальности использовано выражение:

$$V_f(\varepsilon) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^m A_i(\varepsilon), \quad (1)$$

Тогда полную площадь минимального покрытия $S_\mu(\varepsilon)$ можно записать в виде: $S_\mu(\varepsilon) = V_f(\varepsilon) \varepsilon$. Поэтому из соотношения $S(\varepsilon) \sim \varepsilon^{2-D}$ следует, что $V_f(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-\mu}$ при $\varepsilon \rightarrow 0$, где $\mu \stackrel{\text{def}}{=} D_\mu - 1$. Назовем размерность D_μ размерностью минимального покрытия.

Так как $D_\mu = D$ и для одномерной функции топологическая размерность $D_t = 1$, то из формулы $\mu = D_\mu - 1$, следует $\mu = D - D_t$, где μ - индекс фрактальности, D_μ - размерность минимального покрытия, D_t - топологическая размерность, A_i - амплитуда функции $f(t)$.

Полученные индексы фрактальности графиков АЧХ группы силовых трансформаторов ТМ, ТМЗ, ТМГ мощностью 400 кВА – новых и имеющих повреждения: межвитковые замыкания, нарушение главной и продольной изоляции обмоток, смещение обмоток, нарушение изоляции между отдельными листами шихтованной стали магнитопровода со сроком эксплуатации от 0 до 60 лет приведены в таблице 1 [11], [20].

Таблица 6

Динамика прироста индекса фрактальности на интервалах жизненного цикла массива СТ

№ п/п	Интервал, лет	μ , в год
1	0-10	0,0004
2	10-32	0,0025
3	32-48	0,00864
4	48-60	0,00641

Скорость прироста индекса фрактальности непостоянна на участках и показывает резкое увеличение индекса после значения 0,4 на этапе появления дефектов в активной части СТ в 1,5~2 раза.

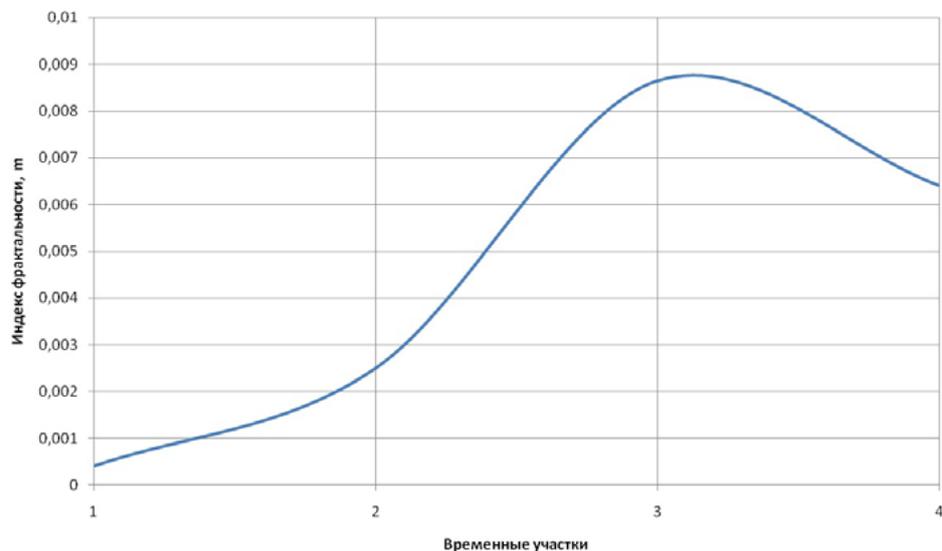


Рисунок 7. Изменение индекса фрактальности на временных участках срока эксплуатации СТ

Темп прироста индекса фрактальности на участке 2 (10-32 лет) по отношению к предыдущему периоду эксплуатации на участке 1 (0-10 лет) составил 525%, что означает увеличение индекса в 5,25 раз; в период эксплуатации на участке 3 (32 до 48 лет) по отношению к предыдущему участку 2 (10-32 лет) прирост индекса фрактальности составил 244%, что означает увеличение индекса в 2,44 раза. В период эксплуатации на участке 4 (48-60 лет) по отношению к предыдущему периоду эксплуатации на участке 3 (32-48 лет) индекс фрактальности снизился на 25%. Расчет

прироста проводился по формуле $(B * 100 / A) - 100 = C$, где B – искомый участок, A – предыдущий участок.

Из графика на рисунке 7 видно, что наибольший абсолютный прирост индекса фрактальности наблюдается на участке 3 (32-48 лет), что означает наибольшее изменение эксплуатационных параметров (таблица 4), способных повлиять на дальнейшую вероятность отказа СТ.

Строим график изменения индекса фрактальности $\mu(t)$ по данным экспериментальных исследований парка СТ (таблица 1).

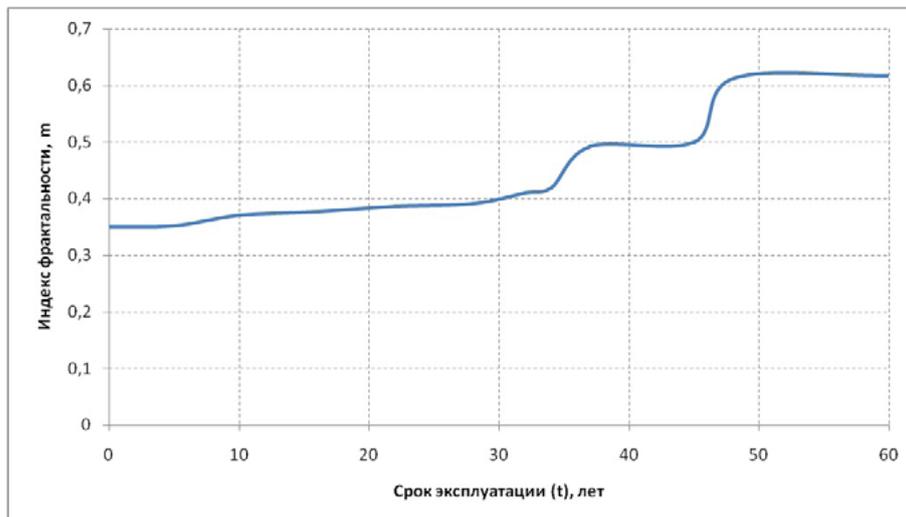


Рисунок 8. Изменение индекса фрактальности в период эксплуатации СТ

Индекс фрактальности для графика силовых трансформаторов мощностью 400 кВА (рис. 8) при эксплуатации до 30 лет составил в среднем 0,38, а для трансформаторов с неисправностями и достигших предельного состояния – 0,51 [13]. Исходя из данных приведенных в таблице 1 видно, что изменение индекса фрактальности имеет прямую зависимость от срока, условий эксплуатации и накопленных внутренних повреждений активной части СТ.

Результаты

Для визуализации данной зависимости построим гистограмму изменения индекса фрактальности от срока эксплуатации на участке от 0 до 60 лет (рис. 9).

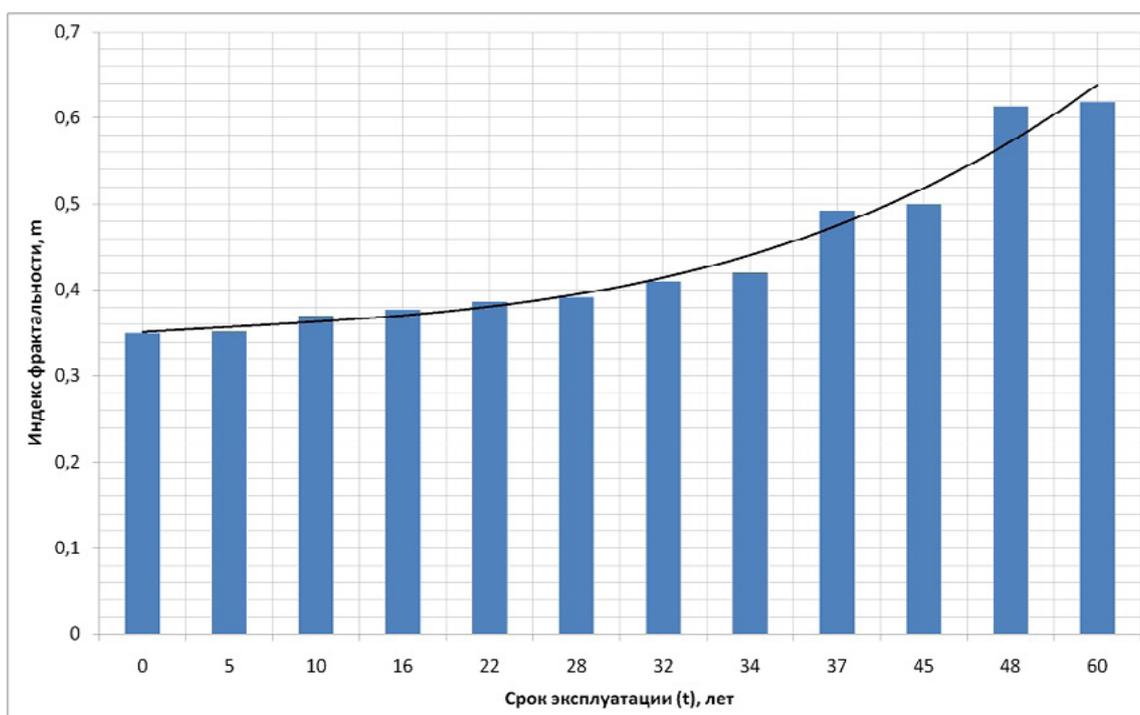


Рисунок 9. Гистограмма изменения индекса фрактальности

Представленная гистограмма и полиномиальная аппроксимирующая распределения индекса фрактальности построена на основании данных 125 силовых трансформаторов марок ТМ, ТМЗ, ТМГ мощностью 400 кВА по объектам ООО «ЭККА», ЗАО «СГЭС», ПАО «Россети».

Кривая распределения индекса фрактальности исследованного массива СТ получена методом полиномиальной кубической интерполяции сплайном.

$$f(t) = at^3 + bt^2 - ct + d \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой сплайн, где коэффициенты a, b, c, d – коэффициенты полинома. Для определения математического закона изменения сплайна для каждого участка гистограммы разобьем его на соответствующие временные участки и произведем расчет коэффициентов a, b, c, d .

На каждом временном участке $[t_{i-1}, t_i], i = \overline{1, N}$ функция сплайна $S(t)$ представляет собой полином третьей степени $S_i(t)$, для определения коэффициентов которого запишем $S_i(t)$ в виде:

$$S_i(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3, \quad (3)$$

тогда

$$S_i(t_i) = a_i, S_i'(t_i) = b_i, S_i''(t_i) = 2c_i, S_i'''(t_i) = 6d_i, i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

В соответствии с условиями непрерывности производных функция $S_i(t)$ в пределах временного участка t_{i-1}, t_i периода эксплуатации СТ значение функции не изменится. Аналогично и для второй производной функции $S_i(t)$ скорость изменения значения функции на данном временном участке не изменится:

$$\begin{aligned} S_i(t_{i-1}) &= S_{i-1}(t_{i-1}), & S_i'(t_{i-1}) &= S_{i-1}'(t_{i-1}), \\ S_i''(t_{i-1}) &= S_{i-1}''(t_{i-1}), \end{aligned} \quad (5)$$

где i меняется от 1 до N , а функция интерполяции $S_i(t_i)$ описывает изменение индекса фрактальности $f(t_i)$ в каждой точке t_i , отсюда:

$$S_i(t_i) = f(t_i). \quad (6)$$

Для получения формулы вычисления коэффициентов сплайна временной участок эксплуатации СТ обозначим:

$$\tau_i = t_i - t_{i-1} \quad (i = \overline{1, N}), f_i = f(t_i) \quad (i = \overline{0, N})$$

Отсюда получаем формулы для вычисления коэффициентов полиномиального кубического сплайна:

$$a_i = f(t_i) \quad a_i = f(t_i), \quad (7)$$

$$d_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{3\tau_i}, \quad (8)$$

$$b_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{\tau_i} + \frac{2c_i + c_{i-1}}{3} \tau_i, \quad (9)$$

$$c_{i-1} \cdot \tau_i + 2c_i(\tau_i + \tau_{i+1}) + c_{i+1} \cdot \tau_{i+1} = 3 \left(\frac{a_{i+1} - a_i}{\tau_{i+1}} - \frac{a_i - a_{i-1}}{\tau_i} \right), \quad (10)$$

причем $c_N = S'''(t_N) = 0$ и $c_1 - 3d_1\tau_1 = S'''(t_0) = 0$

На основании полученных уравнений определим коэффициенты сплайнов, описывающих изменение индекса фрактальности на временных участках представленных на рисунке 8.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= 0,0004x^2 - 0,0081x + 0,4001, [0;5] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0085x + 0,4023, [5;10] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0087x + 0,4011, [10;16] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0078x + 0,3851, [16;22] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0088x + 0,4073, [22;28] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0077x + 0,4092, [28;32] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0083x + 0,4008, [32;34] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0075x + 0,4071, [34;37] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0073x + 0,4005, [37;45] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0068x + 0,4001, [45;48] \\
 f(x) &= -0,0000x^3 + 0,0004x^2 - 0,0081x + 0,4102, [48;60]
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Система уравнений (11) является фрактальной математической моделью срока эксплуатации силовых трансформаторов, описываемой функцией кубической интерполяции (сплайн) распределения величины индекса фрактальности на участке от 0 до 60 лет срока эксплуатации группы из 125 исследованных новых силовых трансформаторов и с дефектами в активной части. В представленной группе силовых трансформаторов исследование показало, что количество СТ с дефектами составило 37 (значение индекса фрактальности превысило 0,51 во всех случаях) со сроком эксплуатации более 37 лет, 12 из них – более 50 лет. Для оставшихся 88 трансформаторов исследование показало отсутствие дефектов, 5 из которых не эксплуатировались, остальные 83 эксплуатировались менее 34 лет.

Обсуждение

Полученная математическая модель описывает изменение индекса фрактальности на временных участках независимо от его изменения в течение жизненного цикла СТ и позволяет производить диагностику состояния активной части СТ на любом сроке эксплуатации и в условиях низких температур путем применения статистического анализа [12]. Данная математическая модель не привязана к конкретным СТ, служит для принятия решения о дальнейшей эксплуатации СТ и мерах по устранению неисправностей, повышения энергоэффективности [14], также для выполнения мероприятий превентивной диагностики, служащей для выявления неисправностей на этапе зарождения дефекта. Результаты данного исследования могут быть использованы предприятиями распределительных электрических сетей и другими эксплуатирующими организациями.

Выводы

Созданная математическая модель отражает физические процессы в активной части СТ и позволяет на основании данных исследований АЧХ силового трансформатора сделать вывод о состоянии СТ на определенном сроке эксплуатации – наличии дефекта, необходимости проведения обслуживания или ремонта. Метод фрактального анализа применим в условиях эксплуатации СТ в умеренном климате, так и в экстремальных условиях крайнего Севера и Арктики, а также показывает целесообразность применения при проведении подобного рода диагностики с помощью электрических методов неразрушающего контроля. Метод диагностики с применением фрактального анализа может быть рекомендован к применению в аналогичных исследованиях в области электроэнергетики, таких как исследование режимов электрических сетей с использованием фрактального моделирования и т.д.

Математическая модель разработана на основе диагностических данных полученных электрическими методами НК при использовании согласующего устройства для диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора (патент на изобретение № 2792177 от 19.12.2022) [9].

Список литературы:

1. Балагула, Ю.М. Применение фрактального анализа в задачах электротехники: специальность 05.09.05 "Теоретическая электротехника": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Балагула Юрий Моисеевич. – Санкт-Петербург, 2013. 18 с.
2. Волков А.Ю., Ларин В.С. Подходы к анализу частотных характеристик для оценки состояния силовых трансформаторов // Энергоэксперт. 2019. № 2 (70). С. 34 - 38.
3. Грунтович Н.В., Федоров О.В., Мороз Д.Р. [и др.] / Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонаполненных трансформаторов // Энергия и менеджмент, 2017. № 3(96). С. 2-6.
4. Завидей В.И., Ларин В.С., Волков А.Ю., [и др.] / К диагностике технического состояния обмоток силовых трансформаторов после воздействия токов коротких замыканий // Экспозиция Нефть Газ, 2018. № 5(65). С. 80-84.
5. Золотарев Р.В., Александров Н.М. Методы диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов // проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности / Материалы II Международной научно-технической конференции. // ЧГУ, Чебоксары, 2018. С. 216 - 221.
6. Медведев В.О. Влияние старения межслойной изоляции магнитопровода на изменение уровня потерь при эксплуатации трансформаторов сверх нормативного срока / В.О. Медведев, Е.А. Чащин // Планирование, проведение и интерпретация результатов научно-технических исследований: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Волгоград, 08 мая 2019 года. – Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2019. С. 38-40.
7. Микешкин О.Д., Заболотских В.И. Современные методы диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов // ИГТУ, Ижевск, 2015. С. 296 - 300.
8. Мухаметзянова А.Ф. Повышение эффективности эксплуатации трансформаторов, применяемых в системах промышленного электроснабжения / А.Ф. Мухаметзянова, Е.И. Грачева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2014. Т. 2. № 1(6). С. 117-126.
9. Патент РФ № 2792177, 19.12.2022. Согласующее устройство для диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора // Инаходова Л.М., Фролов А.Л.
10. Пахоменко Ю.Н. Условия работы электрооборудования в условиях Арктики / Ю.Н. Пахоменко, Н.А. Старцев; науч. рук. Н. М. Космынина // Творчество юных - шаг в успешное будущее : Арктика и её освоение : материалы IX Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, г. Томск, 10-14 октября 2016 г. Томск : Изд-во ТПУ, 2016. С. 291-293.
11. Поляков, М. А. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М. А. Поляков, В. В. Василевский // Электротехника и электромеханика, 2014. № 3. С. 38-41.
12. Попов, Г.В. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // Г.В. Попов, Е.Б. Игнатьев, 2014. № 4. С. 25-32.
13. Семенова, К.В. Методика расчета жизненного цикла трансформаторов / К. В. Семенова, А.В. Подобный, А.И. Тихонов // Надежность и долговечность машин и механизмов: Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 18 апреля 2019 года. Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2019. С. 167-171.
14. Сериков А.В. Математическая модель электромагнитных процессов в энергоэффективном силовом масляном трансформаторе / А.В. Сериков, В.В. Иванов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы V Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 06–11 декабря 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 159-162.
15. Третьяков М.Ю. Старение изоляции трансформаторов / М.Ю. Третьяков, О.И. Фисенко, В. Н. Зуева // Современные электротехнические и информационные комплексы и системы, Армавир, 23–24 октября 2020 года. Армавир: ООО «Редакция

- газеты «Армавирский собеседник» (Армавирская типография), 2020. С. 106-108.
16. Файрушин И.Ф. Исследование методов диагностики изоляции силового трансформатора / И.Ф. Файрушин // Тинчуринские чтения: Тезисы докладов XIII молодежной научной конференции: В 3-х томах, Казань, 24–27 апреля 2018 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. С. 132-133.
 17. Фролов. А.Л. Опытная модель схемы диагностирования силовых трансформаторов с использованием согласующих трансформаторов // Энергия единой сети, 2022. № 3-4 (64-65). С. 58 - 63.
 18. Фролов А.Л., Инаходова Л.М. Разработка метода диагностирования силовых трансформаторов с использованием измерительной системы и согласующего трансформатора тока // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации. Белебей, 2022. С. 34 - 36.
 19. Фролов А.Л. Диагностика механического состояния обмоток силового трансформатора // Энергетика будущего – цифровая трансформация. Липецк, 2022. С. 22 - 25.
 20. Фролов А.Л., Инаходова Л.М. Применение метода фрактального анализа для определения остаточного ресурса силовых трансформаторов 6-10 кв распределительных сетей электросетевых и промышленных предприятий // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации. Белебей, 2022. С. 31 - 33.
 21. Хренников А.Ю. Обнаружение деформаций обмоток силовых трансформаторов средствами технической диагностики после коротких замыканий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2022. № 3 - 4. С. 74-79.
 22. Хренников А.Ю., Назарычев А.Н., Новоселов Е.М. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов (реакторов) при коротких замыканиях: повреждения, испытания и диагностика // ИГЭУ, Иваново. 2011. 92 с.
 23. Purkait, Prithwiraj & Chakravorti, Sivaji. (2003). Impulse fault classification in transformers by fractal analysis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 10. No.1. P. 109 - 116. <http://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1176571>.
 24. Ismoilov A.I., Karimov E.D., Sidorov D. A., Hismatullin A. S. Modernization of Diagnostic Methods for Oil Transformers // Components of Scientific and Technological Progress. 2021. No. 4(58). P. 5-8.

References:

1. Balagula YU. M. Primenenie fraktal'nogo analiza v zadachah elektrotekhniki: special'nost' 05.09.05 "Teoreticheskaya elektrotekhnika": avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Balagula YUrij Moiseevich. – Sankt-Peterburg. 2013. 18 p.
2. Volkov A.YU., Larin V.S. Podhody k analizu chastotnykh harakteristik dlya ocenki sostoyaniya silovykh transformatorov // Energoekspert, 2019, no. 2 (70), pp. 34 - 38.
3. Gruntovich N.V., Fedorov O.V., Moroz D.R. [et al.] / Analiz problemnykh voprosov ekspluatacii maslonapolnennykh transformatorov // Energiya i menedzhment, 2017, no. 3(96), pp. 2-6.
4. Zavidej V.I., Larin V.S., Volkov A.YU., Drobyshevskij S.A. K diagnostike tekhnicheskogo sostoyaniya obmotok silovykh transformatorov posle vozdejstviya tokov korotkih замыканий // Ekspozitsiya Neft' Gaz, 2018, no. 5(65), pp. 80-84.
5. Zolotarev R.V., Aleksandrov N.M. Metody diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovykh transformatorov // problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti / Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. // CHGU, CHEboksary, 2018, pp. 216 - 221.
6. Medvedev V.O. Vliyanie stareniya mezhslojnoj izolyacii magnitoprovoda na izmenenie urovnya poter' pri ekspluatacii transformatorov sverh normativnogo sroka / V. O. Medvedev, E. A. CHashchin // Planirovanie, provedenie i interpretaciya rezul'tatov nauchno-tekhnicheskikh issledovanij: Sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Volgograd, 08 maya 2019 goda. Volgograd: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovanij", 2019, pp. 38-40.
7. Mikeskin O.D., Zabolotskih V.I. Sovremennye metody diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovykh transformatorov // IGTU, Izhevsk. 2015, pp. 296 - 300.
8. Muhametzyanova A.F. Povyshenie effektivnosti ekspluatacii transformatorov, primenyaemykh v sistemah promyshlennogo elektrosnabzheniya / A.F. Muhametzyanova, E.I. Gracheva // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovanij XXI veka: teoriya i

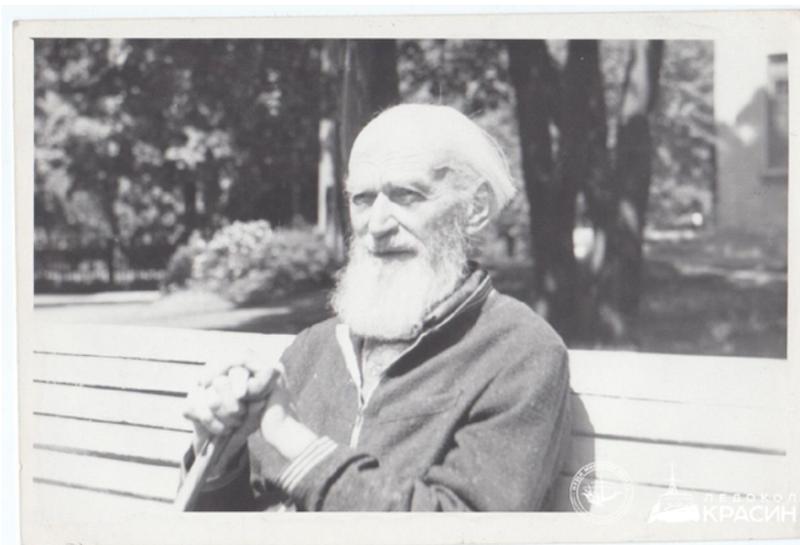
- praktika, 2014, vol. 2, no. 1(6), pp. 117-126.
9. Patent RF № 2792177, 19.12.2022. Soglasuyushchee ustrojstvo dlya diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovogo transformatora // Inahodova L.M., Frolov A.L.
 10. Pahomenko YU.N. Usloviya raboty elektrooborudovaniya v usloviyah Arktiki / YU.N. Pahomenko N.A. Starcev; nauch. ruk. Kosmylina N.M. // Tvorchestvo yunyh - shag v uspešnoe budushchee: Arktika i eyo osvoenie: materialy IX Vserossijskoj nauchnoj molodezhnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem s elementami nauchnoj shkoly imeni professora M.K. Korovina, g. Tomsk, 10-14 oktyabrya 2016 g. Tomsk: Izd-vo TPU, 2016, pp. 291-293.
 11. Polyakov M.A. Ocenka ostatochnogo resursa izolyacii na osnove ucheta individual'nyh osobennostej zhiznennogo cikla silovogo transformatora / M.A. Polyakov, V.V. Vasilevskij // Elektrotehnika i elektromekhanika, 2014, no. 3, pp. 38-41.
 12. Popov G.V. Opredelenie indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya silovyh transformatorov v processe ih ekspluatatsii / G. V. Popov, E. B. Ignat'ev, 2014, no. 4, pp. 25-32.
 13. Semenova K.V. Metodika rascheta zhiznennogo cikla transformatorov / K.V. Semenova, A.V. Podobnyj, A. I. Tihonov // Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov: Sbornik materialov X Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Ivanovo, 18 aprelya 2019 goda. – Ivanovo: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situaciyam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij», 2019, pp. 167-171.
 14. Serikov A.V. Matematicheskaya model' elektromagnitnyh processov v energoeffektivnom silovom maslyanom transformatore / A.V. Serikov, V.V. Ivanov // Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Komsomol'sk-na-Amure, 06–11 dekabrya 2021 goda / Redkollegiya: S.I. Suhorukov (otv. red.), A.S. Gudim, N.N. Lyubushkina. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj universitet, 2022, pp. 159-162.
 15. Tret'yakov M.YU. Starenie izolyacii transformatorov / M.YU. Tret'yakov, O. I. Fisenko, V. N. Zueva // Sovremennye elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy, Armavir, 23–24 oktyabrya 2020 goda. – Armavir: OOO «Redakciya gazety «Armavirskij sobesednik» (Armavirskaya tipografiya), 2020, pp. 106-108.
 16. Fajrushin I.F. Issledovanie metodov diagnostiki izolyacii silovogo transformatora / I.F. Fajrushin // Tinchurinskie chteniya: Tezisy dokladov XIII molodezhnoj nauchnoj konferencii: v 3-h tomah, Kazan', 24–27 aprelya 2018 goda / Pod obshchej redakciej E.YU. Abdullazyanova. Vol.1. Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2018, pp. 132-133.
 17. Frolov A.L. Opytnaya model' skhemy diagnostirovaniya silovyh transformatorov s ispol'zovaniem soglasuyushchih transformatorov // Energiya edinoj seti, 2022, no. 3-4 (64-65), pp. 58 - 63.
 18. Frolov A.L., Inahodova L.M. Razrabotka metoda diagnostirovaniya silovyh transformatorov s ispol'zovaniem izmeritel'noj sistemy i soglasuyushchego transformatora toka // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy, dostizheniya i innovacii. Belebej, 2022, pp. 34 - 36.
 19. Frolov A.L. Diagnostika mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovogo transformatora // Energetika budushchego – cifrovaya transformaciya. Lipeck, 2023, pp. 22 - 25.
 20. Frolov A.L., Inahodova L.M. Primenenie metoda fraktal'nogo analiza dlya opredeleniya ostatochnogo resursa silovyh transformatorov 6-10 kv raspreditel'nyh setej elektrosetevykh i promyshlennykh predpriyatij // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy, dostizheniya i innovacii, Belebej, 2022, pp. 31 - 33.
 21. Hrennikov A.YU. Obnaruzhenie deformacij obmotok silovyh transformatorov sredstvami tekhnicheskoy diagnostiki posle korotkih zamykanij // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2022, no. 3 - 4, pp. 74-79.
 22. Hrennikov A.YU., Nazarychev A.N., Novoselov E.M. Elektrodinamicheskaya stojkost' silovyh transformatorov (reaktorov) pri korotkih zamykaniyah: povrezhdeniya, ispytaniya i diagnostika // IGEU, Ivanovo, 2011, 92 p.
 23. Purkait Prithwiraj & Chakravorti, Sivaji. (2003). Impulse fault classification in transformers by fractal analysis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 1, pp. 109 - 116. <http://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1176571>.
 24. Ismoilov A.I., Karimov E.D., Sidorov D.A., Hismatullin A.S. Modernization of Diagnostic Methods for Oil Transformers // Components of Scientific and Technological Progress, 2021, no. 4(58), pp. 5-8.

СУДЬБА КРАСИНСКОГО КОЧЕГАРА

В.Л. Бронников

Научный сотрудник Филиала ФГБУК «Музей-заповедник «Музей Мирового океана» в Санкт-Петербурге – «Ледокол «Красин»

В октябре 1993 г. отмечалось 65-летие триумфального завершения экспедиции ледокола «Красин» по спасению покоривших Северный полюс на дирижабле итальянских аэронавтов. На фоне драматических политических событий, охвативших в тот период страну, члены Комитета защиты ледокола «Красин» хотели напомнить жителям города о великих событиях 1928 г. Защитники ледокола организовали выставку в Музее связи им. А.С. Попова, в основу которой легли фотографии из книги начальника спасательной экспедиции Р.Л. Самойловича «S.O.S. в Арктике» и предметы из коллекции Музея Арктики и Антарктики. Организаторы до последнего надеялись, что, возможно, кто-то из героев экспедиции 1928 г. до сих пор жив и обязательно сможет посетить их выставку. Но никто из них не приходил... Когда, казалось, что никакой надежды не осталось, выставку посетила одна пожилая жительница Санкт-Петербурга, которая сообщила о своем знакомом, который «когда-то работал в Арктике, и, по слухам, принимал участие в спасении итальянцев». С ее помощью и удалось выйти на Михаила Михайловича Горского, бывшего в 1928 г. кочегаром на ледоколе «Красин», который охотно присоединился к движению за спасение ледокола и превращение его в музей, стал большим другом и постоянным посетителем «Красина».



ЛК ММО 1 № 4. Фотография. М.М. Горский в парке. 1991 г.

Его внуки передали для музея редкие документы из семейного архива и личные вещи кочегара, именно с них и начал формироваться предметный фонд будущего музея. В 1993 г. об удивительной биографии героя экспедиции 1928 г. и большого друга нашего музея «5 каналом» был снят документальный фильм «Кочегар ледокола «Красин»».

Ранние годы

Михаил Михайлович Горский родился в поселке Мариенбург под Гатчиной 30 августа 1903 г. Отец работал переписчиком в городском управлении Гатчины, а в годы гражданской войны пошел служить в Красную армию. Мама из крестьян была домохозяйкой и могла посвятить себя воспитанию сына. Оба родителя умерли во время блокады Ленинграда.

До 16 лет Михаил Михайлович проживал в Гатчине, обучался в реальном училище, ставшем после революции единой трудовой школой. Интересно, что это же училище заканчивал и другой будущий герой событий 1928 г. — летчик Борис Григорьевич Чухновский. Когда будущий красинский кочегар был еще школьником, его земляк, будущий красинский пилот уже был местной знаменитостью, и все жители Гатчины знали пионера авиации.

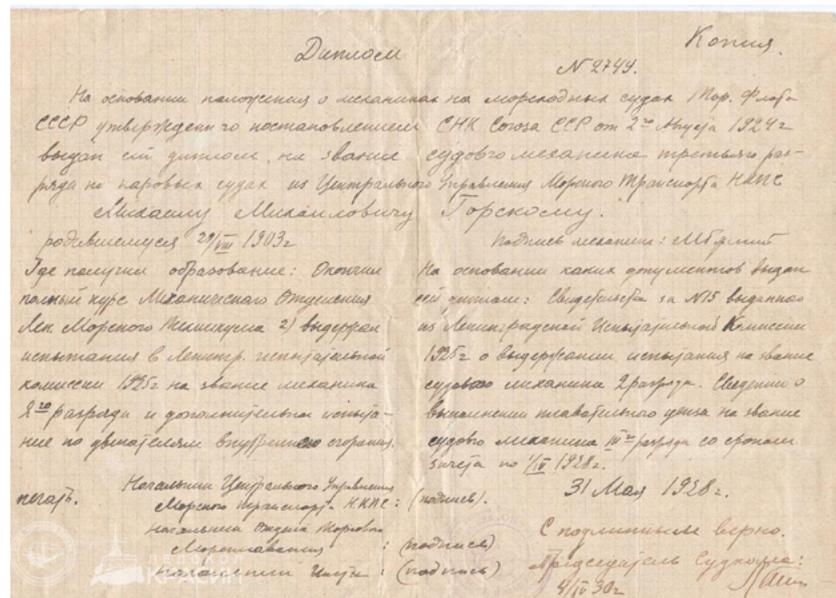
Свой путь М.М. Горский начал в 1919 г. – сначала он недолго трудился чернорабочим на огородах, а потом устроился рассыльным в городскую милицию Гатчины. В 1921 г. он перешел на работу кочегаром на суда петроградского торгового порта, параллельно обучаясь в Техникуме водного транспорта на механическом отделении (закончил учебу в 1925 г., получив специальность судового механика). Своим учителем в кочегарском деле он всегда называл старого кочегара Тараса Бобшедного, работавшего старшиной кочегаров ещё до революции на крейсерах Императорского флота.



ЛК ММО 1 № 3. Фотография. Портрет М.М. Горского. 1934 г.



ЛК ММО 1 № 31. Документ. Аттестат № 12150 на имя кочегара 2-го класса М.М. Горского. 1921 г.



ЛК ММО 1 № 30. Документ. Диплом (копия) № 2749 М.М. Горского на звание судового механика 3-го разряда на паровых судах. 1928 г.

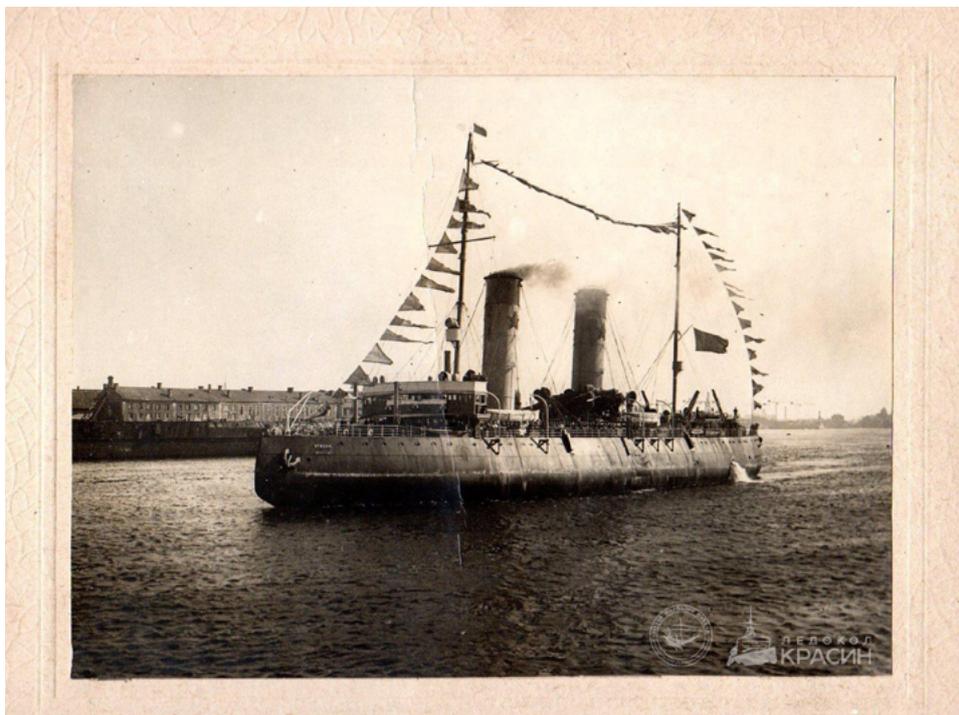


ЛК ММО 1 № 1604/4. Фотография. Ледокол «Малыгин». 1935-1939 гг.

Михаил Михайлович в 1923 г. совершил своё первое плавание в Арктике, работая на ледокольном пароходе «Малыгин» в должности кочегара 2-го класса, в 1924 и 1925 гг. – на гидрографическом судне «Купава» и ледорезе «Ф. Литке» он побывал в Турции и в Великобритании. Потом М.М. Горский вернулся в Ленинград и 1 ноября 1927 г. устроился на работу кочегаром 1-го класса на ледокол «Октябрь».

Как М.М. Горский оказался на ледоколе «Красин»

В один из июньских дней Михаил Михайлович как обычно пришел на борт «Октябрь» в 8 утра, и его неожиданно встретил стармех Михаил Иванович Денисов, приехавший откуда-то с толстой пачкой бумаг в руках. Он предложил кочегару перейти на должность кочегара 1-го класса на мощнейший ледокол «Красин», который, как он сказал, в это время готовился к выходу в море. М. М. Горский не раздумывая принял предложение, ведь оклад на судне, работавшем в море, был в 2 и даже 3 раза выше, чем при его обслуживании в порту! Тогда он еще не знал, что ему предстоит принять участие в экспедиции по спасению итальянских аэронавтов...



ЛК ММО 1 № 1336/33. Фотография. Ледокол «Красин». 1920-1930-е гг.

Весной-летом 1928 г. в центре внимания всех мировых СМИ были события покорения Северного полюса командой итальянских аэронавтов под руководством генерала Умберто Нобиле. Генерал был известным конструктором дирижаблей, на построенном под его руководством дирижабле «Норвегия» ему в 1926 г. вместе с Руалем Амундсенем уже удавалось покорить полюс, но тогда все лавры первооткрывателя вновь достались прославленному норвежцу. Доказать свой приоритет в воздушном покорении северной точки планеты генерал рассчитывал, повторив успех первого полёта. Но вторая экспедиция, состоявшаяся в мае 1928 г., завершилась катастрофой — новый дирижабль «Италия» не смог совершить посадку на полюсе из-за тяжелых метеоусловий и на обратном пути к Шпицбергену 25 мая потерпел крушение, ударившись о торосы. Девять выживших членов экипажа во главе с генералом У. Нобиле разбили лагерь, в центре которого была выкрашенная красной краской палатка. После того как радиосигналы из лагеря были пойманы советским радиолюбителем Николаем Шмидтом стало возможным организовать спасение «лагеря красной палатки» и отделившейся спустя пять дней от команды группы из трех человек под командованием Ф. Мальмгрена, пытавшихся самостоятельно добраться до Шпицбергена («группа Мальмгрена»).



ЛК ММО 1 № 160. Фотооткрытка. Генерал Умберто Нобиле. 1989 г.



ЛК ММО 2 № 752. Фотография. Дирижабль N-4 «Italia» совершает посадку в Штольпе (Германия). Апрель 1928 г.

Помимо СССР в спасательной операции принимало участие ещё пять стран: Италия, Франция, Швеция, Норвегия и Финляндия. Отправка самого мощного в мире ледокола «Красин» первоначально не планировалась — ставка делалась на работавший в Белом море ледокольный пароход «Малыгин», вышедший на спасение в ночь с 12 на 13 июня из Архангельска. Окончательное решение об отправке на спасение итальянцев ледокола «Красин» было принято 11 июня. Судно в это время стояло в Ленинградском торговом порту (у 15-й линии Васильевского острова), куда оно прибыло для длительного ремонта. Судовое оборудование было законсервировано, котлы погашены, да и 2/3 членов команды были раскассированы по разным судам Ленинградского порта (новый экипаж пришлось срочно набирать с ледоколов «Ленин», «Трувор», «Октябрь» и других судов).

После того, как Михаил Михайлович Горский выразил согласие присоединиться к спасению итальянской экспедиции, он в тот же день был отправлен на «Красин», для участия в работах по расконсервации судна, бункеровке и подготовке к плаванию. Работы были проведены за рекордно короткий срок в 4 дня. Дух сборов судна точно передал назначенный для освещения красинского похода корреспондент «Вечерней Москвы» Эмилий Миндлин: «В глубине Угольной гавани двухтрубный великан «Красин» грузился углем. Его окружали баржи и катера. Над ним взвивался столб угольной пыли, пели лебедки, с железным шумом передвигались паровые краны. На кранах поднимались огромные двухстворчатые стальные раковины. Опускаясь над баржей с углем, они раскрывались, черпали черное топливо, захлопывались, взлетали кверху, кран опускал их, створки распахивались опять и низвергали в глубины красинских трюмов тысячи тонн угля [...] Другие экспедиции готовились год или два. Это были экспедиции, которые надеялись дойти до Северного полюса.

«Красин» не собирался на полюс. Но «Красин» — первый корабль, который решался войти в вечные льды в самом начале полярной весны.

Люди, отправлявшиеся на «Красине», знали, что они должны быть готовы к возможности встретить зимовку во льдах, отдаться во власть вечной ночи, быть затертыми вечными льдами. Вот что делало экспедицию «Красина» равноценной тем, что собирались пересекать девяностый градус, место, где сходятся все меридианы земного шара, — Северный полюс.

Восемь лет ушло на подготовку экспедиции «Фрама».

И только три дня было в распоряжении советского ледокола.

Три дня — большим сроком «Красин» не располагал.

«Так могут собираться большевики или сумасшедшие», — писали буржуазные газеты о молниеносных сборах «Красина».

Завершив все сборы, 15 июня 1928 г. после полудня ледокол вышел в свой самый знаменитый рейс.

Труд кочегара

«Я любил кочегарский труд, мне нравилось работать с огнём! Это вообще интересное занятие, ведь в кочегарке в котлах яркий огонь, сильный, пылающий, жаркий. Это как вулкан какой-то, и мне это нравилось — управлять вулканом, и я с удовольствием работал кочегаром! Меня это никогда не тяготило», — вспоминал впоследствии Михаил Михайлович.



ЛК ММО 2 № 233. Фотокопия. Ледокол «Красин». Кочегарка. 1928 г.

Труд кочегаров был самым тяжелым на паровых судах, поэтому и четырехчасовые вахты кочегарных команд прерывались не восьмичасовыми перерывами, как у ходовой команды, а двенадцатичасовыми. Кочегар 1-го класса за смену должен был прочистить одну топку, в другой подорвать металлическим ломом запекшийся слой угля и разровнять его по площади топки, а третью топку загрузить («зашуровать») свежим углём. Переход к новой операции осуществлялся по сигналу электрозвонка, который отдавался старшиной вахты.

Самым тяжелым временем для кочегаров оказался начальный период экспедиции — на Балтике стояло жаркое лето до 25° С, а в машинном отделении температура достигала целых 50° С, из-за чего было невозможно нести вахту дольше 2 часов — «кожа горела», как вспоминал впоследствии М.М. Горский.

Первую остановку ледокол совершил 20-21 июня в норвежском Бергене, где произошла бункеровка «Красина». Вместо привычного советского угля ПЖ (паровично-жирный) был поставлен самый высококачественный уголь «кардиф», который почти не содержал шлаков, вследствие чего его не надо было постоянно подламывать ломом, пока он прогорал, этот уголь легко загорался и давал много жара.

Из остановки в Бергене М. М. Горский запомнил, как за членами сошедшей на берег команды постоянно бегали местные мальчишки и кричали вслед: «Папарус, папарус!» Как выяснилось так они просили заезжих моряков поделиться папиросами. Взрослые же норвежцы постоянно обращались к красинцам с призывом: «Спасите нашего Амундсена!». Ведь на спасение аэронавтов вылетел выдающийся норвежец, но за два дня до прибытия «Красина» в Берген перестал выходить на связь.

Жители и мэрия города Берген устроила торжественный обед для членов команды в роскошном ресторане на горе, до которого моряки добирались на фуникулёре. На той же горе в честь экипажа ледокола был проведен торжественный митинг, на котором красинские кочегары хором исполнили «Дубинушку». Как вспоминал М.М. Горский, дирижировал хором Иван Феоктистов, который оказался совсем никудышным кочегаром, но великолепным дирижером.

Спасение «лагеря красной палатки»

Огромную роль в поисках итальянского лагеря сыграла авиация. Уже 20 июня майор Умберто Маддалена, совершавший полет над о. Фойн, получил сигнал «ККК» («Вы находитесь прямо над нами, снижайтесь!»), после чего смог обнаружить «лагерь красной палатки». Не имея возможности приземлиться в лагере, он сбросил для аэронавтов запас продовольствия. Спустя еще три дня шведский летчик Э. Лундборг смог достичь лагеря и эвакуировать раненого генерала Нобиле (вместо него во главе группы стал лейтенант Альфредо Вильери).



ЛК ММО 1 № 568. Фотография. Портрет Б.Г. Чухновского. 1928 г.

Советская экспедиция также широко применяла авиаразведку. В районе Группы Семи островов столкнувшись с тяжелыми льдами красинцы подготовили 7-8 июля взлетную полосу и подготовили к полету самолет «ЮГ-1». Уже во время второго полета вечером 10 июля летчиком Б.Г. Чухновским была обнаружена «группа Мальмгрена», координаты которой на следующий день были радиографированы на «Красин».

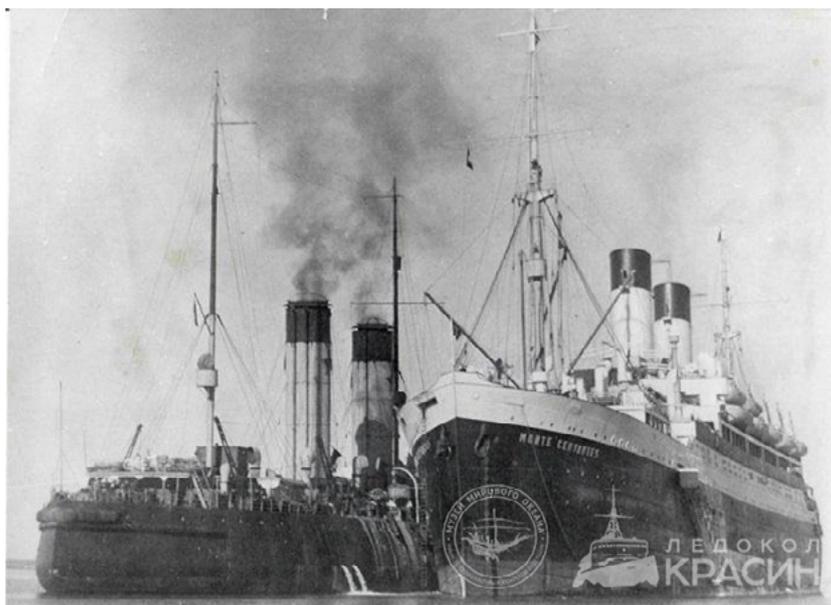
Когда новость об обнаруженных Ф. Мальмгрене, Ф. Цаппи и А. Мариано прошла среди членов экипажа, то М.М. Горский с четырьмя своими товарищами-кочегарами И. Феоктистовым, Ш. Баибиковым, М. Тойкиным, Н. Кнокиным написали совместное заявление на имя начальника экспедиции Р.Л. Самойловича с предложением отправить их пешком на спасение «группы Мальмгрена». Письмо героических кочегаров настолько растрогало руководящий состав, что комиссар П.Ю. Орас попросил журналиста Э.Л. Миндлина непременно рассказать об этом эпизоде в его будущей книге. Однако от предложения кочегаров Рудольф Лазаревич предпочёл отказаться — была вероятность, что сами они могли потеряться в ледяной пустыне.

Утром 12 июля 1928 г. Михаил Михайлович не был на кочегарской вахте, поэтому оказался одним из свидетелей исторического спасения Ф. Цаппи и А. Мариано. Итальянцы встречали ледокол на торосе, махали руками, чтобы показать, что подойти надо с большой осторожностью, иначе торос может перевернуться. Спасенный Ф. Цаппи, по словам М.М. Горского, радостно вбежал на борт по второму трапу и совсем не производил впечатления измученного человека, а А. Мариано напротив был очень слаб, и для его подъема пришлось использовать лебедку. Вечером того же дня были спасены и оставшиеся в лагере аэронавты («группа Вильери»).

Спасение лайнера «Монте-Сервантес» и встреча с пастором

На обратном пути в Ставангер «Красин» принял сигнал SOS от немецкого пассажирского лайнера «Монте-Сервантес», находившегося в примерно в 80 милях от советского ледокола. Совершая круизный рейс вокруг Европы, капитан судна самовольно изменил курс, чтобы оказаться ближе к месту событий: У. Нобиле был спасен, а «Красин» стал знаменит, благодаря газетам и радио. Совершенно непригодное к плаванию в северных широтах судно, предназначенное для рейсов в Бразилию и Аргентину, вошло во льды и 24 июля на пути к Шпицбергену получило пробоину почти 4 на 1,5 м, после чего лайнер мог продержаться на плаву не более 16 часов. На борту «Монте-Сервантеса» находилось около 1500 пассажиров и 318 человек коман-

ды. Несмотря на имеющиеся у «Красина» повреждения ходовой части – был сломан левый винт и повреждено крепление руля, было решено изменить курс и идти на помощь немецкому лайнеру. Ремонт корпуса и откачкой воды красинцы занимались с 26 июля по 2 августа.



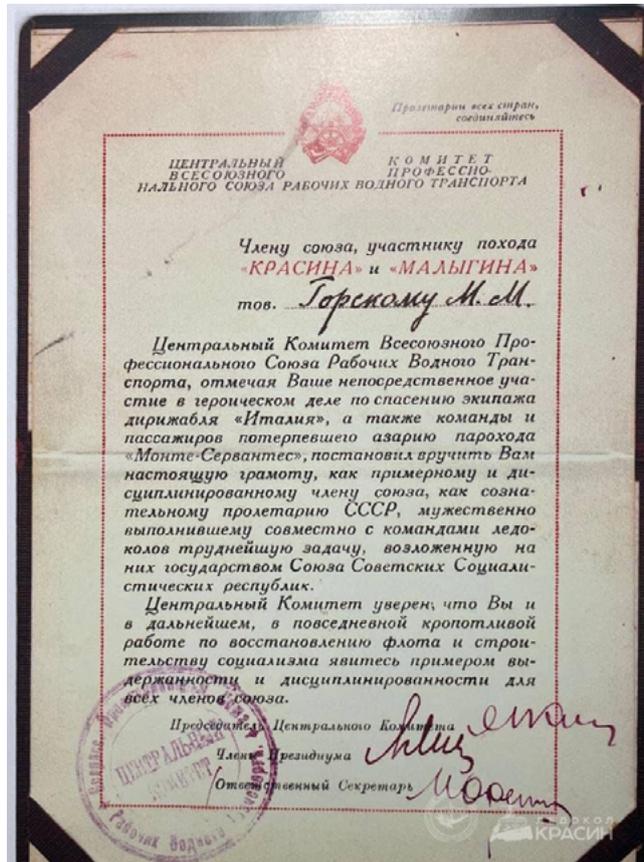
ЛК ММО 2 № 215. Фотокопия. «Красин» у борта лайнера «Монте-Сервантес». Август 1928 г.

Завершив работы, «Красин» и «Монте-Сервантес» вместе продолжили путь в Гаммерфест. В этом городе М.М. Горский во время выхода на берег повстречал пастора, спасенного с лайнера. Пастор намеревался благословить кочегара, но Михаил Михайлович резко остановил его, заявив, что не верует в бога.

День возвращения «Красина» в Ленинград 5 октября 1928 г. М.М. Горский запомнил на всю жизнь — по его словам встречать героический ледокол вышла половина города: «Мы чувствовали, что сделали важное для государства дело, это мы чувствовали все».



ЛК ММО 2 № 306. Фотокопия. Встреча ледокола «Красин» в Ленинграде. 5 октября 1928 г.



НА ЛК ММО № 1498-1. Ксерокопия. Грамота участнику похода «Красина» и «Малыгина» кочегару М.М. Горскому. 1928 г.

На память об экспедиции «Красина» Михаил Михайлович привез позвонок кита, из которого впоследствии был выточен детский стульчик, кристаллы горного хрусталя и александриты.

После возвращения в СССР М. М. Горский был награжден специальной грамотой ЦИК СССР, а осенью 1928 г. вместе со старшим электриком М.К. Леманом был командирован в Германию по приглашению Центрального бюро общества друзей СССР. Красинцы выступали сначала в Харбурге, но это выступление вышло не очень хорошо — докладчики были уставшими, а местных рабочих не успели предупредить о мероприятии, поэтому пришло очень мало слушателей. Зато во время второго выступления в Гамбурге был аншлаг, выступающих встречали с цветами и донесли на руках до трибуны! Третье выступление проходило в Кёльне, и на нем произошел удивительный случай. Один из слушателей во время выступления Михаила Михайловича заявил, что сомневается в том, что тот действительно принимал участие в экспедиции ведь его не видно ни на одной из фотографий, которые тогда массово печатались европейской прессой. После этого заявления из глубины зала раздался голос: «Я знаю его, он был там!», и вперед вышел тот самый пастор, благословение которого отказался принять Михаил Михайлович. Он приблизился к своему спасителю и подарил ему пышный букет красных роз.

Дальнейшая судьба М.М. Горского

Говоря о дальнейшей судьбе кочегара, можно указать, что вернувшись из Германии, он перешел на работу на ледокол «Ермак». На нем в феврале-марте 1929 г. М.М. Горский участвовал в экспедиции по вызволению затертых во льдах Балтийского моря судов. В 1930-1932 гг. он учился в Институте инженеров водного транспорта, который закончил со специальностью инженера-механика. Закончив учебу, Михаил Михайлович перешел на работу на торговые суда Северного морского пароходства, трудился в должностях инженера-техника и старшего механика.

В мае 1942 г. во время Великой Отечественной войны М.М. Горский был мобилизован и отправлен на курсы переподготовки командирского состава, которые успешно закончил с присвоением звания лейтенанта. Младшим командиром он был распределен для службы на зенитную батарею эсминца «Карл Либкнехт» на Северном флоте. Но уже спустя год приказом народного комиссара ВМФ Михаила Михайловича

демобилизировали, и он был отправлен на о. Диксон для участия в зимовке и ремонте судов. За проведенную работу 22 сентября 1944 г. Приказом народного комиссара Морского флота был удостоен звания Почетный работник морского флота.

После зимовки Михаила Михайловича перевели для работы на Юг — в Дунайское пароходство (служил морским агентом в Болгарии в порту Силистрии), участвовал в перегонке теплохода «Басарабия» из Стамбула в Констанцу для передачи СССР, потом на судостроительных заводах в Будапеште и в Вене. Награжден медалью «За оборону Ленинграда».

С конца 1940-х гг. он перешел на работу в ЦПКБ-1 начальником отдела силовых установок. Участвовал в комплектации силовых установок на нефтеналивных танкерах «Генерал Ази Асланов», «Урал» и на других судах.



ЛК ММО 1 № 2. Документ. Удостоверение М.М. Горского к значку № 4692 Почетному работнику Морского Флота. Май 1945 г.

«Russian Arctic» is a scientific peer-reviewed journal, established in 2018. It publishes open access academic/scholarly research in Russian and English. Full text are available online. Double-blind peer-review process is supported.

LLC Center for Information and Legal Support for the Development of the Arctic is the Journal's founder and publisher.

ISSN (online): 2658-4255

Focus and scope:

- enable the scientists studying the Arctic to quickly publish the results of their research;
- provide scientific support to strategic projects in the Arctic;
- draw the attention of a wide audience to healthcare issues faced by the Arctic's indigenous population, to the environment and climate of the Russian North;
 - provide Russian and foreign scientists with a platform for dialogue and exchange of knowledge;
- increase the prestige of Russian scientific research at the global level.

Section Policies

2739 Public health, Environmental and Occupational health
2100 Energy
1900 Earth and Planetary Sciences:
1902 Atmospheric science
1905 Economic geology
1910 Oceanography

Publication frequency:

4 times a year;
special and thematic issues are published on request.