

ISSN(Online): 2658-4255

# RUSSIAN ARCTIC

[russian-arctic.info](http://russian-arctic.info)

#1(12)/2021



## ARCTIC SAFETY AND SECURITY

### **ECOLOGY**

INFLUENCE OF DANGEROUS NATURAL PROCESSES AND PHENOMENA ON THE SAFETY OF ECONOMIC ACTIVITY IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

### **RESEARCH**

GEODYNAMIC RISK ASSESSMENTS FOR OIL AND GAS INDUSTRY OF THE ARCTIC ZONE

## CHIEF EDITOR

Kira Zmieva

## EDITORIAL BOARD

Nikolay Koldunov, PhD (Bremen, Germany)  
Hajime YAMAGUCHI, professor (Tokyo, Japan)  
YOUNKYO KIM, professor (Seoul, Korea)  
Takuji Waseda (Tokyo, Japan)  
Kokin Sergey, PhD (Harbin, China)  
Mr. Rhee Han Woo, candidate of Doctor of IR (Seoul, Korea)  
Thomas Krumpfen, PhD in geoscience (Bremen, Germany)  
Belonenko Tatiana, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)  
Bryantsev Alexander, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Chashchin Valery, Doctor of Sciences, Prof (St. Petersburg, Russia)  
Chubarova Natalia, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Degteva Galina, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)  
Dmitriev Vasily, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)  
Eseev Marat, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)  
Filippov Boris, 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)  
Korobov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia),  
Kovchin Igor, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Kydrushova Elena, Doctor of Sciences, Prof (Arkhangelsk, Russia)  
Lebedev Sergey, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Levykin Sergey, Doctor of Sciences, Prof (Yekaterinburg, Russia)  
Malinin Valery, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)  
Mingazova Elmira, Doctor Sciences, professor (Kazan, Russian)  
Mironov Evgeny, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)  
Mitina Elena, Doctor of Sciences (Murmansk, Russia)  
Nikuschenko Dmitry, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)  
Prohorchuk Egor, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Repina Irina, Doctor of Sciences, Professor (Moscow, 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)  
Slobodchikov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Stepanova Vera, Doctor of Sciences (Arkhangelsk, Russia)  
Talykova Lyudmila, Doctor of Sciences (Kirovsk, Russia)  
Tokarevich Nikolay, Doctor of Sciences (St. Petersburg)  
Turichin Gleb, Doctor of Sciences (St. Petersburg, Russia)  
Varivodov Vladimir, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Zvorykina Julia, Doctor of Sciences (Moscow, Russia)  
Bayeva Julia, PhD (Moscow, Russia)  
Chebrov Danila, PhD (Petropavlovsk Kamchatsky, Russia)  
Ivanov Boris, PhD (St. Petersburg, Russia)  
Karyakin Yuri, PhD (Moscow, Russia)  
Khvostova Marina, PhD (Moscow, Russia)  
Klimanov Igor, PhD (Moscow, Russia)  
Nikanov Alexander, PhD (St. Petersburg, Russia)  
Pisarev Sergey, PhD (St. Petersburg, Russia)  
Saltykova Olga, PhD (Cheboksary, Russia)  
Sharonov Andrey, PhD (St. Petersburg, Russia)  
Smolyanitsky Vasily, PhD (St. Petersburg, Russia)  
Stepanov Rodion, PhD (Moscow, Russia)  
Tretyakov Viktor, PhD (St. Petersburg, Russia)  
Tsykalov Anatoly, PhD (Krasnoyarsk, Russia)  
Yulin Alexander, PhD (St. Petersburg, Russia)

## EDITORIAL STAFF

### Science editor

Tatiana Alekseeva(AARI)

### CEO

Elena Makova

### Executive secretary

Marina Belikova

### PR

Olga Chahovskaya

### MANUSCRIPT SUBMISSION

info@arctic-centre.com

### ADDRESS

101000, Moscow, Armenian lane,  
9/1/1 bld., room 203

### 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](http://www.creativecommons.org)  
Issue date: 29.04.2021



## CONTENTS

04

Editor's letter

### Scientific research

05

INFLUENCE OF DANGEROUS NATURAL PROCESSES AND PHENOMENA ON THE SAFETY OF ECONOMIC ACTIVITY IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION  
M.S. Khvostova

23

PROPOSALS FOR THE LEGISLATIVE SUPPORT FOR THE CREATION OF A REFERENCE OBSERVATIONAL NETWORK FOR MONITORING PERMAFROST SOILS  
A.M. Brekhuntsov, Y.V. Petrov, O.A. Prykova

33

REVIEW OF METHODS AND MAIN RESULTS OF SEA ICE THICKNESS MEASUREMENTS IN THE ARCTIC  
T.A. ALEKSEEVA, S.V. FROLOV S.S. SEROVETNIKOV

50

GEODYNAMIC RISK ASSESSMENTS FOR OIL AND GAS INDUSTRY OF THE ARCTIC ZONE  
R.O. STEPANOV, T.R. AKHMETSHIN

62

MULTIYEAR VARIABILITY OF THE FAST ICE THICKNESS IN THE LAPTEV SEA ACCORDING TO THE POLAR STATION DATA  
A.B. TIMOFEEVA, M.V. SHARATUNOVA

### INTERNATIONAL ISSUES

78

THE INTERNATIONAL DIMENSION OF THE NORTHERN SEA ROUTE  
N.S. LIPUNOV

84

REVIEW OF ARCTIC POLICY OF FINLAND IN 2010S  
P.A. KURPAS

# У

## ВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В ближайшие дни Россия входит в эпоху председательства в Арктическом совете. Главной в этой межправительственной организации, в которую также входят Дания, Исландия, Канада, Норвегия, США, Финляндия и Швеция, Россия станет на два года.

Наша страна, без преувеличения, является одним из ключевых игроков в Арктике в целом и в Арктическом совете, в частности. Связано это, в первую очередь, с такими объективными преимуществами, как протяжённость береговой линии, площадь территории страны за полярным кругом, объём запасов полезных ископаемых и масштабы их разработки (более 70% всех нефтегазовых ресурсов в России добывается в Арктике), а также с крупнейшим ледокольным флотом. Вместе с тем обладание данными преимуществами не означает, что Россия может занимать пассивную позицию и наблюдать за деятельностью Арктического совета. Наоборот, исхо-

дя из того, что все решения в совете принимаются на основе консенсуса, России необходимо принимать активное участие во всех проектах и на всех направлениях его работы, а также продолжить выходить с собственными инициативами. Велика будет роль российских ученых в формировании международной арктической повестки и реализации крупных международных проектов с учетом защиты хрупкой северной экосистемы.

Арктика становится площадкой для международного сотрудничества и обсуждения геополитических интересов. Крупные государства, не входящие в состав совета, стремятся получить членство в его рядах.

К своему председательству в Арктическом совете Российская Федерация подходит с большим опытом арктического взаимодействия и реализуемых инициатив на международном, федеральном и региональном уровне.

Между тем, журнал «Российская Арктика» буквально на днях был

официально включен в перечень ВАК (Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук). Редакция журнала выражает благодарность всем членам редакционной коллегии, авторам и рецензентам за активное участие в развитии нашего издания! Мы постоянно совершенствуемся и готовим журнал к включению в рейтинговые международные системы цитирования.

А перед вами 12-й по счету и первый «ВАКовский» выпуск «Российской Арктики»!



Приятного прочтения!

UDC 502.333:504.38

DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-05-22

**Citing:**

Khvostova M. Influence of dangerous natural processes and phenomena on the safety of economic activity in the Arctic zone of the Russian Federation. Russian Arctic. 2021; № 12: p.p 5-22. (In Russ.). DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-05-22.

Received: 11.12.2020

Approved: 13.01.2021

Published: 24.01.2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

## ВЛИЯНИЕ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

М.С. Хвостова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия; marinakhvostova@list.ru

**Аннотация:** В статье изложены современное положение и перспективы развития хозяйственной деятельности в Арктической зоне Российской Федерации, а также риски, связанные с глобальными климатическими изменениями. На основе анализа новейших исследований российских и зарубежных ученых рассмотрены происходящие и прогнозируемые опасные природные процессы и явления Арктической зоны Российской Федерации, такие как геоморфологические, биологические, гидрологические, сейсмические и другие. Климатические условия Арктики, их изменения следует рассматривать не только как источник

участившихся опасных природных явлений, а как отражение негативных изменений в окружающей среде, наносящих ущерб условиям проживания населения, его здоровью, работе предприятий, транспорта, социальной инфраструктуре.

**Ключевые слова:** Арктическая зона Российской Федерации, опасные природные процессы и явления, чрезвычайные ситуации, глобальное потепление

## INFLUENCE OF DANGEROUS NATURAL PROCESSES AND PHENOMENA ON THE SAFETY OF ECONOMIC ACTIVITY IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

M.S. Khvostova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia; marinakhvostova@list.ru

**Abstract:** The article describes the current situation and prospects for the development of economic activity in the Arctic zone of the Russian Federation, as well as the risks associated with global climate change. Based on the analysis of the latest research by Russian and foreign scientists, the current and predicted dangerous natural processes and phenomena of the Arctic zone of the Russian Federation, such as geomorphological, biological, hydrological, seismic and others, are considered. Climate conditions in the Arctic and their changes should be considered not only as a source of frequent natural hazards, but also as a reflection of negative changes in the environment that damage the living conditions of the population, their health, the work of enterprises, transport, and social infrastructure.

**Keywords:** Arctic zone of the Russian Federation, dangerous natural processes and phenomena, emergencies, global warming

### Введение Современное положение и перспективы развития хозяйственной деятельности в Арктической зоне РФ

Несмотря на суровые природно-климатические условия Арктики, человек давно заселил ее территории и продолжает их освоение. Хозяйственная дея-

тельность в российской Арктике связана, прежде всего, с поисками месторождений нефти и газа и дальнейшей их эксплуатацией, ведь по оценкам специалистов, около 20% мировых запасов газа и нефти приходится на Арктический шельф [1].

Другим направлением хозяйственной деятельности в Арктике является

возрождение Северного морского пути (СМП). СМП имеет высокое транзитное значение как маршрут, связывающий западные и восточные регионы РФ. Кроме того, для России очень выгоден и ожидаемый рост международных транзитных перевозок в рамках создания единой транспортной системы сообщений между Западной Европой и странами Азиатско-Тихоокеанского региона, а также Северо-Тихоокеанским побережьем США и Канады [2-4].

Важно отметить, что в Арктической зоне РФ (АЗРФ) располагаются ядерные и радиационно опасные объекты [5]. К ним относятся прежде всего объекты стратегических сил сдерживания в целях недопущения агрессии против Российской Федерации и ее союзников. Также на базе ФГУП «Атомфлот» (г. Мурманск) действует единый ледокольно-технологический комплекс гражданского атомного флота Российской Федерации. В настоящее время в состав действующего флота входят: два атомных ледокола с двухреакторной ядерной энергетической установкой - атомоходы «Ямал», «50 лет Победы»; два ледокола – «Таймыр» и «Вайгач» – с однореакторной установкой; атомный лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть». В состав флота атомного технологического обслуживания входят две плавучие технические базы – «Имандра» и «Лотта», спецтанкер «Серебрянка» для жидких радиоактивных отходов (РАО), многофункциональный контейнеровоз «Россита». С 1989 г. по настоящее время выведены из эксплуатации 5 атомных ледоколов. Построены и будут введены в эксплуатацию 2 новых универсальных атомных ледокола проекта 22220 (ЛК-60Я) типа «Арктика». В соответствии со «Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (далее – Стратегия) планируется строительство не менее пяти универсальных атомных ледоколов проекта 22220 (ЛК-60Я) типа «Арктика» и трех атомных ледоколов проекта «Лидер» [6].

В Мурманской и Архангельской областях расположены судоремонтные и судостроительные заводы как гражданского, так и военного профиля. К ним относятся – АО «ЦС «Звездочка», ОАО «ПО «Севмаш», судоремонтный завод «Нерпа», 35-й судоремонтный завод и др. (рис.1). Важнейшими задачами этих предприятий являются поддержание технической готовности атомных подводных сил России, работы по ремонту, модернизации и утилизации атомных подводных лодок (АПЛ).

Многолетняя деятельность в Арктике военного и гражданского атомного флота не могла не привести к образованию большого количества РАО, которые во второй половине 20-го века не смогли утилизировать безопасным способом, а захоранивали в морях Северного Ледовитого океана. В 1959-1992 гг. в Арктике (в Баренцевом и Карском морях) происходило затопление жидких и твердых радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации АПЛ и атомных ледоколов. Затопление проводилось в специально выбранных районах моря вне зон интенсивного судоходства и рыболовного промысла [8].

По опубликованным к настоящему времени данным на дне морей Западной Арктики находятся 3 АПЛ, 5 реакторных отсеков с корабельными и судовыми ядерными энергетическими установками, 19 судов, в том числе баржа с реактором, выгруженным из АПЛ, 735 радиоактивных конструкций и блоков, затопленных без герметичной упаковки, а также свыше 17 тыс. контейнеров с РАО [9, 10]. Несовершенство технологий по обращению с РАО, ошибочное убеждение в безопасности захоронения РАО в морях привели к тому, что часть РАО, особенно на ранних стадиях этих операций, захоранивалась в морях без уточнения их радионуклидного состава и активности.

Затонувшие и затопленные объекты, содержащие отработавшее ядерное топливо и РАО в настоящее время не представляют реальной радиозэкологической опасности для населения и природной

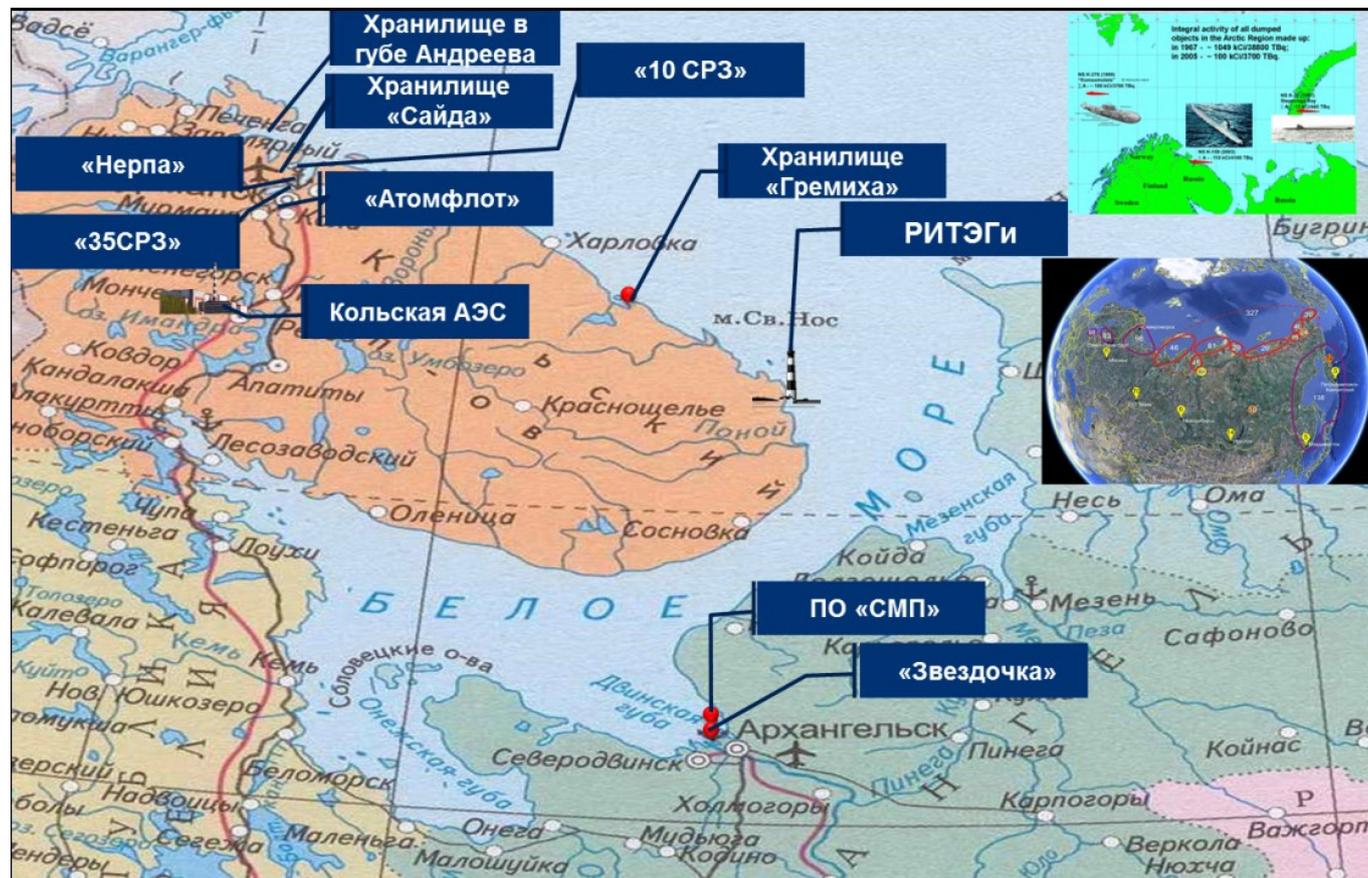


Рисунок 1 – Радиационно опасные объекты Мурманской и Архангельской областей [7].

среды, но их следует отнести к источникам потенциальной опасности, масштабы и последствия которой будут зависеть от состояния защитных барьеров, внешних воздействий (в том числе природного характера) и механизмов миграции радиоактивных веществ в морских экосистемах.

Сегодня в АЗРФ работает Северо-Западный центр по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО», который представлен тремя отделениями. Отделение Гремиха (Мурманская область, ЗАТО г. Островной) – создано в целях обеспечения эксплуатации АПЛ, дислоцированных в пункте Гремиха, проведения их доковых осмотров и ремонтов, хранения отработавшего ядерного топлива АПЛ после перегрузки, хранения РАО. Отделение губа Андреева (Мурманская область, ЗАТО г. Заозерск) – хранилище отработавшего ядерного топлива и центр по обращению с РАО. Отделение Сайда-Губа (Мурманская область, ЗАТО г. Александровск) – пункт длительного хранения реакторных отсеков.

Кроме того, в АЗРФ функционируют атомные электрические станции (АЭС).

В г. Полярные Зори Мурманской области с 1973 г. эксплуатируется Кольская АЭС, имеющая 4 энергоблока с водо-водяными реакторами под давлением (ВВЭР-440). Вблизи г. Билибино (Чукотский АО) в зоне вечной мерзлоты в 1974 г. была построена Билибинская атомная теплоэлектроцентраль (АТЭЦ). На станции работают 3 блока ЭГП-6 (графитовые каналные реакторы раннего периода), еще один блок – в процессе вывода из эксплуатации.

В декабре 2019 г. в г. Певек (Чукотский АО) первую электроэнергию в сеть выдала плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) на базе плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» (ПЭБ). ПЭБ представляет собой новый класс энергоисточников на базе российских технологий атомного судостроения. ПЭБ «Академик Ломоносов», предлагаемый для энергообеспечения крупных промышленных предприятий, портовых городов, комплексов по добыче и переработке нефти и газа на шельфе морей, создается на основе серийной энергетической установки атомных ледоколов. Он оснащен двумя реакторными

установками КЛТ-40С. Вместе они способны обеспечивать в номинальном режиме выдачу в береговые сети 70 МВт электроэнергии и до 50 Гкал/ч тепловой энергии для нагрева теплофикационной воды [11]. ПАТЭС в г. Певек пока является единственным подобным объектом в мире, но, учитывая перспективы развития АЗРФ и преимущества ПАТЭС перед другими источниками тепла и энергии, возможно тиражирование этого проекта.

В АЗРФ в настоящее время проживает 19 коренных малочисленных народов, располагаются объекты их историко-культурного наследия, имеющие историческую и культурную ценность общемирового значения. Планируется, что близкое знакомство с культурой и образом жизни этих народов станет возможным с развитием круизного арктического туризма и туристско-рекреационных кластеров на территориях г. Кировска, Печенгского, Терского, Таймырского Долгано-Ненецкого муниципальных районов, г. Норильска, г. Дудинки, г. Анадыря, г. Певека и др. [6].

Также в соответствии со Стратегией в Арктической зоне РФ планируется модернизация рыбоперерабатывающих комплексов, предприятий рыбоводных и тепличных хозяйств, животноводческих комплексов, строительство рыболовцев судов. Предполагается и комплексное развитие инфраструктуры морских портов и морских судоходных путей в акваториях СМП, Баренцева, Белого и Печорского морей, расширение возможностей судоходства по Беломоро-Балтийскому каналу, бассейнам рек Онега, Северная Двина, Мезень, Печора, Обь, Енисей, Лена, Колыма и других рек АЗРФ, включая проведение дноуглубительных работ, обустройство портов и портопунктов.

Цель работы – выявить и проанализировать опасные природные процессы и явления, вызванные глобальными климатическими изменениями и ограничивающие развитие хозяйственной деятельности в АЗРФ. Задачами данного исследования являются: анализ геомор-

фологических процессов, рассмотрение биологических чрезвычайных ситуаций, гидрологических опасностей, сейсмической активности региона, представление данных о природных (ландшафтных) пожарах в арктической тундре, разработка рекомендаций, связанных с защитой территорий и населения АЗРФ от природных опасностей.

### **Основная часть** **Актуальность оценки опасных природных явлений в Арктической зоне РФ**

Таким образом, Арктический регион РФ насыщен производственными, энергетическими, военными и другими объектами экономики. При населении 1,7% от численности населения Российской Федерации российская Арктика производит 12% валового внутреннего продукта страны [12]. Уже сейчас данный регион испытывает значительную экологическую нагрузку, а учитывая планы по развитию этой территории, нагрузка будет только увеличиваться, а риски, связанные с ней, будут возрастать. И дело здесь не только в выбросах и сбросах загрязняющих веществ, размещении отходов, техногенных авариях и катастрофах и других негативных воздействиях на окружающую среду. Природно-климатические условия Арктики и глобальные экологические изменения неизбежно приведут к тому, что наибольшую угрозу для хозяйственной деятельности в этом регионе, а также для безопасности объектов экономики, в том числе радиационных, будут представлять опасные природные процессы и вызванные ими природные чрезвычайные ситуации.

В последнее время в научной и специализированной литературе, посвященной исследованию и развитию Арктики, большое внимание уделяют чрезвычайным ситуациям техногенного характера и экологической безопасности опасных промышленных объектов, которые в случае аварийной ситуации могут нанести ущерб окружающей среде [13-15]. Но учитывая суровые климатические условия Арктики, глобальные климатические



изменения, а также планы по развитию арктических проектов, на наш взгляд, все большую значимость и опасность будут представлять чрезвычайные ситуации природного характера.

Основными источниками чрезвычайных ситуаций природного характера могут быть: деградация многолетней (вечной) мерзлоты, обвалы, оползни; снежные лавины; наводнения (весна, осень), ледяные заторы, подвижка льдов; ландшафтные пожары (тундра, мелколесье); снежные бури, штормы; сильные ветры (ураганы), гололед и гололедица и др. Эти явления, способные повлиять на безопасность объектов экономики, могут привести к развитию аварийной ситуации, и как следствие – техногенной чрезвычайной ситуации и ухудшению экологической обстановки. Поэтому важно не только выявить природные опасности, но и смоделировать возможные процессы, просчитать риски природных чрезвычайных ситуаций, разработать мероприятия по минимизации и устранению их последствий. Автором даются следующие определения природной опасности и природного риска. Природная опасность – это процесс или явление природы, в определенных условиях представляющее угрозу для жизни, здоровья и благосостояния людей. Природный риск представляет собой вероятность возникновения неблагоприятных последствий воздействия факторов природной среды на человеческое общество (население, организации, коммуникационные линии и т. п.).

### **Риски геоморфологических процессов в Арктической зоне РФ**

Большую роль в безопасности Арктики играют климатические изменения, способствующие возникновению как новых экономических возможностей, так и рисков для хозяйственной деятельности и окружающей среды. Интенсивное потепление климата в Арктике происходит в 2 - 2,5 раза быстрее, чем в целом на планете, и поэтому уже в последнее десятилетие мы можем наблюдать на ее территории различные геоморфологические

процессы и явления, обусловленные этими климатическими изменениями и представляющими опасность для ведения хозяйственной деятельности.

К таким явлениям можно отнести «криовулканизм». Криовулканизм — вид вулканизма на некоторых планетах и других небесных телах в условиях низких температур. Вместо расплавленных горных пород криовулканы извергают воду, аммиак, метан — как в жидком состоянии (криолаву), так и в газообразном. Такое явление наблюдалось с помощью космических зондов на некоторых планетах и их спутниках, и совсем недавно, как считают некоторые ученые, активизировалось на планете Земля [16].

В Ямальской тундре начиная с 2014 г. обнаружено уже 17 воронок, которые образовались в результате накопления газа в талике — непромерзающем слое земли в области вечной мерзлоты, и последующего взрывообразного выхода этого газа на поверхность [17]. Образованию воронок обычно предшествует появление бугров высотой от двух до пяти метров. Внутри бугра под слоем вечной мерзлоты образуется газонасыщенная полость, пустотное пространство, заполненное газом с большим давлением, который взрывается в результате того, что накопленное пластовое давление превышает давление толщи вышележащих пород. После взрыва образуется кратер (рис. 2).

Что касается причин, по которым именно сейчас наблюдается это явление – единого мнения в научной среде пока не сформировано. Также высказывается гипотеза, что испытания ядерного оружия на Новой Земле в период с 1955 по 1990 г. могли вызвать трещины в толщах вечномерзлых пород [17]. По одним трещинам газ свободно выходит на поверхность, по другим, прорываясь наверх, упирается в прочный ледяной панцирь, что потом и приводит к взрыву и выбросу на поверхность грунтов. Но, всяком случае, уже сейчас ясно, что образование таких кратеров происходит из-за целого комплекса факторов. Практически никем не оспаривается



Рисунок 2 – Кратер на Ямале, образовавшийся в 2014 г. [16].

влияние глобального потепления. Карта, отображающая местоположения кратеров выбросов газа на суше и на дне озер Ямала, а также некоторые объекты хозяйственной инфраструктуры представлена в исследовании Богоявленского В. И., Богоявленского И. В., Каргина Т. Н. и др. [19].

Тем не менее, разные процессы и явления, связанные с выходом газов из недр Земли на поверхность, изучаются давно. По данным высокоразрешающей разведки, практически на всех акваториях Арктики выделяются многочисленные неглубокие залежи газа («газовые карманы») – и зоны газонасыщенных осадков, представляющие опасность для бурения и являющиеся своего рода минами замедленного действия. Активизации газовых факелов (сипов) и выбросов (выхлопов) газа способствуют деградация многолетнемерзлых пород и землетрясения [19]. Сипы были обнаружены и впервые научно описаны в 1984 г. [20]. Они наблюдаются во многих морях Мирового океана, внутриконтинентальных морях и

озерах. Арктика – регион самого широко распространения сипов. Газовые факелы найдены во многих арктических морях — в море Лаптевых, Восточносибирском море, в Чукотском море [21]. Наблюдаются как факелы, так и последствия их деятельности — поля покмарков и плугмарков. Многолетний опыт показал, что выбросы газа могут привести к серьезным повреждениям буровых установок, нефтегазовых промыслов и подводных трубопроводов. Вероятно, что повышение температуры воздуха, воды и почвы приведет к увеличению интенсивности этих процессов.

Другим опасным природным процессом является ускоренное таяние ледников, в том числе – арктических. Так, в 2020 г. сотрудники Научного центра изучения Арктики и Московского государственного университета совершили гляциологическую экспедицию на Полярный Урал для изучения деградации ледника МГУ. В середине XX века ледник МГУ был вторым по величине и самым длинным на Урале, в 1953 г. его длина

превышала 2 километра. Ледник стал деградировать еще в 1970-е годы – он находился в так называемом каре, чашеобразном углублении, где начала скапливаться вода, а затем образовавшийся водоем стал разрушать сам ледник [22]. В последние годы на фоне глобального роста температуры этот процесс ускорился, и сейчас ледник полностью растаял. На его месте образовалось крупное озеро. Его скальные стенки не испытывают больше давление льда, из-за этого может произойти так называемая релаксация породы, и склоны могут обрушиться в озеро, что, в свою очередь, приведет к формированию цунами. Вода из озера будет вымещаться в узкую долину и распространяться вниз. Сейчас ученые пытаются рассчитать риски возникновения природных катаклизмов в этом районе.

Проблема ледниковых озер актуальна во всем мире. За последние 30 лет их площадь на планете увеличилась на 50 процентов [23]. Опасность кроется в том, что такие озера нестабильны: накапливающаяся вода разрушает их стенки, и бурные потоки смывают все на своем пути. Изучение этих процессов позволит оценить риски для возникновения опасных природных явлений, например, гляциального паводка, и необходимости ежегодного мониторинга за состоянием озера.

Также к геоморфологическим процессам, увеличившим свою интенсивность в последние годы, можно отнести просадку бугров пучения, деградацию вечной мерзлоты, приводящей к стремительной водной эрозии, росту обводненности и заозеренности территории, преобразованию котловин термокарстовых озер. Так, в Ямало-Ненецком АО (ЯНАО) идет интенсивная просадка бугров пучения. На основе натурных наблюдений удалось определить скорость просадок, составляющую 20–25 см в год [23]. Также там фиксируют значительные разрушения береговых линий рек, вызванных стремительной водной эрозией. Быстро протекающие эрозионные процессы приводят к разрушению мостов через северные реки. Сказываются также слож-

ные инженерно-геологические условия, ошибки при проектировании и строительстве [24].

Меняющиеся геоморфологические условия в Арктической зоне также влияют на безопасность судоходства. Это определяется не только мелководьем Северного морского пути в Арктике, но и быстрыми геоморфологическими изменениями устьевой зоны рек. Устьевые зоны рек Оби и Иртыша находятся в особых условиях, когда происходят быстрые геоморфологические изменения. С одной стороны, в связи с ростом среднегодовых температур и улучшением ледовой обстановки увеличивается срок навигации, с другой стороны, в результате активной водной эрозии с берегов большое количество взвешенных частиц заполняет устьевые участки рек, глубоководные воронки гидродинамического происхождения забиваются песком и реки мелеют, что резко ухудшает условия судоходства [24].

Говоря об обеспечении безопасности арктических территорий и населения, проживающего на них, необходимо отметить следующее. Для нашей страны на первое место, пожалуй, выйдут последствия, связанные с отступлением вечной мерзлоты, которая охватывает огромную часть территории России, занимая до 65% площади страны [25]. Эти последствия станут реальными угрозами для безопасности населения и территорий АЗРФ. На вечной мерзлоте расположено множество городов и поселков, проложены нефте- и газопроводы, автомобильные и железные дороги, линии электропередачи и коммуникаций. Большинство этих объектов было построено без учета современных процессов деградации многолетней мерзлоты. Риск для объектов инфраструктуры особенно велик там, где мерзлый грунт содержит большое количество льда. К таким районам относятся значительная часть долины реки Лены, Западно-Сибирская равнина, Чукотка и большая часть островных территорий севера европейской части страны, на которых находятся крупные нефтегазовые

комплексы, линии электропередач, Билибинская АЭС.

Так, в ЯНАО за последние десятилетия число дней с сильными морозами ( $-30^{\circ}\text{C}$  и ниже) сократилось. Сильные морозы устанавливаются лишь на короткий интервал времени (до 3–5 суток), тогда как несколько десятилетий назад, они продолжались до месяца и более. В результате не происходит накопление холода в грунтах, поверхностный слой мерзлоты тает [24]. На Чукотке нормы температур воздуха за вегетационный период повысились на  $0,2-0,5^{\circ}\text{C}$ , а за зимний сезон температуры выросли ощутимо – на  $0,7-1,6^{\circ}\text{C}$  [26]. В Мурманской области изменения среднегодовой и сезонной температуры носят порядок градуса [27].

### **Риски биологических чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне РФ**

Активное таяние вечной мерзлоты на арктическом побережье России, происходящее из-за глобального потепления, может привести к возникновению чрезвычайной ситуации биологического характера – вскрытию старых скотомогильников с сибирской язвой, как это произошло на Ямале летом 2016 г. Вспышка сибирской язвы на этой территории произошла впервые за 75 лет. Она возникла на фоне широкомасштабной эпизоотии (распространения заболевания) среди северных оленей, в результате чего пало 2 572 оленя, заболело 24 человека, один из них погиб [28].

Споры сибирской язвы очень устойчивы ко всем неблагоприятным воздействиям и в почве сохраняют жизнеспособность в течение многих десятилетий. При определённом сочетании почвенных условий (температура, влажность, pH и др.) споры могут прорасти, тем самым поддерживая длительное существование почвенного очага.

В конце XIX – первой половине XX веков эпизоотии сибирской язвы на севере России были довольно частым явлением. По некоторым оценкам, только в тундровой зоне европейской территории России в 1897–1925 гг. пало около 1,5 млн

олений. Оленеводы, не имеющие возможности бороться с болезнью, бросали больных и павших животных и кочевали дальше с оставшимися. Образовывались «падёжные места», представляющие серьёзную эпизоотическую и эпидемическую угрозу в течение многих лет. На полуострове Ямал таких мест зарегистрировано более 60 [29]. На территории ЯНАО в период 1898 – 1931 гг. в ходе 66 эпизоотий пало более 1 млн оленей. Последняя эпизоотия, не включая 2016 г., отмечена в 1941 г., когда погибло 6700 оленей. Таким образом, в зоне северного оленеводства имеется большое количество почвенных очагов сибирской язвы и неучтённых скотомогильников, которые могут стать источником заражения животных и людей.

Причинами последних эпизоотии и эпидемической вспышки послужили следующие факторы. Во-первых, аномально высокие температуры июня и июля 2016 г. привели к тому, что произошла активация очагов болезни. Во-вторых, слабая изученность территории на предмет выявления почвенных очагов сибирской язвы и, как следствие, отсутствие знаков опасности, недостаток информации у оленеводов. В-третьих, недостаточная разветвленность и укомплектованность ветеринарной службы в ЯНАО (недостаток финансирования, отсутствие оперативной связи с оленеводами-кочевниками, лабораторной базы, транспорта) привели к задержке в диагностике и постановке диагноза заболевшим. В-четвертых, в 2007 г. решением правительства ЯНАО из плана противоэпизоотических мероприятий на территории округа была исключена вакцинация северных оленей против сибирской язвы. Иммунизация населения из групп риска в округе также не проводилась. Совокупность этих факторов и привела к чрезвычайной ситуации биологического характера.

Из этого события были извлечены уроки, сделаны выводы, но тем не менее, ситуация остается тревожной. По данным Россельхознадзора в стране более 17 тысяч захоронений «биологических

отходов», из них три с лишним тысячи — с сибирской язвой [30]. Споры сибирской язвы в условиях многолетней мерзлоты хранятся в останках умерших животных веками. Оттаивание почвы, в которой они лежат, означает вскрытие этих хранилищ. Вспышки болезни могут произойти после активации очагов (вымывания спор на поверхность) во время половодий, раскопок, таяния льда или других процессов, происходящих в земной коре. Риск таяния скотомогильников действительно очень велик, при этом неравномерен: где-то риск таяния нулевой, а где-то всё может происходить очень быстро. Надо понимать, что это долгосрочный процесс на весь XXI век. Все прогнозы говорят о том, что будет всё более глубокое летнее протаивание вечной мерзлоты по всей полосе, начиная от Архангельской области до Якутии, Колымы и Южной Сибири.

Не исключено, что в результате деградации многолетней мерзлоты на поверхность земли могут выйти и другие инфекционные агенты – древние вирусы и бактерии, которые могут негативно повлиять на человека и все компоненты сформировавшейся современной биосферы.

Но глобальное потепление и ухудшение глобальной экологической обстановки несут биологические риски не только для территорий, но и акваторий. В сентябре 2020 г. внимание СМИ, граждан и ученых привлекла массовая гибель морских животных и изменение органолептических свойств воды в Авачинской бухте Тихого океана [31]. После взятия проб и тщательного изучения был сделан вывод, что причиной гибели морских животных явилось кислородное голодание из-за так называемых «красных приливов» — бурного развития микроводорослей, поглощающих кислород и вырабатывающих токсины [32]. Ежегодно в мире регистрируются десятки токсичных «красных приливов» с убытками более миллиона долларов. «Красные приливы» наносят существенный ущерб рыбному хозяйству и аквакультуре. Бурному развитию таких водорослей может способ-

ствовать необычная гидрологическая и гидрохимическая ситуация, температурная аномалия, сила, направления ветров, поверхностных и глубинных течений, межвидовая конкуренция и многие другие факторы, в том числе антропогенные.

Не исключено, что меняющаяся гидрологическая и гидрохимическая обстановка в морях Северного Ледовитого океана тоже сможет привести к подобного рода ситуациям. Как показало событие, произошедшее в Авачинской бухте, положение осложняется тем, что в стране отсутствуют регулярные наблюдения за процессами, происходящими в морях, омывающих Россию. Отсутствие данных о состоянии вод и гидробионтов приводит к запоздалой реакции соответствующих служб и ведомств, способно привести к ошибочным действиям, неэффективности мероприятий по устранению причин и последствий опасных природных явлений.

Одним из таких процессов, требующих пристального и постоянного изучения, является закисление Северного Ледовитого океана. Закисление океана представляет собой явление, в ходе которого воды океана постепенно становятся менее щелочными в результате повышения концентрации углекислого газа в атмосфере и его растворения в океане [33]. Дается неутешительный прогноз, что, если допустить протекание этого процесса без какого-либо сдерживания, он может иметь значительные последствия для морских экосистем и условий жизни во всем мире, равно как и для углеродного цикла. В последние десятилетия имело место заметное увеличение концентрации углекислого газа в верхнем слое морской водной толщи, что может быть обусловлено пропорциональным повышением содержания углекислого газа в атмосфере, как результат хозяйственной деятельности человека. Северный Ледовитый океан поглощает углекислый газ активнее других океанов, потому что он самый холодный из них - при низких температурах углекислый газ лучше растворяется в воде. Кроме

того, это единственный океан, окруженный вечной мерзлотой, которая активно деградирует, высвобождая древнее органическое вещество, вовлекаемое в современный цикл углерода.

Тем не менее, биогеохимические последствия таяния многолетней мерзлоты и связанное с этим закисление шельфовых вод Северного Ледовитого океана, до настоящего времени изучены недостаточно. Существует лишь общее понимание протекающих процессов и есть некоторые данные, полученные в ходе научно-исследовательских экспедиций. Так, отмечается, что вода повышенной кислотности из Восточно-Сибирского шельфа поступает в глубокую часть Северного Ледовитого океана, создавая опасность для всей его экосистемы [34]. Она не только растворяет панцири и скелеты морских организмов, содержащие кальций, но и нарушает баланс в пищевых цепях, определяющих продуктивность биоты Северного Ледовитого океана. По мере дальнейшего роста температур в Арктическом регионе, скорость таяния мерзлоты будет нарастать, а сток рек – увеличиваться. Это означает, что в воды Северного Ледовитого океана будет попадать еще больше углекислоты. В конечном итоге это может привести к тому, что значительная часть Северного Ледовитого океана станет источником углекислого газа для атмосферы планеты, в то время как до настоящего времени этот океан считался главным «стоком» для избыточного атмосферного углекислого газа. Потенциально закисление Северного Ледовитого океана может отразиться как на промысловом рыболовстве, которое играет важную роль в экономике северных стран, в том числе России, так и на морских ресурсах, используемых коренным населением Арктики.

### **Гидрологические опасности в Арктической зоне РФ**

При сохранении тренда на потепление климата Арктики будут упрощаться ледовые условия. Однако при этом возрастут риски, связанные с усилением

ветро-волновой активности, с повышением уровня моря. Вследствие сложения ряда факторов усилится разрушение ледистых и рыхлых берегов. Ветро-волновая абразия уже сейчас становится одним из значимых факторов разрушения берегов крупных рек, портовых сооружений, причалов и защитных сооружений, строящихся в АЗРФ [35].

По мере потепления климата и отступления морского льда Арктика меняется. Покрытые льдом просторы теперь имеют сезон все более открытой воды, которая, по прогнозам, распространится на весь Северный Ледовитый океан до середины этого столетия. Сильный арктический ветер (шторм) и наличие открытой воды будут способствовать возникновению арктической зыби – огромных волн, которые могут добавить в ситуацию в регионе новый и непредсказуемый элемент [36]. Это может представлять опасность для судовых и нефтяных компаний, которые рассчитывают на работы в свободных ото льда северных водах. Статистика показывает, что почти все жертвы и потери в море являются следствием штормовых условий.

Кроме того, формирование интенсивной ветро-волновой активности может приводить к обратной связи – все большему увеличению площади открытой воды по мере того, как большие волны будут разбивать оставшиеся летние льдины.

Климатообразование Арктики – сложная система, и между ее элементами есть множество положительных обратных связей. Так, отражающая способность льда в шесть раз выше, чем у чистой воды. Соответственно, чем меньше льда присутствует в океане, тем больше солнечной энергии поглощается его поверхностью. То есть, тем сильнее вода нагревается и, соответственно, больше ее испаряется. И это тоже ускоряет глобальное потепление, ведь водяной пар – тоже парниковый газ, причем, даже более активный, нежели углекислый газ.

Ранее эксперты предсказали, что Северному Ледовитому океану уготована участь стать основополагающей

компонентой пополнения вод Атлантического океана. Ученые пришли к подобному выводу, когда увидели много общих чертаний в движении водных потоков вышеуказанных водоемов. Кроме этого, вследствие таяния ледников происходит смешивание вод океанов [37].

Все эти процессы и явления требуют тщательного изучения и анализа. Так, в октябре 2020 г. завершилась крупнейшая в мире арктическая экспедиция MOSAiC. В ней приняли участие 300 ученых из 20 стран мира. Они провели на Северном полюсе 389 дней, преодолев 3400 километров [38]. Цель экспедиции - сбор данных об атмосфере, океане, морском льде и полярных экосистемах. Полученные в ходе проекта данные помогут усовершенствовать модели полярной атмосферы и океана, улучшить прогнозы погоды высокого разрешения в Арктике, восполнить недостающие пробелы в понимании Арктики и климатической системы.

Ученые назвали увиденную ими в летний сезон картину «драматичной». Так, большая часть морского льда в океане растаяла. Периодически судно проходило через обширные участки открытой воды, простирающиеся до горизонта. Только на самом севере ученым удалось увидеть «сильно размывтый, растаявший, тонкий и хрупкий лед». Если тенденция к потеплению сохранится, через несколько десятков лет Арктика летом будет полностью освобождаться ото льда [39].

Арктика относится к числу регионов мира, наиболее подверженных климатическим изменениям. Так, с начала постоянных наблюдений (то есть с 1970-х годов) площадь морского льда уменьшалась на 12% каждое десятилетие. Сейчас количество морского льда сократилось так сильно, что даже при условии холодной зимы не сможет восстановиться до прежних уровней. Проанализировав показатели за несколько последних десятилетий, ученые пришли к выводу, что колебания температур в Арктике вышли за рамки обычной сезонной изменчивости и свидетельствуют в том, что эта часть планеты переходит к новой климатической фазе [40].

По прогнозам, и осенние, и зимние месяцы в Арктике будут стабильно теплыми, и к середине текущего столетия климат изменится. В течение 20-60 дней в году вместо снегопадов станут идти дожди. К концу XXI века, если нынешние тенденции сохранятся, в Арктику придут настоящие сезоны дождей продолжительностью от двух до трех месяцев (60-90 дней), а 3-10 месяцев в году она будет лишена льда.

Беспрецедентная скорость, с которой тают арктические льды, может поставить под угрозу выживание коренных народов северных территорий в связи с нарушением их традиционного образа жизни, привести к затоплению больших площадей, исчезновению отдельных биологических видов, таких как белые медведи, кольчатые нерпы и др., к разрушению инфраструктуры населенных пунктов.

Гидрологические изменения коснутся и рек АЗРФ. Ожидается сокращение периода ледостава на сибирских реках до 1527 суток с одновременным уменьшением максимальной толщины льда на 20–40% [41]. Ожидаются также значительные изменения в сроках и процессах замерзания и вскрытия рек и водоемов. С одной стороны, эти изменения будут способствовать заметному продлению времени речного судоходства, а с другой стороны, сократят период и возможности доставки грузов в труднодоступные районы по зимним автомобильным трассам, так называемым «зимникам», оборудованным по замерзшим руслам больших рек. Эти процессы имеют огромное значение для субъектов Российской Федерации Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, особенно для Якутии, Магаданской области и Чукотского автономного округа, где основной объем грузов доставляется по речным руслам – летом судами, а зимой – автомобильным транспортом.

Важным последствием изменений климата для арктических территорий России станут проблемы, связанные с наводнениями и паводками, которые из всех стихийных бедствий занимают

первое место по суммарному среднегодовому ущербу. В связи с прогнозируемым увеличением максимальных запасов воды в снежном покрове мощность весенних паводков может возрасти на реках Архангельской области, Республики Коми, на реках водосбора Енисея и Лены. В районах, подверженных опасности катастрофических и опасных наводнений в период весеннего половодья, где максимальные расходы усложняются заторами льда, максимальная продолжительность затопления пойменных участков может возрасти до 24 суток (в настоящее время она составляет до 12 суток) [42]. При этом максимальные расходы воды могут превышать их средние многолетние значения в два раза. В ближайшие годы ожидается повышение частоты заторных наводнений на реке Лена примерно в два раза.

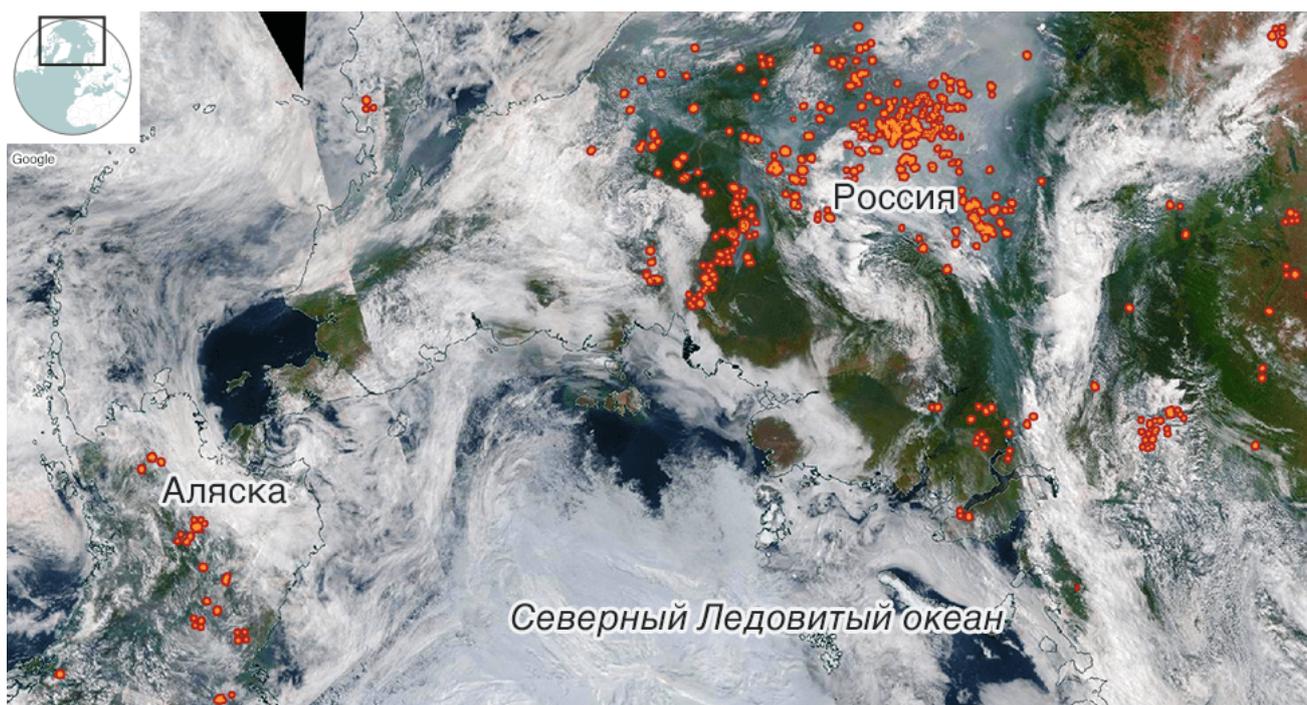
Увеличение осадков и стока северных рек приведет к повышению мощности весенних паводков, создаст новые проблемы по защите населения и территорий от наводнений. Рост частоты и масштабы наводнений, в том числе катастрофических, как за счет увеличения запасов воды в снежном покрове, так и за счет обильных дождей, что может стать причиной возникновения в том

числе и чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

### Сейсмическая активность Арктической зоны РФ

В настоящее время Геофизическая служба РАН - основная российская организация, ведущая контроль сейсмических событий (землетрясения), имеет очень ограниченную сеть сейсмологических станций в Арктике. За счет этого создается ошибочное впечатление об асейсмичности данного региона и большей части Северного Ледовитого океана. При этом на полуострове Ямал и во всем ЯНАО сейсмические станции вообще отсутствуют [43].

Чукотка и Корякское нагорье также еще недостаточно изучены в сейсмическом отношении из-за отсутствия здесь необходимого числа сейсмических станций. Тем не менее, в 1928 г. у восточного побережья Чукотки возник ряд сильных землетрясений с магнитудами  $M=6.9$ ,  $6.3$ ,  $6.4$  и  $6.2$ . Там же в 1996 г. произошло землетрясение с  $M=6.2$ . Сильное землетрясение в Корякском нагорье произошло в 1991 г. (Хаилинское землетрясение  $M=7.0$ ,  $I_0=8-9$  баллов). Еще более значительное ( $M=7.8$ ,  $I_0=9-10$  баллов) землетрясение случилось в Корякском нагорье



Источник: Nasa Worldview, 1 Августа

Рисунок 3 – Снимок со спутника пожаров на территории России и Аляски [46].



21 апреля 2006 г. Больше всего пострадали поселки Тиличики и Корф, откуда было эвакуировано свыше полутысячи жителей аварийных домов [44, 45]. Благодаря редкой заселенности, погибших не было. Подземные толчки ощущались в Олюторском и Карагинском районах Корякии. В результате стихии пострадали несколько деревень.

Таким образом, повышенная сейсмичность Чукотского моря и его обрамления является давно установленным фактом. Тем не менее в этом отношении данный регион остается одним из наиболее слабо изученных. Все вышесказанное, конечно, неприемлемо для обеспечения мониторинга сейсмической обстановки в районах размещения опасных объектов (объектов использования атомной энергии, нефтегазопромыслов, портовой инфраструктуры и др.)

### **Природные (ландшафтные) пожары в арктической тундре**

Также к опасностям природного характера в последние годы прибавилось возрастание числа и масштабов пожаров в арктической тундре, которые ранее были достаточно редким явлением [46]. Так отмечается, что за последние 20 лет число тундровых пожаров выросло более чем вдвое. Основной причиной природных пожаров в тундре является антропогенный фактор - неосторожное обращение с огнем, поджог. Все это обусловлено развитием хозяйственной деятельности на территории - нефтегазодобывающей отрасли, транспортной инфраструктуры, арктического туризма и т.д. Но есть и большая вероятность возникновения природного пожара в арктической тундре из-за сухих гроз, чему способствуют более высокие летние температуры воздуха на фоне глобального потепления и, как следствие, - лучшее прогревание почвы, испарение почвенной влаги, высыхание растительности. Все это создает условия для более частого возникновения природных пожаров (рис.3).

Природные пожары в тундре могут распространяться на большие терри-

тории за счет высокой скорости ветра, однородности подстилающей поверхности и представлять опасность для объектов экономики и населенных пунктов. Кроме того, пожары способствуют поступлению в атмосферу большого количества углекислого газа и сажи. В свою очередь, углекислый газ обладает парниковым эффектом, а сажа, переносимая воздушными массами на многие километры, способна осаждаться на лед, уменьшать его отражательную способность, что также способствует ускоренным процессам таяния.

### **Заключение**

Таким образом, наблюдающееся глобальное потепление на планете создает для арктических территорий России ситуацию, когда необходимы осознание новых угроз и в то же время защита национальных интересов в отношении АЗРФ. Климатические условия Арктики, их изменения следует рассматривать не только как источник участившихся опасных природных явлений и стихийных бедствий, а как отражение негативных изменений в окружающей среде, наносящих ущерб условиям проживания населения, его здоровью, работе предприятий, транспорта, социальной инфраструктуре.

На настоящий момент основными нерешенными вопросами, усугубляющими риски опасных природных явлений в АЗРФ остаются такие проблемы, как отсутствие системы экстренной эвакуации и оказания медицинской помощи членам экипажей морских судов в акватории Северного морского пути, низкий уровень развития информационно-коммуникационной инфраструктуры, недостаточная проработка инженерно-технических решений, обеспечивающих устойчивое функционирование инфраструктуры в условиях климатических изменений.

Также для успешного и эффективного развития АЗРФ необходимо на федеральном уровне решение следующих задач, связанных с защитой территорий и населения АЗРФ от природных опасностей:

- развитие государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в целях осуществления мероприятий по чрезвычайным ситуациям природного характера;
  - развертывание космической системы, обеспечивающей получение гидрометеорологических данных высокого временного разрешения по полярному региону Земли;
  - выявление и анализ рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, выработка способов предупреждения таких ситуаций;
  - повышение уровня защищенности критически важных и потенциально опасных объектов, обеспечение устойчивости их функционирования при чрезвычайных ситуациях в арктических условиях;
  - развитие системы антикризисного управления в рамках единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций;
  - развитие (с учетом решаемых задач и природно-климатических условий) арктических комплексных аварийно-спасательных центров, в том числе расширение их технических и тактических возможностей, связанных с предупреждением чрезвычайных ситуаций и реагированием на такие ситуации, совершенствование их структуры, состава и материально-технического обеспечения, расширение инфраструктуры базирования;
  - организация учений и тренировок по проверке готовности сил и средств арктических государств к ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
  - обеспечение эвакуации (переселения) граждан из населенных пунктов из-за последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.
- Для повышения уровня изученности природных явлений и картирования зон распространения потенциально опасных природных явлений и процессов, представляющих проблемы для освоения ресурсов АЗРФ, необходимо большое внимание уделять фундаментальным научным исследованиям. Криолито- и криогидросферы Арктики на данный момент характеризуются низким уровнем фундаментальных научных исследований опасных процессов и явлений, часть которых стала известна лишь в последние годы. Также необходимо обратить внимание на уже накопленные научно-исследовательские материалы и данные, которые могут помочь в решении научных и производственных задач развития АЗРФ, мониторинга, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера.
- Учитывая рассмотренные выше опасные природные процессы и явления и связанные с ними риски, которые будут возрастать из-за широкого промышленного освоения этого региона и изменений климата, принимая во внимание многообразие этих природных опасностей и рисков, их влияние друг на друга, а также серьёзность возможных последствий, необходимо разрабатывать долгосрочные инвестиционные программы и вырабатывать соответствующую внутреннюю и внешнюю политику в отношении северных регионов страны по обеспечению их социально-экономического развития и комплексной безопасности.

**Список литературы:**

1. Нефтегазовый клондайк Арктики URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2018/12/545/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2018/12/545/) (Дата обращения: 04.12.2020)
2. Белый О.В., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Северный морской путь: проблемы и перспективы // Транспорт Российской Федерации. 2011. Т. 32. № 1. С. 8-12.
3. Бабич С.В., Яковлева А.А. Транспортно-логистический потенциал северного морского пути в евроазиатском экономическом пространстве // Российская Арктика 2019, № 4. С. 5-14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37138435> (Дата обращения: 04.12.2020)
4. Багдасарян А.А. Основные экологические проблемы Северного морского пути в перспективе его развития / А.А. Багдасарян // Российская Арктика. – 2020. – № 9. – С. 17-29. URL: <https://russian-arctic.info/info/articles/ecology/osnovnyye-ekologicheskie-problemy-severnogo-morskogo-puti-v-perspektive-ego-razvitiya/> (Дата обращения: 04.12.2020)
5. Хвостова М.С. Вопросы радиоэкологии Арктического региона России / М.С. Хвостова // Российская Арктика. – 2019. – №4. – С.58. URL: <https://russian-arctic.info/info/articles/ecology/voprosy-radioekologii-arkticheskogo-regiona-rossii/> (Дата обращения: 05.12.2020)
6. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» URL: <http://www.kremlin.ru/acts/news/64274> (Дата обращения: 02.12.2020)
7. Григорьев А.В. Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в арктическом регионе. Безопасный город в Арктике. Ликвидация ядерного наследия в Арктическом регионе России // Атомная энергия. 18.09.2016. <https://www.atomic-energy.ru/articles/2016/08/18/68368?page=2> (Дата обращения 03.01.2021)
8. Сивинцев, Ю. В. Затопление радиоактивных отходов - прошлое, настоящее, будущее / Ю. В. Сивинцев // Бюл. по атом. энергии. - 2008. - № 9. - С. 20-30. - АКУНБ.
9. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Губин и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в Арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). - М., ИздАТ, 2005г. 624 с.
10. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Москва. ИБРАЭ РАН. 2009. 82 с.
11. Технический проект плавучего энергетического блока с реакторной установкой КЛТ-40С пр. 20870. ОАО «ЦКБ «Айсберг», 2001 г. 420 с.
12. Кашин В.И. Законодательное обеспечение развития и освоения Арктики URL: <https://kprf.ru/activity/ecology/152270.html> (Дата обращения: 03.12.2020)
13. Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 97—118. — DOI:10.30686/1609-9192-2020-1-97-118.
14. Брехунцов А.М., Петров Ю.В., Прыкова О.А. Экологические аспекты освоения природно-ресурсного потенциала российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2020. — №3(39). — С. 34-47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47.
15. Чуприян А.П., Веселов И.А., Сорокина И.В., Наумова Т.Е. Мероприятия, проводимые МЧС России по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктике // Арктика: экология и экономика. – 2013. – №1(9). – С. 70-77.
16. Buldovicz, S.N., Khilimonyuk, V.Z., Bychkov, A.Y. et al. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). Sci Rep 8, 13534 (2018). URL: [https://www.researchgate.net/publication/327559512\\_Cryovolcanism\\_on\\_the\\_Earth-Origin\\_of\\_a\\_Spectacular\\_Crater\\_in\\_the\\_Yamal\\_Peninsula\\_Russia](https://www.researchgate.net/publication/327559512_Cryovolcanism_on_the_Earth-Origin_of_a_Spectacular_Crater_in_the_Yamal_Peninsula_Russia) (Дата обращения: 01.12.2020)
17. Гигантские воронки на Ямале: исследователи – об уникальном природном явлении. URL: <http://www.sib-science.info/ru/institutes/gigantskie-03092020> (Дата обращения 15.01.2021)
18. Ученые: Появление воронок в Арктике можно предсказать URL: <https://rg.ru/2014/12/09/reg-urfo/prognoz.html> (Дата обращения: 01.12.2020)
19. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 31—47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47
20. Бондур В.Г., Кузнецова Т.В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования URL: <http://evgengusev.narod.ru/antropogen/bondur-2015.html> (Дата обращения: 01.12.2020)
21. Шнюков Е.Ф., Топачевский И.В. Газовые сипы Мирового океана // Геологія і корисні копалини Світового океану. 2019. 15, № 2. С. 3—15. URL: <http://gpimo.nas.gov.ua/ru/node/837>(Дата обращения: 04.12.2020)
22. Цунами на Полярном Урале: почему исчез ледник МГУ URL: <https://www.vesti.ru/article/2453965> (Дата обращения: 05.12.2020)
23. Ткачев Б.П. Гидрометеорологическое обеспечение устойчивого развития Севера (Арктики). Безопасный Север – чистая Арктика: материалы I Всероссийской научно-практической конференции (г. Сургут, 26 октября 2018 г.). Сургутский гос. ун-т. Сургут: ООО «Печатный мир

- г. Сургут», 2018. С. 14–25.
24. Ткачев Б.П., Кунин С.А. Риски геоморфологических процессов на севере (Арктике) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 3. – С. 29-33. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13031> (Дата обращения: 03.12.2020)
  25. Котляков В.М. Многолетняя мерзлота // Большая российская энциклопедия, 2004. URL: <https://bigenc.ru/geology/text/5556854> (Дата обращения: 03.12.2020)
  26. Ушаков М.В. Современные изменения термического режима вегетационного и зимнего периодов на Чукотке // Географический вестник. Метеорология. № 2 (41). 2017. С. 81-90.
  27. Демин В.И. Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений // Труды Кольского научного центра РАН. С.98-110.
  28. Ясюкевич В.В., Ясюкевич Н.В. Сибирская язва // ПЭММЭ, Том XXVII, № 2, 2016. С. 87-101.
  29. Лайшев К.А., Забродин В.А., Прокудин А.В., Самандас А.М. Основные и малоизученные болезни таймырской популяции диких северных оленей // Генетика и разведение животных. 2017.-N 1. С. 3-8.
  30. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/221745456> (Дата обращения: 05.12.2020)
  31. Специалисты заявили о гибели 95% обитателей морского дна Авачинской бухты URL: <https://ria.ru/20201006/kamchatka-1578353516.html> (Дата обращения: 05.12.2020)
  32. Орлова Т.Ю. Красные приливы и токсические микроводоросли в дальневосточных морях России // Вестник ДВО РАН. 2005. № 1. С. 27-31.
  33. Мировой океан и морское право. Доклад Генерального секретаря. 68 сессия Генеральной Ассамблеи ООН. 36 с. URL: <https://www.refworld.org/cgi-bin/texis/vtx/rwmain/opendocpdf.pdf?reldoc=y&docid=52a9874b4> (Дата обращения: 05.12.2020)
  34. Российские ученые открыли новый механизм закисления вод в Северном Ледовитом океане URL: <https://pro-arctic.ru/19/04/2016/news/21133> (Дата обращения: 05.12.2020)
  35. Фролов А.В. Гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности в Арктике: новые технологии // Российские полярные исследования. 2014. № 4 (18). С. 3–5.
  36. Thomson J., Swell and sea in the emerging Arctic Ocean WE Rogers Geophysical Research Letters 41 (9), 3136-3140/
  37. В Северном Ледовитом океане дайверы увидели редчайшее природное явление URL: [https://www.rusdialog.ru/science/187845\\_1570769815](https://www.rusdialog.ru/science/187845_1570769815) (Дата обращения: 06.12.2020)
  38. Международная экспедиция MOSAiC завершила программу исследований вблизи Северного полюса URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/9718319> (Дата обращения: 06.12.2020)
  39. Арктическая экспедиция заявила об «умирании» Северного Ледовитого океана URL: <https://mir24-tv.turbopages.org/mir24.tv/s/news/16430032/arkticheskaya-ekspediciya-zayavila-ob-umiranii-severnogo-ledovitogo-okeana> (Дата обращения: 06.12.2020)
  40. Landrum, L., Holland, M.M. Extremes become routine in an emerging new Arctic. Nat. Clim. Chang. 10, 1108–1115 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0892-z>
  41. Акимов В.А., Дурнев Р.А., Соколов Ю.И. Защита населения и территорий Российской Федерации в условиях изменения климата. Москва. Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России. 2016. 388 с.
  42. Разумов В.В., Разумова Н.В., Пчелкин В.И. Масштабы и опасность наводнений в Сибирском регионе России // Наука. Инновации. Технологии. № 4. 2015 г. С. 103-144. URL: <https://cyberleninka.ru/journal/n/nauka-innovatsii-tehnologii?i=1053228> (Дата обращения: 07.12.2020)
  43. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-09/2> (Дата обращения: 07.12.2020)
  44. Уломов В.И. Сейсмичность // Большая Российская Энциклопедия (БРЭ). Том «Россия». 2004. С.34-39.
  45. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии (Отв. ред. В.И.Уломов). Том 1. М.: ИФЗ РАН. 1993. 303 с. и Том 2-3. М.: ОИФЗ РАН. 1995. 490 с.
  46. Коннова Л.А., Львова Ю.В., Руднев Е.В. О проблемных вопросах природных пожаров в Арктической тундре // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-problemnyh-voprosah-prirodnih-pozharov-v-arkticheskoy-tundre> (Дата обращения: 07.12.2020)

## References:

1. Neftegazovyy klondajk Arktiki URL: [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2018/12/545/](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2018/12/545/) (accessed 04.12.2020) (In Russian)
2. Belyj O.V., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Severnyj morskoy put': problemy i perspektivy // Transport Rossijskoj Federacii. 2011. T. 32. № 1. S. 8-12. (In Russian)
3. Babich S.V., YAKovleva A.A. Transportno-logisticheskij potencial severnogo morskogo puti v evroaziatskom ekonomicheskom prostranstve // Rossijskaya Arktika 2019, № 4. S. 5-14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=3713843> (accessed 04.12.2020) (In Russian)
4. Bagdasaryan A.A. Osnovnye ekologicheskie problemy Severnogo morskogo puti v perspektive ego razvitiya / A.A. Bagdasaryan // Rossijskaya Arktika. – 2020. – № 9. – S. 17-29. URL:<https://russian-arctic.info/info/articles/ecology/osnovnye-ekologicheskie-problemy-severnogo-morskogo-puti-v-perspektive-ego-razvitiya/> (accessed 04.12.2020) (In Russian)
5. Hvostova M.S. Voprosy radioekologii Arkticheskogo regiona Rossii / M.S. Hvostova // Rossijskaya Arktika. – 2019. – №4. – S.58. URL: <https://russian-arctic.info/info/articles/ecology/voprosy-radioekologii-arkticheskogo-regiona-rossii/> (accessed 05.12.2020) (In Russian)
6. Ukaz Prezidenta RF ot 26 oktyabrya 2020 g. № 645 «O Strategii razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda» URL: <http://www.kremlin.ru/acts/news/64274> (accessed 02.12.2020) (In Russian)
7. Grigor'ev A.V. Problemy preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij v arkticheskome regione. Bezopasnyj gorod v Arktike. Likvidaciya yadernogo naslediya v Arkticheskome regione Rossii // Atomnaya energiya. 18.09.2016. <https://www.atomic-energy.ru/articles/2016/08/18/68368?page=2> (accessed 03.01.2021) (In Russian)
8. Sivincev, YU. V. Zatoplenie radioaktivnyh othodov - proshloe, nastoyashchee, budushchee / YU. V. Sivincev // Byul. po atom. energii. - 2008. - № 9. - S. 20-30. - AKUNB. (In Russian)
9. Sivincev YU.V., Vakulovskij S.M., Vasil'ev A.P., Vysockij V.L., Gubin i dr. Tekhnogennye radionuklidy v moryah, omyvayushchih Rossiyu: radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnyh othodov v Arkticheskie i dal'nevostochnye morya («Belaya kniga-2000»). - M., IzdAT, 2005g. 624 s. (In Russian)
10. Sarkisov A.A., Sivincev YU.V., Vysockij V.L., Nikitin V.S. Atomnoe nasledie holodnoj vojny na dne Arktiki. Moskva. IBRAE RAN. 2009. 82 s. (In Russian)
11. Tekhnicheskij proekt plavuchego energeticheskogo bloka s reaktornoj ustanovkoj KLT-40S pr. 20870. OAO «CKB «Ajsberg», 2001 g. 420 s. (In Russian)
12. Kashin V.I. Zakonodatel'noe obespechenie razvitiya i osvoeniya Arktiki URL: <https://kprf.ru/activity/ecology/152270.html> (accessed 03.12.2020) (In Russian)
13. Bogoyavlenskij V.I. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri osvoenii mestorozhdenij goryuchih iskopaemyh v kriolitosfere Zemli // Gornaya promyshlennost'. — 2020. — № 1. — S. 97—118. — DOI:10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian)
14. Brekhuncov A.M., Petrov YU.V., Prykova O.A. Ekologicheskie aspekty osvoeniya prirodno-resursnogo potenciala rossijskoj Arktiki // Arktika: ekologiya i ekonomika. — 2020. — №3(39). — S. 34-47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47. (In Russian)
15. CHupriyan A.P., Veselov I.A., Sorokina I.V., Naumova T.E. Meropriyatiya, provodimye MCHS Rossii po preduprezhdeniyu i likvidacii chrezvychajnyh situacij v Arktike // Arktika: ekologiya i ekonomika. – 2013. – №1(9). – S. 70-77. (In Russian)
16. Buldovicz, S.N., Khilimonyuk, V.Z., Bychkov, A.Y. et al. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). Sci Rep 8, 13534 (2018). URL: [https://www.researchgate.net/publication/327559512\\_Cryovolcanism\\_on\\_the\\_Earth-Origin\\_of\\_a\\_Spectacular\\_Crater\\_in\\_the\\_Yamal\\_Peninsula\\_Russia](https://www.researchgate.net/publication/327559512_Cryovolcanism_on_the_Earth-Origin_of_a_Spectacular_Crater_in_the_Yamal_Peninsula_Russia) (accessed 01.12.2020) (In English)
17. Gigantskie voronki na YAmale: issledovateli – ob unikal'nom prirodnom yavlenii. URL: <http://www.sib-science.info/ru/institutes/gigantskie-03092020> (accessed 15.01.2021) (In Russian)
18. Uchenye: Poyavlenie voronok v Arktike možno predskazat' URL: <https://rg.ru/2014/12/09/reg-urfo/prognoz.html> (accessed 01.12.2020) (In Russian)
19. Bogoyavlenskij V. I., Bogoyavlenskij I. V., Kargina T. N. i dr. Degazaciya Zemli v Arktike: distancionnye i ekspedicionnye issledovaniya vybrosov gaza na termokarstovyh ozerah // Arktika: ekologiya i ekonomika. — 2019. — № 2 (34). — S. 31—47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47 (In Russian)
20. Bondur V.G., Kuznecova T.V. Vyyavlenie gazovyh sipov v akvatoriyah arkticheskikh morej s ispol'zovaniem dannyh distancionnogo zondirovaniya URL: <http://evgengusev.narod.ru/antropogen/bondur-2015.html> (accessed 01.12.2020) (In Russian)
21. SHnyukov E.F., Topachevskij I.V. Gazovye sipy Mirovogo okeana // Geologiya i korisni kopalini Svitovogo okeanu. 2019. 15, № 2. C. 3—15. URL: <http://gpimo.nas.gov.ua/ru/node/837> (accessed 04.12.2020) (In Russian)
22. Cunami na Polyarnom Urale: pochemu ischez lednik MGU URL: <https://www.vesti.ru/article/2453965> (accessed 05.12.2020) (In Russian)
23. Tkachev B.P. Gidrometeorologicheskoe obespechenie ustojchivogo razvitiya Cevera (Arktiki). Bezopasnyj Sever – chistaya Arktika: materialy I Vserossijskoj nauchnoprakticheskoy konferencii (g. Surgut, 26 oktyabrya 2018 g.). Surgutskij gos. un-t. Surgut: OOO «Pechatnyj mir g. Surgut», 2018. S. 14–25. (In Russian)

24. Tkachev B.P., Kunin S.A. Riski geomorfologicheskikh processov na severe (Arktike) // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. – 2020. – № 3. – S. 29-33. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13031> (accessed 03.12.2020) (In Russian)
25. Kotlyakov V.M. Mnogoletnyaya merzlota // Bol'shaya rossijskaya enciklopediya, 2004. URL: <https://bigenc.ru/geology/text/5556854> (accessed 03.12.2020) (In Russian)
26. Ushakov M.V. Sovremennye izmeneniya termicheskogo rezhima vegetacionnogo i zimnego periodov na CHukotke // Geograficheskij vestnik. Meteorologiya. № 2 (41). 2017. S. 81-90. (In Russian)
27. Demin V.I. Osnovnye klimaticheskie tendencii na Kol'skom poluostrove za period instrumental'nyh meteorologicheskikh izmerenij // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. S.98-110. (In Russian)
28. YAsyukevich V.V., YAsyukevich N.V. Sibirskaya yazva // PEMME, Tom XXVII, № 2, 2016. S. 87-101. (In Russian)
29. Lajshev K.A., Zabrodin V.A., Prokudin A.V., Samandas A.M. Osnovnye i maloizuchennye bolezni tajmyrskoj populyacii dikih severnyh oleney // Genetika i razvedenie zhivotnyh. 2017.-N 1. S. 3-8. (In Russian)
30. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/221745456> (accessed 05.12.2020) (In Russian)
31. Specialisty zayavili o gibeli 95% obitatelej morskogo dna Avachinskoj buhty URL: <https://ria.ru/20201006/kamchatka-1578353516.html> (accessed 05.12.2020) (In Russian)
32. Orlova T.YU. Krasnye prilivy i toksicheskie mikrovdorosli v dal'nevostochnyh moryah Rossii // Vestnik DVO RAN. 2005. №1. S. 27-31. (In Russian)
33. Mirovoj okean i morskoe pravo. Doklad General'nogo sekretarya. 68 sessiya General'noj Assamblei OON. 36 s. URL: <https://www.refworld.org/cgi-bin/teaxis/vtx/rwmain/openssl.pdf?reldoc=y&docid=52a9874b4> (accessed 05.12.2020) (In Russian)
34. Rossijskie uchenye otkryli novyj mekhanizm zakisleniya vod v Severnom Ledovitom okeane URL: <https://pro-arctic.ru/19/04/2016/news/21133> (accessed 05.12.2020) (In Russian)
35. Frolov A.V. Gidrometeorologicheskoe obespechenie morskoy deyatel'nosti v Arktike: novye tekhnologii // Rossijskie polyarnye issledovaniya. 2014. № 4 (18). S. 3-5. (In Russian)
36. Thomson J., Swell and sea in the emerging Arctic Ocean WE Rogers Geophysical Research Letters 41 (9), 3136-3140/ (In English)
37. V Severnom Ledovitom okeane dajvery uvideli redchajshee prirodnoe yavlenie URL: [https://www.rusdialog.ru/science/187845\\_1570769815](https://www.rusdialog.ru/science/187845_1570769815) (accessed 06.12.2020) (In Russian)
38. Mezhdunarodnaya ekspediciya MOSAiC zavershila programmu issledovanij vblizi Severnogo polyusa URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/9718319> (Data obrashcheniya: 06.12.2020) (In Russian)
39. Arkticheskaya ekspediciya zayavila ob «umiranii» Severnogo Ledovitogo okeana URL: <https://mir24-tv.turbopages.org/mir24.tv/s/news/16430032/arkticheskaya-ekspediciya-zayavila-ob-umiranii-severnogo-ledovitogo-okeana> (accessed 06.12.2020) (In Russian)
40. Landrum, L., Holland, M.M. Extremes become routine in an emerging new Arctic. Nat. Clim. Chang. 10, 1108-1115 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0892-z> (In English)
41. Akimov V.A., Durnev R.A., Sokolov YU.I. Zashchita naseleniya i territorij Rossijskoj Federacii v usloviyah izmeneniya klimata. Moskva. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut po problemam grazhdanskoj oborony i chrezvyčajnyh situacij MCHS Rossii. 2016. 388 s.
42. Razumov V.V., Razumova N.V., Pchelkin V.I. Mashtaby i opasnost' navodnenij v Sibirskom regione Rossii // Nauka. Innovacii. Tekhnologii. № 4. 2015 g. S. 103-144. URL: <https://cyberleninka.ru/journal/n/nauka-innovatsii-tehnologii?i=1053228> (accessed 07.12.2020) (In Russian)
43. Bogoyavlenskij V.I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki YAmala i Tajmyra URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-09/2> (accessed 07.12.2020) (In Russian)
44. Ulomov V.I. Sejsmichnost' // Bol'shaya Rossijskaya Enciklopediya (BRE). Tom «Rossiya». 2004. S.34-39. (In Russian)
45. Sejsmichnost' i sejsmicheskoe rajonirovanie Severnoj Evrazii (Otv. red. V.I.Ulomov). Tom 1. M.: IFZ RAN. 1993. 303 s. i Tom 2-3. M.: OIFZ RAN. 1995. 490 s. (In Russian)
46. Konnova L.A., L'vova YU.V., Rudnev E.V. O problemnyh voprosah prirodnyh pozharov v Arkticheskoy tundre // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2020. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-problemnyh-voprosah-prirodnyh-pozharov-v-arkticheskoy-tundre> (accessed 07.12.2020) (In Russian)

UDC 504.064.2.001.18

DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-23-32

**Citing:**

Brekhuntsov A.M., Petrov Y.V., Prykova O.A. Proposals for the legislative support for the creation of a reference observational network for monitoring permafrost soils. 2021; 12: pp. 23-32. (In Russ.). DOI:10.24412/2658-4255-2021-1-23-32.

Received: 25.12.2020

Approved: 12.02.2021

Published: 20.02.2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

## КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОЗДАНИЯ ОПОРНОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

А.М. Брехунцов<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, О.А. Прыкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Многопрофильное научное предприятие «Геодата», г. Тюмень, Россия; ntc@mnpgeodata.ru

**Аннотация:** Изучение многолетнемерзлых пород является одним из важнейших направлений для исследования и мониторинга на территории арктической зоны как на территории РФ, так и по всему миру. В статье предлагается концепция по созданию опорной наблюдательной сети для мониторинга многолетнемерзлых пород. Данная сеть предназначена для полного обследования территории. Имеющихся сетей и отдельных станций не достаточно, так как они носят разрозненный характер. В итоге исследования приведен ряд предложений, направленность которых и

коммерческая (для недропользователей), и управленческая (для государственных структур).

**Ключевые слова:** мерзлотные режимные станции, многолетнемерзлые породы, наблюдательная сеть, недропользование, развитие Арктики

## PROPOSALS FOR THE LEGISLATIVE SUPPORT FOR THE CREATION OF A REFERENCE OBSERVATIONAL NETWORK FOR MONITORING PERMAFROST SOILS

A.M. Brekhuntsov<sup>1</sup>, Y.V. Petrov<sup>1</sup>, O.A. Prykova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Multidisciplinary Scientific Enterprise Geodata LLC, Tyumen, Russian Federation; ntc@mnpgeodata.ru

**Abstract:** The study of permafrost is one of the most important areas of study and monitoring in the Arctic zone, both in the Russian Federation and around the world. Changes in the condition of permafrost can lead to emergencies caused by emergencies during the operation of capital construction facilities for industrial purposes, or infrastructure facilities. To track such changes, it was proposed to create a reference observation network for monitoring permafrost soils. This network is intended for a comprehensive survey of the territory. As a result of this research, a number of proposals are presented, the focus of which is both commercial (for subsurface users) and managerial (for state structures).

**Keywords:** development of the Arctic, observation network, permafrost, permafrost regime stations, subsoil use

### Введение

На сегодняшний день очень активно реализуется арктическая деятельность. В 2014 году была утверждена государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», которая предусматривает такое основное мероприятие, как «Обеспечение хозяйствования в условиях вечномерзлых

грунтов». Для реализации поставленных задач программы необходимо предпринять ряд мер. Изменение пород может привести к аварии, как случилось на севере Красноярского края. В г. Норильске 29 мая 2020 года произошла разгерметизация резервуара, где хранилось топливо, часть нефтепродуктов попала в реку Амбарная. Экстренные службы позднее сообщили, что предельно допустимые

концентрации загрязнителей в реках, куда попало дизельное топливо после аварии, превышены. Для отслеживания изменений в показаниях загрязнения предложено создание опорной наблюдательной сети мониторинга многолетнемерзлых грунтов. Сеть предназначена для комплексного обследования территории. На заседании Совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации Федерального Собрания Российской Федерации на тему «О законодательном обеспечении сохранности многолетнемерзлых грунтов при хозяйственном освоении Арктической зоны Российской Федерации», прошедшем в г. Москва в 2018 году, Брехунцовым А.М. в рамках доклада «Предложения по законодательному обеспечению создания опорной наблюдательной сети мониторинга многолетнемерзлых грунтов (на примере ямало-ненецкого автономного округа)» был внесен ряд предложений, связанных с изучением многолетнемерзлых пород, направленность которых коммерческая и управленческая.

Глобальные природно-климатические изменения выступают источником экологических угроз, прежде всего, для территориальных общественных систем [1,2,3] полярных и циркумполярных широт [4,5,6,7,8]. На территории Арктической зоны Российской Федерации<sup>1</sup>, отличающейся высокой антропогенной вовлеченностью в хозяйственный оборот, трансформационные процессы проявляются более активно, чем в других природных зонах Земли и секторах Арктики, прежде всего, в границах западно- и среднесибирской субарктики [9,10]. «Бугристые болота субарктики Западной Сибири являются замечательным индикатором климатических изменений. Сегодня в этом регионе в силу более резкого потепления климата, обусловленного высокой степенью его континентальности, происходят процессы, с которыми скандинавские страны, Канада и Аляска, столкнутся только через несколько лет» [11, с. 185]. Несмотря на то, что ряд российских и зарубежных авторов строили подобные

предположения в начале века, последующая история наблюдений этого не подтвердила. Помимо экологической неопределенности настоящего и будущего также необходимо отметить неблагоприятное арктическое экологическое наследие [12,13,14,15,16], объекты которого требуют мониторинга и рекультивации [32, 33]. Очевидно, что в таких сформировавшихся условиях цена ошибки от принятия неправильного государственного управленческого решения в Арктической зоне РФ становится предельно высокой.

Это отчетливо проявилось в зоне чрезвычайной ситуации в Норильске в 2020 г.<sup>2</sup>, когда отсутствие своевременной мониторинговой информации привело к разливу тысяч тонн нефтепродуктов ТЭЦ 3 ОАО «Норильско-Таймырской энергетической компании». Проблема обнажила необходимость оперативного слежения за состоянием многолетнемерзлых пород (ММП). Для исключения нерациональных финансовых затрат необходимо внедрение ландшафтного подхода [17,18,19,20]. В противном случае, могут быть достигнуты результаты по информационному сопровождению состояния ММП, но они не будут увязаны с состоянием недр, природных вод, воздушных масс, соответственно, будут отвечать на узкоспециализированные запросы.

Исходя из того, что ответы на экологические вызовы нужны уже сегодня, то и решения должны обладать оперативностью бюрократического внедрения. Глобальные перестройки чреваты потерей драгоценного времени, перетекающего в экономические убытки. Цель работы: разработать комплекс мероприятий, направленных на организацию информационно-обеспеченных управленческих решений, определяющих экологическую безопасность жизнедеятельности в Арктической зоне РФ.

Для достижения поставленной цели нами сформулированы следующие задачи:

<sup>1</sup> Согласно Указу Президента РФ от 02.05.2014 №296 (в ред. Указа Президента РФ от 05.03.2020 №164).

<sup>2</sup> Протокол заседания Правительственной комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности от 03.06.2020 №3.





условия Тазовского месторождения. Выделены расположенные здесь террасы, а именно Сартанские, Каргинские, Зырянские. Так же выделены равнины – Казанцевская и Салехардская. По всей площади прописаны мощности сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоев в метрах [32, 33].

Как говорилось ранее, в Арктической зоне присутствует высокая антропогенная нагрузка. При отсутствии единой опорной наблюдательной сети для мониторинга многолетнемерзлых пород возможно появление происшествий.

Также необходимо отметить, что в автономном округе сформировалась единая геоинформационная база данных<sup>3</sup>, позволяющая на современной технологической основе представлять в цифровом формате текущее и прогнозируемое состояние территориальных общественных систем. С базой можно ознакомиться на

3 Постановление администрации Ямало-Ненецкого автономного округа от 06.10.2006 №445-А «О Концепции создания и развития Единой комплексной информационной системы Ямало-Ненецкого автономного округа на 2006-2010 годы»

официальном сайте Единой картографической системы<sup>4</sup>. Наличие на территории крупных транснациональных вертикально-интегрированных нефтяных компаний обусловили распространение цифровизации и интернетизации в автономном округе, включая участки промысла. Распределение основных блоков запасов и ресурсов природного газа имеет широкое распространение (Рис. 3) в границах региона, внутренних вод, внутреннего моря и прилегающего шельфа, поэтому и информационно-телекоммуникационное обеспечение ожидается на высоком уровне, с широким территориальным охватом. Для цифровизации мониторинга южных окраин автономного округа целесообразно подключить сформировавшийся пул узлов связи действующих недропользователей, лесопользователей, рыбопроизводителей. В результате, для организации мониторинга ландшафтов Ямало-Ненецкого автономного округа в среднесрочном планировании сформированы

4 Единая картографическая система ЯНАО - <https://kartayanao.ru/eks>.

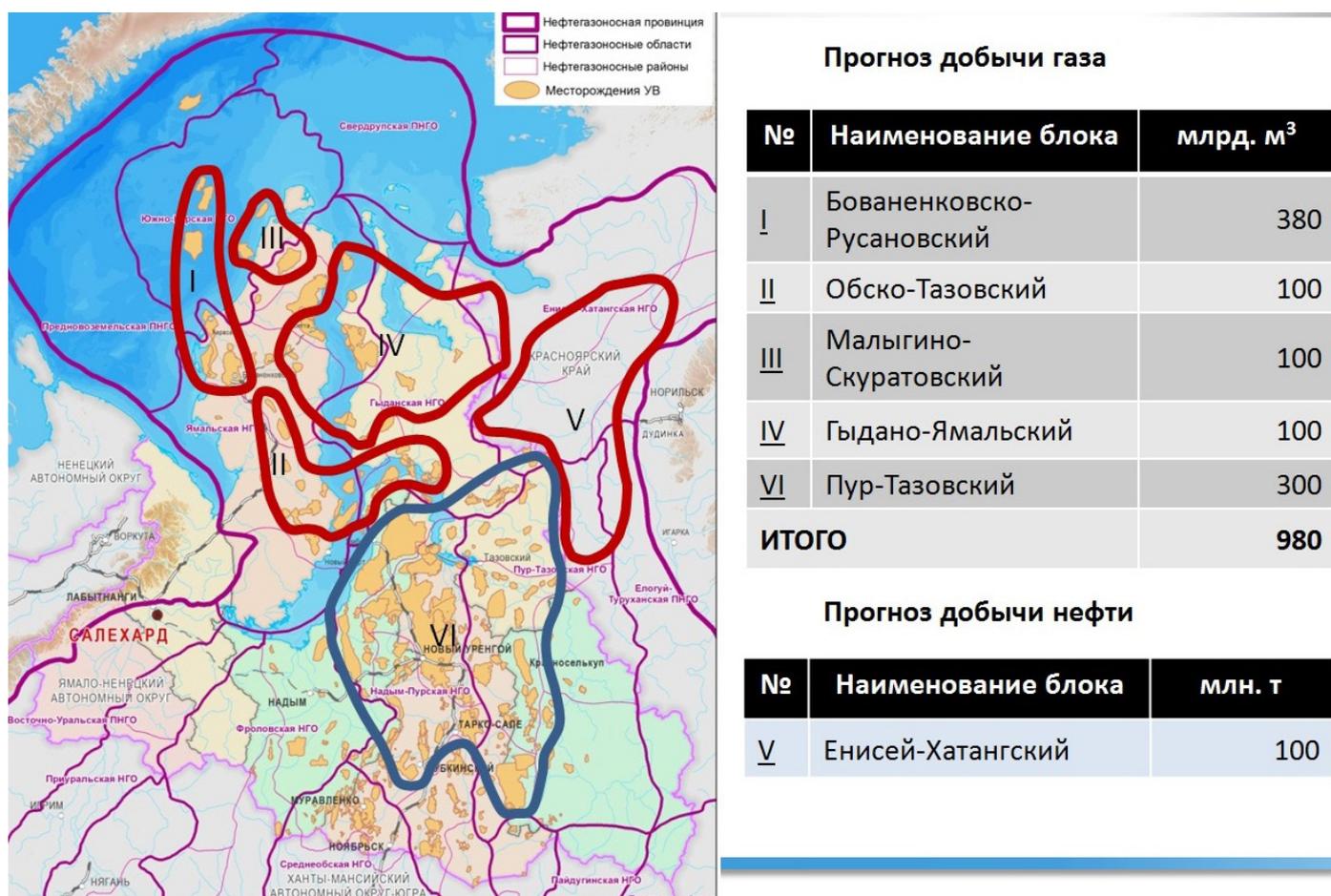


Рисунок 3 – Прогноз добычи природного газа.

технологические предпосылки, существенно снижающие лимиты госфинансирования, а также поиск инвесторов.

Методы исследования: картографический (геоинформационный), статистический, моделирования. Методология ландшафтного исследования.

Материалами для создания картографических исследований послужили данные из запатентованной авторским правом базы данных, принадлежащей ООО «МНП «ГЕОДАТА», «Проект «Региональные данные».

### 1. систематизация сведений по параметрам геоинформационного мониторинга на объектах недропользования, на примере Ямало-Ненецкого автономного округа.

В границах Ямало-Ненецкого автономного округа сформированы современные разрозненные геоинформационные системы мониторинга за состоянием окружающей природной среды. Данные позиционируются в форматах производственного экологического мониторинга, корпоративных требований, а также в параметрах инфологических моделей<sup>5</sup> государственных информационных систем. С одной стороны, это позволяет владеть существенными объемами информации для принятия управленческого решения; с другой стороны, разрозненность и автономность генерации данных девальвирует накопленные геоинформационные базы данных. Необходима валидация получаемых значений, например, для выявления «аномалий концентрации метана для разнообразных геологических условий суши и акваторий Арктики» [22].

Рациональным решением геоинформационной систематизации данных [23,24,25] является создание соответствующей государственной информационной системы, которая позволяла бы в автоматическом режиме фиксировать параметры ММП и

<sup>5</sup> Инфологическая (концептуальная) модель - модель предметной области, основанная на совокупности локальных пользовательских предпочтений или системе запросов, абстрагирующих совокупность информационных потребностей пользователей. В инфологической модели специфицированы существующие в предметной области связи [21, 43].

воздушных масс. Субъектами предоставления данных могут выступать недропользователи и надзорные, научно-исследовательские государственные организации в этой области. Также возможно подключение и иных природопользователей, обладающих соответствующей технической инфраструктурой. Объектом формирования данных недропользователя – автоматизированная мониторинговая станция, интегрированная с наблюдательной скважиной глубиной, например, до 400 м. Согласно схеме геокриологического районирования Надым-Тазовской зоны по всей территории, отмечается преобладающее распространение монокристаллических пород. В целом мощности мерзлых толщ различны и закономерно возрастают от поймы реки Пур к надпойменной террасе. Наибольшие мощности (300-400 м) ММП наблюдаются на Зырянской равнине, расположенной на западе участка. Несколько меньшие мощности (150-300 м) приурочены к площадям развития I и II надпойменных террас на левобережье

В целом мощности мерзлых толщ различны и закономерно возрастают от поймы реки Пур к надпойменной террасе. Наибольшие мощности (300-400 м) ММП наблюдаются на Зырянской равнине, расположенной на западе участка. Несколько меньшие мощности (150-300 м) приурочены к площадям развития I и II надпойменных террас на левобережье

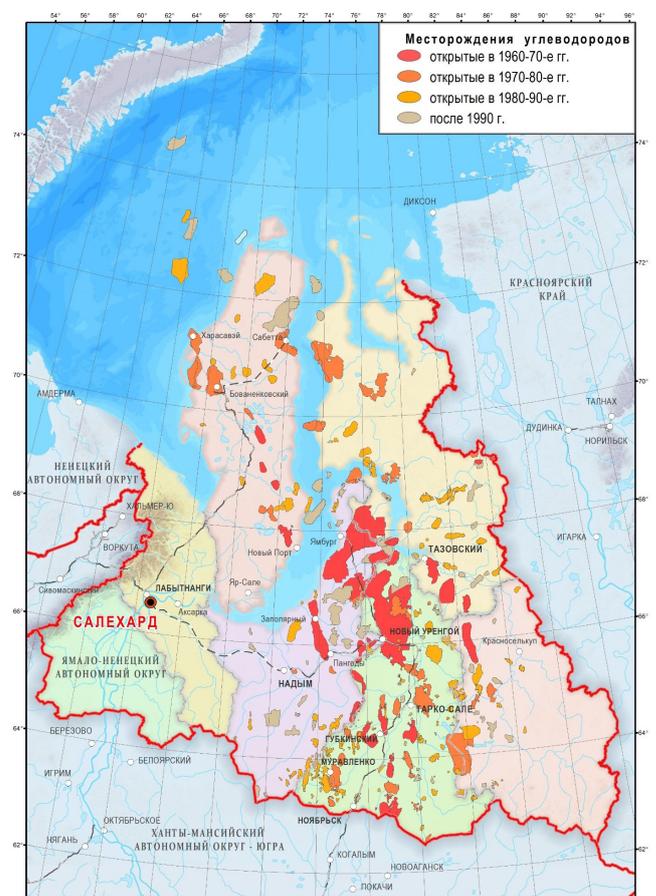


Рисунок 4 – Дифференциация углеводородных месторождений по годам открытия.

р. Пур в пределах поймы рек Пур и Нагарка-Табьяха (левый приток реки Пур), мощность мерзлых грунтов достигает здесь 100-150 м.

Так как история активного недропользования в автономном округе имеет пространственную дифференциацию (Рис. 4), то и организация сети слежения должна быть также дифференцирована. При этом, при наличии истории наблюдений, в дальнейшем она всегда может соотноситься в исторической ретроспективе. С учетом истории освоения углеводородов, ранжирование предлагаем провести по следующим 4 градациям: месторождения, открытые в 1960-е гг., 1970-е гг., 1980-е гг., после 1990 г. Таким образом, более высокая плотность мерзлотных станций должна, на наш взгляд, соотноситься со сроками ввода месторождений в эксплуатацию, что логично соотносится с технологическими и экологическими рисками.

По расчётам средней стоимости для ЯНАО на возведение мониторинговой скважины требуется 0,1% от стоимости добывающей скважины. Данная точка зрения основывается на анализе сотни месторождений Западной Сибири. Фактически в технико-экономический расчет проекта разработки любого месторождения всегда заложены затраты на природоохранные мероприятия в размере 5 - 10 % от капитальных вложений.

Несомненно, мониторинговая система поведения ММП является важной частью данных мероприятий и затраты на неё могут и должны быть учтены в указанной статье расходов недропользователя.

Обслуживание станций также не предполагает существенных издержек, так как соотносится с задачами производственного экологического мониторинга и может быть спроектировано на максимальной автоматизации. С учетом активно выстраиваемого во внешнем мире концепта декарбонизации экономики<sup>6</sup> [26,27,28,29,30], данные бухгалтерские затраты в дальнейшем можно трансформи-

ровать в экономическую прибыль, инвестиционный доход. Предотвращенный потенциальный экологический и технологический ущерб, на примере норильской катастрофы, намного превысит предлагаемые капитальные и операционные затраты на функционирование сети наблюдения.

## 2. разработка технологии организации автоматизированного мониторинга за параметрами окружающей среды.

Схематичное представление предлагаемой технологии<sup>7</sup> по наблюдению за состоянием многолетнемерзлых пород представлено на рис. 5. В основе предлагаемого концептуального решения лежит ориентация на автоматизацию получения данных, комплексность использования

<sup>7</sup> Технология была представлена в 2018 г. Брехунцовым А.М. на заседании Совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации Федерального Собрания Российской Федерации на тему «О законодательном обеспечении сохранности многолетнемерзлых грунтов при хозяйственном освоении Арктической зоны Российской Федерации» URL <http://council.gov.ru/events/news/89390/>

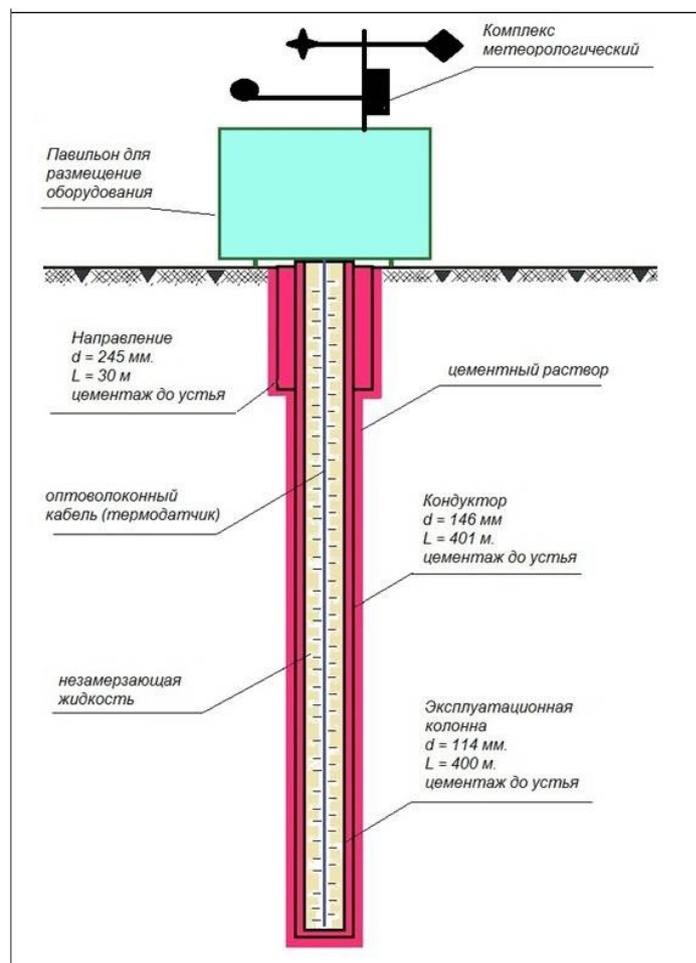


Рисунок 5 – Дифференциация углеводородных месторождений по годам открытия.

<sup>6</sup> Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). URL <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>

оборудования, функционирование в суровых природно-климатических условиях. Надземная часть представляет собой модуль замера метеопараметров. Скважинная часть – характеристика состояния ММП.

Передача данных основана на автономной интернет-передаче. Снятие параметров с поверенных датчиков, что исключает влияние человеческого фактора на формирование объективной картины. Для технологического обслуживания станции метеорологический модуль имеет соответствующий микроклимат. Задача обеспечения интернетизации в условиях арктических широт в Ямало-Ненецком автономном округе решена недропользователями, активно внедрившими SCADA-системы [31] на производстве.

### *3. определение юридических механизмов реализации системы автоматизированного мониторинга за параметрами окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации.*

Юридическая сторона организации процесса данного мониторинга вписывается в условия лицензирования недропользования. В нормативных правовых актах<sup>8</sup> за недропользователями уже закреплены соответствующие функции безопасного недропользования, которые возможно конкретизировать на уровне подзаконных документов. Значительного дополнительного организационного пресса на бизнес нами не прогнозируется. Прописанные рамочные нормы формализуются в единые правила игры, позволяющие менеджменту и инвесторам определять свое место в общей сети безопасности, в том числе, на уровне проведения сравнительных оценок.

## **Результаты**

В рамках действующего нормативного правового поля рекомендуем Феде-

ральному агентству по недропользованию<sup>9</sup> провести следующие мероприятия:

- включить в условия лицензионного соглашения недропользователя на разрабатываемом месторождении обязательства по созданию и ведению сети станций наблюдения за состоянием ММП, с включением в госреестр;
- организовать в границах нераспределенного фонда недр пилотной территории создать и обеспечить функционирование мерзлотных режимных станций;
- дифференцировать предлагаемые мониторинговые требования к недропользователям в зависимости от времени начала освоения месторождений;
- организовать проведение научно-исследовательской работы «Исследование внедрения мерзлотных станций в Арктической зоне РФ», по результатам которой для пилотной территории (ЯНАО) обосновать:

- местоположение сети станций;
- требования к оценочным передаваемым параметрам;
- типовую конструкцию станции для недропользователя;
- выполнить сбор исторической литературной, геоинформационной и фактографической информации, позволяющей зафиксировать текущее состояние ММП.

Таким образом, на сегодняшний день в РФ созданы предпосылки для создания современной сети комплексного наблюдения за состоянием многолетнемерзлых пород. Концептуальные решения позволяют создать данную сеть оперативно, с минимальными нормотворческими трансформациями природопользования в суровых природно-климатических условиях.

<sup>8</sup> Закон РФ от 03.03.1995 №27-ФЗ «О недрах»; Указ Президента РСФСР от 20.08.1991 №66 «Об обеспечении экономической основы суверенитета РСФСР»

<sup>9</sup> Согласно Постановлению Правительства РФ от 17.06.2004 №293 «Об утверждении Положения о Федеральном агентстве по недропользованию (в ред. Постановления Правительства от 23.09.2020)

**Список литературы:**

1. Шарыгин М.Д. Общественная география в России: тернистый путь развития // Географический вестник. 2017. №2. С. 17-25. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-17-25
2. Субботина Т.В. Гносеологический и онтологический аспекты территориальных общественных систем // Географический вестник. 2017. №2. С. 31-42. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-31-42
3. Грищенко М.А. Территориальная структура хозяйства и территориальная организация общества: соотношение понятий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2012. №2. С. 136-143.
4. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. №1. С. 32-41.
5. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 11-26.
6. Тишков А.А., Кренкемл Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. 2015. №4. С. 28-37.
7. Shakirov R., Mau S., Mishukova G., Obzhairov A., Shakirova M., Mishukova O. The features of methane fluxes in the western and eastern Arctic: A review. Part I // Geosystems of Transition Zones. 2020. Т. 4. Р. 4-25. DOI: 10.30730/2541-8912.2020.4.1.004-025
8. Воронина С.А., Порфирьев Б.Н., Семикашев В.В., Терентьев Н.Е., Елисеев Д.О., Наумова Ю.В. Последствия изменений климата для экономического роста и развития отдельных секторов экономики Российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2017. №4. С. 4-17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-4-17
9. Callaghan T.V., Jonasson S. Arctic ecosystems and environmental change. *Phil Trans Roy Soc Lond A*. 1995. P. 259-276.
10. Jones P.D., Moberg A. Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update // *Journal of Climate*. Vol. 16. №2. P. 206-223.
11. Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестник Томского государственного университета. 2008. №311. С. 185-190.
12. Абрамов А.А., Крюков О.В., Иванов А.Ю., Линге И.И. Ликвидация ядерного наследия в континентальной части России как условие радиационного благополучия Арктики // Арктика: экология и экономика. 2017. №4. С. 49-58. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-49-58
13. Акимов Т.А. Соколов Ю.И. Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне России // Проблемы анализа риска. 2010. Т. 7. №4. С. 26-49.
14. Саркисов А.А. К вопросу о ликвидации радиоактивных загрязнений в Арктическом регионе // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. №2. С. 107-124. DOI: 10.31857/S0869-5873892107-124
15. Манжуров И.Л., Астафьева О.В., Дерягина С.Е., Антонов К.Л. Проблема накопленного экологического ущерба на территории Ямало-Ненецкого автономного округа: современное состояние // Проблемы региональной экологии. 2014. №2. С. 52-57.
16. Кочемасова Е.Ю. Актуальные проблемы устойчивого развития и их решение в России // Мир новой экономики. 2020. Т. 14. №3. С. 75-82. DOI: 10.26794/2220-6469-2020-14-3-75-82
17. Озарян Ю.А., Усиков В.И. Эколого-ландшафтный подход в оценке качества окружающей среды природно-технических систем // Экологические системы и приборы. 2019. №11. С. 48-55. DOI: 10.25791/esip.11.2019.986
18. Старожилов В.Т. Практическая реализация метода ландшафтных узловых структур освоения регионов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. №2. С. 108-117.
19. Прокофьева Е.Ю., Васильев Н.В. Современные тенденции реабилитации антропогенных территорий // Academia. Архитектура и строительство. 2019. №4. С. 87-93.
20. Брехунцов А.М., Петров Ю.В., Прыкова О.А. Экологические аспекты освоения природно-ресурсного потенциала Российской Арктики // Арктика: экология и экономика. 2020. №3. С. 34-47. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47
21. Тараканов О.В. Принцип семантического связывания сущностей в инфологической модели базы данных // Информационные системы и технологии. 2012. №5 (73). С. 43-49.
22. Богдавленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. 2020. №3 (39). С. 6-22. DOI 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22
23. Красильников П.А. Использование геоинформационных систем для решения прогнозных инженерно-геологических задач при разработке месторождений полезных ископаемых // Вестник Пермского университета. Геология. 2020. Т. 19. №1. С. 65-72. DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.65
24. Ковалева Т.Ю. Информационно-аналитические системы управления кластерным пространственным развитием регионов: анализ и приоритеты совершенствования // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2020. Т. 15. №1. С. 84-109. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-1-84-109
25. Дубровская Ю.В., Козоногова Е.В., Молодчик А.В. К вопросу алгоритмизации и автоматизации процесса регионального стратегирования // Управленец. 2019. Т. 10. №4. С. 65-74. DOI:

- 10.29141/2218-5003-2019-10-4-6
26. Кондратьева Н.Б. «Зелёный курс» региональной политики // Европейский союз: факты и комментарии. 2020. №98. С. 37-40. DOI: 10.15211/eufacts420193740
  27. Попадьюко Н.В., Панков С.В., Попадьюко А.М. Водородная энергетика: этапы развития, проблемы и перспективы // Инновации и инвестиции. 2020. №1. С. 293-296.
  28. Белов В.Б. Европейская зелёная сделка // Европейский союз: факты и комментарии. 2020. №99. С. 33-39. DOI: 10.15211/eufacts120203339
  29. Бобылев С.Н., Барабошкина А.В., Джу С. Приоритеты низкоуглеродного развития для Китая // Государственное управление. Электронный вестник. 2020. №82. С. 114-139. DOI: 10.24411/2070-1381-2020-10095
  30. Белов В.Б. Европейский альянс чистого водорода // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. 2020 №5. С. 52-59. DOI: 10.15211/vestnikieran520205259
  31. Морозова И.М. Особенности программного обеспечения SCADA-систем в электроэнергетике // Новые информационные технологии в образовании и науке. 2017. Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2017. С. 395-399.
  32. Дубровин А.В., Брушков А.В., Дроздов Д.С., Железняк М.Н. Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Издательство: ООО «РГ-Информ» (Москва). - №3. - 2019. - с. 55-63
  33. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны – Новосибирск: академическое изд-во «Гео», 2008. - 229 с.

## References:

1. Sharygin M. D. Public geography in Russia: a thorny path of development // Geographical Bulletin. 2017. no. 2. Pp. 17-25. DOI: 10.17072 / 2079-7877-2017-2-17-25
2. Subbotina T. V. Epistemological and ontological aspects of territorial social systems // Geographical Bulletin. 2017. no. 2. Pp. 31-42. DOI: 10.17072 / 2079-7877-2017-2-31-42
3. Grishchenko M. A. Territorial structure of economy and territorial organization of society: correlation of concepts // Bulletin of the Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography. 2012. No. 2. S. 136-143.
4. Alekseev G. V., Radionov V. F., Aleksandrov E. I., Ivanov N.E., Harlanenkova N.E. Changes in the Arctic climate under global warming // Problems of the Arctic and Antarctic. 2015. no. 1. Pp. 32-41.
5. Alekseev G. V. Manifestation and strengthening of global warming in the Arctic // Fundamental and applied climatology. 2015. Vol. 1. Pp. 11-26.
6. Tishkov A. A., Krenkemi N. "Greening" of the Arctic in the XXI century. as a synergistic effect of global warming and economic development // Arctic: ecology and Economics. 2015. no. 4. Pp. 28-37.
7. Shakirov R., Mau S., Mishukova G., Obzhairov A., Shakirova M., Mishukova O. The features of methane fluxes in the western and eastern Arctic: A review. Part I // Geosystems of Transition Zones. 2020. T. 4. P. 4-25. DOI: 10.30730/2541-8912.2020.4.1.004-025
8. Voronina S. A., porfiryev B. N., Semikashev V. V., Terentyev N. E., Eliseev D. O., Naumova Yu. V. Consequences of climate change for economic growth and development of certain sectors of the Russian Arctic economy. 2017. no. 4. Pp. 4-17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-4-17
9. Callaghan T.V., Jonasson S. Arctic ecosystems and environmental change. Phil Trans Roy Soc Lond A. 1995. P. 259-276.
10. Jones P.D., Moberg A. Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update // Journal of Climate. Vol. 16. No. 2. P. 206-223.
11. Kirpotin S. N., Polishchuk Yu. M., bryksina N. A. Dynamics of areas of thermokarst lakes in continuous and intermittent cryolithozones of Western Siberia under global warming conditions // Bulletin of Tomsk state University. 2008. No. 311. Pp. 185-190.
12. Abramov A. A., Kryukov O. V., Ivanov A. Yu., Linge I. I. Elimination of nuclear heritage in the continental part of Russia as a condition for radiation well-being of the Arctic. 2017. no. 4. Pp. 49-58. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-49-58
13. Akimov T. A. Sokolov Yu. I. Risks of emergency situations in the Arctic zone of Russia // Problems of risk analysis. 2010. Vol. 7. No. 4. Pp. 26-49.
14. Sarkisov A. A. On the issue of elimination of radioactive contamination in the Arctic region // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019. Vol. 89. No. 2. Pp. 107-124. DOI: 10.31857/S0869-5873892107-124
15. Manzhurov I. L., Astafieva O. V., Deryagina S. E., Antonov K. L. The problem of accumulated environmental damage on the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous district: current state // Problems of regional ecology. 2014. No. 2. S. 52-57.
16. Kochemasova E. Yu. Actual problems of sustainable development and their solution in Russia // The world of the new economy. 2020. Vol. 14. No. 3. Pp. 75-82. DOI: 10.26794 / 2220-6469-2020-14-3-75-82

17. Ozeran J. A., Usikov, V. I., Ecological-landscape approach in assessing the environmental quality of natural-technical systems // Environmental systems and devices. 2019. no. 11. Pp. 48-55. DOI: 10.25791/esip.11.2019.986
18. Starozhilov V. T. Practical implementation of the method of landscape nodal structures of development of regions // Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2019. Vol. 5. No. 2. Pp. 108-117.
19. Prokofieva E. Yu., Vasiliev N. V. Modern trends in rehabilitation of anthropogenic territories // Academia. Architecture and construction. 2019. No. 4. Pp. 87-93.
20. Brekhuntsov a.m., Petrov Yu. V., Prykova O. A. Ecological aspects of the development of the natural resource potential of the Russian Arctic. 2020. No. 3. Pp. 34-47. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-34-47
21. Tarakanov O. V. the Principle of semantic linking of entities in the infological database model // Information systems and technologies. 2012. no. 5 (73). Pp. 43-49.
22. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Degassing of the Earth in the Arctic: the Genesis of natural and anthropogenic methane emissions. 2020. No. 3 (39). Pp. 6-22. DOI 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22
23. Krasilnikov P. A. Use of geoinformation systems for solving predictive engineering and geological problems in the development of mineral deposits. Vestnik PERMSKOGO universiteta. Geology. 2020. Vol. 19. No. 1. Pp. 65-72. DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.65
24. Kovaleva T. Yu. Information and analytical systems for managing cluster spatial development of regions: analysis and priorities for improvement // Bulletin of Perm University. Series: Economics. 2020. Vol. 15. No. 1. Pp. 84-109. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-1-84-109
25. Dubrovskaya Yu. V., Kozonogova E. V., Molodchik A.V. on the issue of algorithmization and automation of the regional strategizing process. 2019. Vol. 10. No. 4. Pp. 65-74. DOI: 10.29141/2218-5003-2019-10-4-6
26. Kondratieva N. B. "Green course" of regional policy // European Union: facts and comments. 2020. No. 98. Pp. 37-40. DOI: 10.15211/eufacts420193740
27. Popadko N. V., Pankov S. V., Popadko a.m. Hydrogen energy: stages of development, problems and prospects // Innovations and investments. 2020. No. 1. Pp. 293-296.
28. Belov V. B. European green deal // European Union: facts and comments. 2020. No. 99. Pp. 33-39. DOI: 10.15211/eufacts120203339
29. Bobylev S. N., Baraboshkina A.V., Ju S. Priorities of low-carbon development for China // Public administration. Electronic Bulletin. 2020. No. 82. Pp. 114-139. DOI: 10.24441/2070-1381-2020-10095
30. Belov V. B. European Alliance of pure hydrogen // Scientific and analytical Bulletin of The Institute of Europe RAS. 2020 No. 5. Pp. 52-59. DOI: 10.15211/vestnikieran520205259
31. Morozova I. M. Features of software for SCADA systems in the electric power industry // New information technologies in education and science. 2017. Yekaterinburg: Russian state vocational pedagogical University, 2017, 395-399.
32. Dubrovin A.V., Brushkov A.V., Drozdov D.S., Zheleznyak M.N. Knowledge, current state, prospects and problems of the Arctic permafrost development // Mineral resources of Russia. Economics and Management. Publisher: LLC RG-Inform (Moscow). - Number 3. - 2019. - p. 55-63
33. Pavlov A.V. Permafrost monitoring - Novosibirsk: academic publishing house "Geo", 2008. - 229 p.



UDC 551.467

DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-33-49

**Citing:**

Alekseeva T.A., Frolov S.V., Serovetnikov S.S. Review of methods and main results of sea ice thickness measurements in the Arctic. 2021; 12: pp. 33-49 (In Russ.). 10.24412/2658-4255-2021-1-33-49

Received: 15.03.2021

Approved: 29.03.2021

Published: 05.04.2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

## REVIEW OF METHODS AND MAIN RESULTS OF SEA ICE THICKNESS MEASUREMENTS IN THE ARCTIC

T.A. ALEKSEEVA<sup>1,2</sup> , S.V. FROLOV<sup>1</sup>,  
S.S. SEROVETNIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia; taa@aari.ru

<sup>2</sup> Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

**Abstract:** Review of main methods of sea ice thickness measurements and results of published researches about climate and interannual variability of this parameter in the Arctic Basin and in the Arctic Seas are presented. Following methods of thickness measurements are developed and widely used: ice drilling, acoustic (echo sounder),

electromagnetic method, visual and TV ship observations. Maximum area of the Arctic sea ice can be covered by acoustic measurements from submarines, visual and TV ship observations from ice class vessels and icebreakers. Results of thickness measurements in the Arctic reviewed in present research were obtained in various regions of the Arctic, in various seasons, by various methods and various periods, and, consequently, do not allow to estimate unambiguously a climate and interannual variability of sea ice thickness in the Arctic. However, authors concluded that changes of average sea ice thickness in the Arctic Basin are influenced in first turn by dynamic processes caused by changes in the atmosphere circulation. TV-complex developed in the AARI is a perspective method to automate process of sea ice thickness measurements from the shipboards.

**Keywords:** drill-hole measurements, climate changes, visual ice observations, fast ice thickness, ice thickness, EM sea ice thickness measurements

### Introduction

Ice thickness is a key feature of ice cover in the freezing areas of the Global Ocean. As sea ice exists at the interface of the ocean and atmosphere, its thickness and geographic distribution serve as integrated indicators of climate change and dynamic atmospheric and hydrological processes, and thus characterize both ocean and atmosphere. Interannual and climatic variability of ice thickness along the navigable routes are an essential characteristic for assessment and planning of new prospective marine transportation systems, design and building of new ships and icebreakers, safety

navigation and hydrocarbon extraction on the shelves of the freezing seas.

At the same time sea ice thickness is hard to measure in a global scale. The main emphasis is on the development of remote non-contact methods of ice thickness measuring based on information from satellites and aircrafts, as well as from submarines and mooring subglacial buoys. At the same time ship-based video monitoring systems are developed and used actively on vessels and icebreakers for ice thickness and snow depth measurements. This review presents the existing methods and obtained results of only *in situ* sea ice measurements.

### Main methods of sea ice thickness measurements

Sea ice is a result of salt sea water freezing, being thereby a multicomponent system composed of pure ice crystals together with brine and solid salts, as well as small amount of air bubbles and organic and terrigenous impurities [1]. Flat sea ice has non-uniform thickness and varying salt and density vertical stratification even in a single ice floe due to different conditions of ice formation. Deformed ice (i.e. ice breccia, hummock, rafting) has even more complicated structure. Large-scale measuring of sea ice thickness is thus one of the most topical and complex issues. Several methods have been currently developed and are widely used in the field.

1. *Drilling* is the most accurate and at the same time the most time-taking method for measuring ice thickness. It is carried out by drilling an ice floe with an auger or a motor-driven power drill and further measuring of ice thickness in the hole with ice thickness tape (Figure 1). This method is successful for local control measurements but is not good for wide-range *in situ* observations because of its duration, hardness and high cost of management. Drill-hole technique is applied either for local short-term ice thickness measurements prior to the organization of ice stations during marine expeditions or for routine measurements in the area of shore stations or drifting ice stations. Accuracy of drill-hole measurements is up to 1 cm and thus they are the



Figure 1 – Drilling of sea ice for further ice thickness measurements (research station 'Ice base Cape Baranov', Severnaya Zemlya Archipelago, May 2014). Photo: V.Borodkin.

most accurate of all techniques for measuring ice thickness [2].

2. *Sounding (echo sounding)* is applied on submarines and unmanned vehicles as well as on the moored sonobuoys. The most representative publicly available data were derived from upward looking sonars mounted on submarines during the period from 1958 to 2000. This technique measures ice draft. The sonar antenna emits a sound pulse which reflects off the ice underside and is recorded by receiver. Ice draft calculation is based on total travel time of the pulse and gauge depth [3]. Depth of sonar antenna is determined from absolute hydrostatic pressure and is used as a reference level [4, 5]. Ice thickness is calculated according to the mean ratio of draft to thickness which is 93% [6]. Estimation errors may vary from 0.15 to 0.38 m according to different sources [5-7]. This rate of errors is not essential for a thick ice, though it is significant for a thin ice. Data from sonobuoys are obtained in a delayed mode, which is not suitable for operation tasks. High cost of power supply units and depth limitations also reduce the use of this technique.
3. *Electromagnetic (EM) sounding* is the most widely used method for small- and medium depth measuring on land. In 1980-s the American and Canadian researchers began to use it for sea ice thickness measurements

[8, 9]. In 2001 the electromagnetic-induction system EM-bird was designed in Alfred Wegener Institute (Bremerhafen, Germany). Currently there are three modifications of EM-systems dedicated for sea ice thickness measurements, these are EM-bird for the airborne measurements from helicopter or aircraft with accuracy of ice thickness measurements of  $\pm 0.1$  m [10], EM-31 for shipborne measurements and EM-31 Ice for ground-based ice thickness measurements (Figure 2). The EM-system consists of external PC, GPS-module, a laser and two electromagnetic antennas (transmitter and receiver coils). EM sounding is based on measuring ice conductivity considering that low conductivity corresponds with high ice thickness. The transmitting coil of EM-system generates EM field which penetrates the sea ice. Eddy currents are generated in the sea water below the sea ice underside and induce a secondary EM field. The boundary between sea water and sea ice is thus well detected due to large difference between their conductivities. Further recalculation of conductivity values to ice thicknesses estimations requires a calibration of the EM instrument. For this purpose several holes are drilled in sea ice (5-10 holes) to measure sea ice thickness with both ice thickness tape and EM instrument simultaneously. Snow thickness should be measured additionally at the same holes because EM

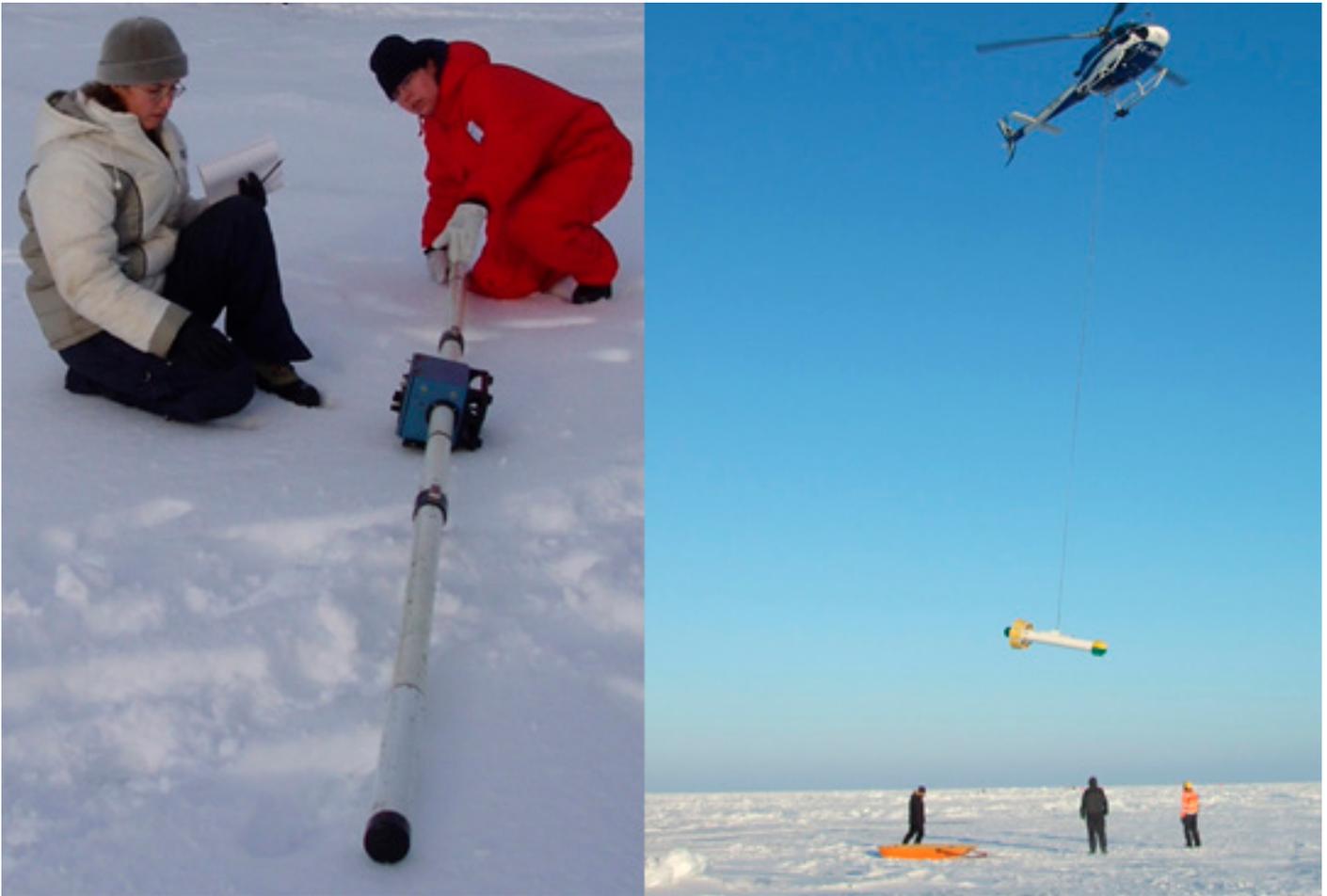


Figure 2 – Sea ice thickness measurements by EM-31 made from ice surface (left image – August 2004, research expedition onboard the icebreaker *Kapitan Dranitsyn*) and by EM-bird (right image – March 2011, expedition onboard the research vessel *Aranda*). Photo: T.Alekseeva.

instrument determines total (i.e. ice plus snow) thickness [11-14].

4. *Visual ship-based observations* are conducted by ice observer from the bridge of the ship. The observer estimates thickness of the overturned ice floe near the ship board by eye, with range-finding field glasses or with a scaled yard stick (Figure 3). Specialists of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) has developed a standard ice-observing methodology for ship-based observations [15, 16]. International ice observations are specified by ice observation protocols of either ASPeCt <http://www.aspect.aq> or IceWatch/

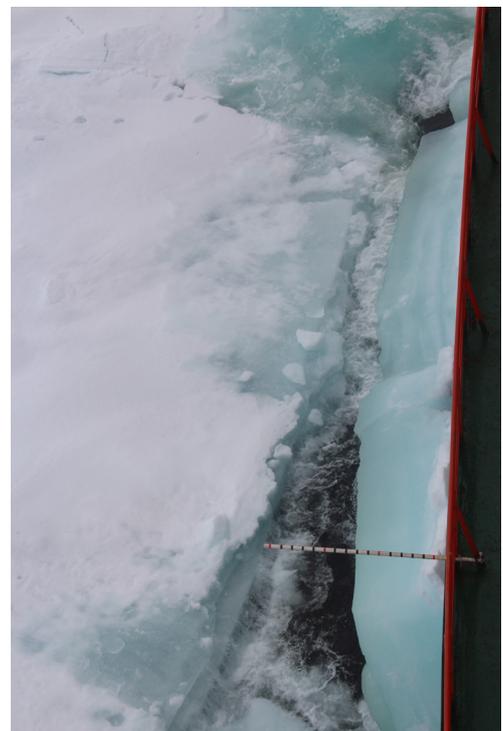


Figure 3 – Visual ship-based observations of ice thickness with a scaled yard stick (10-cm scale) fixed to the lower deck from board of nuclear icebreaker *50 let Pobedi*. Photo: S. Serovetnikov, June 2019

ASSIS00T Arctic Ship-Based Sea Ice Standardization, <http://icewatch.gina.alaska.edu>). The accuracy of visual ice observations is  $\pm 10$  cm.

5. *Video observations (TV ship observations)*. The principle of the method is similar to visual observations. During the independent movement of ship in ice area the ice floes near the ship board are overturned to side-up position and thus provide an opportunity to estimate thickness of the ice side. Thickness is estimated with reference to the previously measured control values with geometric calculations based on optical characteristics of the data-recording camera. Accuracy of sea ice thickness measurements is  $\pm 2$  cm [17-19]. A number of Japanese researchers [20, 21] describe a video monitoring technique for observing the overturned ice floes during ship movement which was developed in 1990s. This method was applied during expeditions in the Sea of Okhotsk and to Antarctic. However, manual processing of received images took a long time, as automatic method of treating ice thickness from images was not developed. In 2004 a digital ship-based TV-system for ice thickness measurements was developed and introduced into the AARI sea ice monitoring operations [17]. The implementation of digital TV-system in dedicated ship observations aims to get high-quality and statistically significant data set of sea ice

thickness along the ship track. The main task of the system is to automatize and standardize time-consuming observations as well as to exclude the influence of subjective factors on quality and quantity of sea ice observations. Digital ship-based TV system is a standard video monitoring system which is customized by the AARI specialists for specific conditions of sea ice observations. Initially processed video files are further processed by a special software developed by the AARI specialists. The software for computerized processing of sea ice images is made in the Microsoft Visual Basic 6.0 Integrated Development Environment. The software allows user to specify the beginning and the end of line which crosses the overturned side of ice by clicking and thus to estimate sea ice thickness (Figure 4). Comparing of real values of sea ice thicknesses and those measured by ship-based TV-system showed difference up to 3.8%. It provides data on sea ice thickness and snow depth along the ship track. The system operates autonomously and is able to work for a long time without special technical support. Thus there is an opportunity to maintain the TV-system on any vessels and icebreakers with minimal service and monitoring charges. In a whole the TV-system demonstrates working efficiency and resistance to technogenic impacts (i.e. power failure, vibration, shocks) and climatic impacts (i.e. solid precipitation and rainfall,

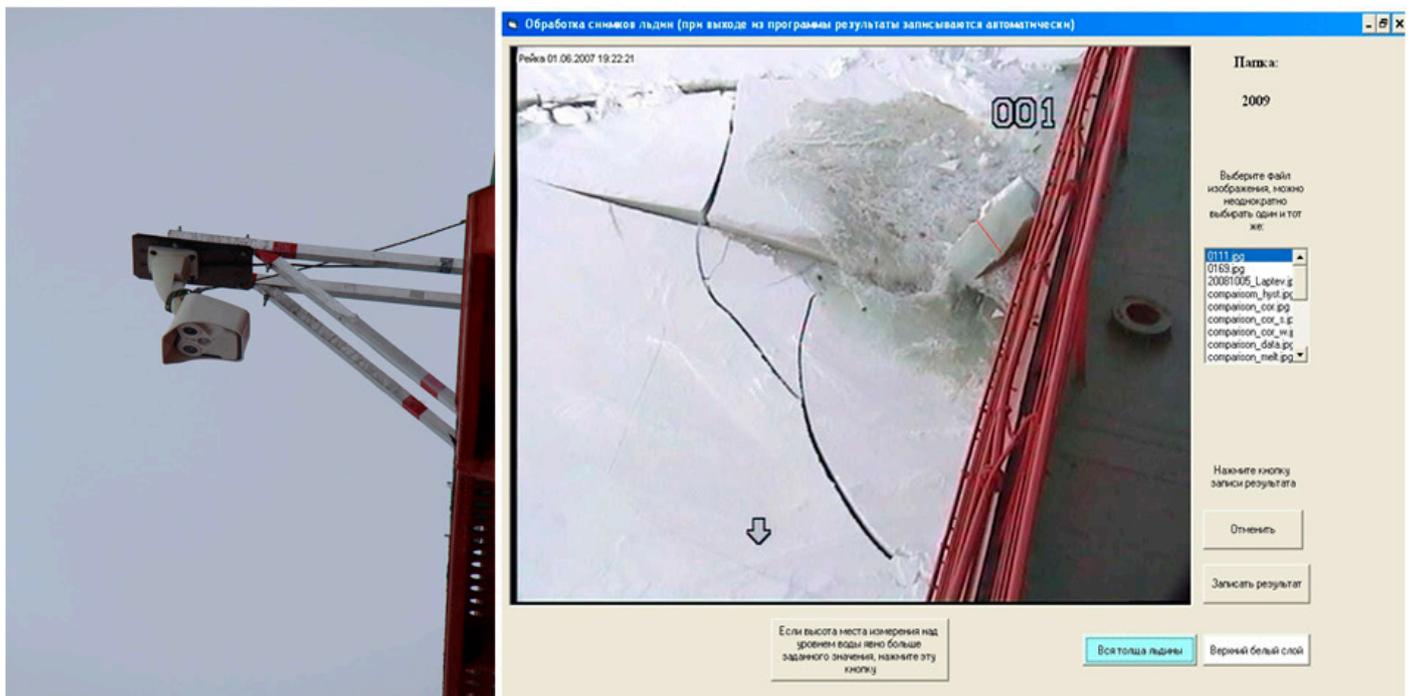


Figure 4 – Ship-based TV-system (left) mounted on the side deck of the ship for along-track recording of sea ice overturnings, and interface of the software for processing of images and estimating of sea ice thickness and snow depth.

icing, low temperatures). The AARI specialists develop currently the computer-assisted methods of ice and snow thickness measuring by images and upgrade the video monitoring system itself.

### Main results of sea ice thickness measurements in the Arctic Seas

1. *Moored sonars.* The results of processing data sets observed with moored sonars can be found in the works published at the late 1990s-early 2000s [22-25]. In 1990-1996 the highest mean thickness in April-May in the Fram Strait near 79° N was 3.27 m and the lowest mean value was 2.25 m in September [22]. Monitoring of the interannual variability during the period 1990-2011 reveals decrease in mean level sea ice thickness from 3 m in 1990s to 2.2 m in 2008-2011. Minimum values of sea ice thickness

were indicated in 2005-2006 [25]. In the eastern part of the Beaufort Sea a small decrease of ice thickness (by 2%) was recorded for the period 1991-2013 [23]. According to sea ice thickness buoy data from the Arctic basin in the area of the Beaufort Gyre ice draft had been gradually decreased by 0.5 m from 2005, when maximum values were detected, to 2012 [24].

2. *Electromagnetic systems EM-31 and EM-bird.* EM-systems have been actively used for sea ice thickness measurements since 2001. The most covered areas by EM-measurements are located in vicinity of Svalbard [12, 26-28] and in the Canadian Arctic Archipelago [29-32]. A number of sea ice thickness measurements in the area to the north of Svalbard with strong impact of warm Atlantic waters indicate change in sea ice thickness in April-May from 2.4 m in 2009 [12] to 1.8 m

in 2011 [27] and 1.7 m in 2015 [26]. In May 2011 and April 2015 sea ice thickness measurements with EM-bird were carried out along the Northwest Passage [31]. Mean thickness of level sea ice was 1.8-2 m over the large part of the Passage. Multi-year ice more than 3 m thick was found in Viscount-Melville Sound, McClintock Channel and Byam-Martin Channel. The authors were not able to monitor interannual variability of sea ice thickness because of absence of similar earlier measurements in this area; however, the results showed that thickness was 0.4-0.6 m less than observed during expeditions in 1950-1989 [32]. Thus, based on the obtained results and analysis of average air temperatures in this area, the authors [31] suggested a certain decrease of ice thickness along the Northwest Passage, though large amount of multiyear and deformed ice still challenged navigation.

3. *Ice drilling.* Data from polar stations in the Kara Sea, Laptev Sea, East Siberian Sea and Chukchi Sea for the period 1936-2000 are summarized in monographs [33, 34]. According to the data from the Kara Sea the maximum thickness of landfast ice has increased from 1936 till the late 1960s before it began to decline by the end of the 20th century. Average values were 1.65 m in 1936-1957, 1.81 m in 1958-1983 and 1.74 m in 1984-2000. No significant changes in landfast ice thickness during “warm” and “cold” periods were observed in the eastern seas of Siberian Shelf. Mean values were

1.99 m in 1936-1957, 2 m in 1958-1983 and 1.97 m in 1984-2000. The study [35] analyses the interannual variability of landfast ice thickness till 2009. Thus, since 1940 till 1973 mean landfast ice thickness has increased from 1.83 to 1.96 m in the areas with the largest extent of landfast ice (north-western part of the Kara Sea, western and eastern parts of the Laptev Sea, western part of the East Siberian Sea), following the negative trend of air temperature above ocean surface. In 1973-2009, when trend of air temperature has shifted to positive one, mean landfast ice thickness started to decline (from 1.95 to 1.80 m). In monographs [36, 37] data sets from a large number of polar research stations are analyzed separately for each sea. Mean landfast ice thickness at the period of maximum landfast ice extent was estimated over total record for each station (time series from a station opening till 2012 in the Barents and south-western part of the Kara Sea and till 2015 in the north-eastern part of the Kara Sea, Laptev and East Siberian Seas) and separately over the period 2000-2012 or 2000-2015, respectively. Analysis of mean values over total record and over the early 2000s shows that landfast ice mean thicknesses were 1-11 cm less in 2000-2012 as compared to the total period of observation in the Barents Sea and 4-7 cm less in the Kara Sea. Landfast ice mean thicknesses over the period 2000-2015 were 7-16 cm less as compared to those of the total record in the north-eastern part of the Kara Sea, 0-4 cm in the Laptev Sea and 4-16 cm in the East Siberian Sea.

Landfast ice thickness measurements in the Hopen meteorological station (Svalbard) are carried out since 1966. Maximum sea ice thickness of approximately 1.5 m was observed in winter seasons 1967/1968, 1976/1977, 1987/1988 and 1997/1998. Ice thickness has a declining trend of landfast ice thickness -0.11 m per decade. During 2000-2007 landfast ice thickness was less than 1 m [38]. However, later observations in 2008-2011 in the area with stable landfast ice south of Barentsburg showed growth of landfast ice thickness in Green Fjord. After ice-free period in 2005/2006 mean ice thickness has increased from 5-10 cm in 2007 up to 74 cm in 2011 and maximum thickness has increased from 10 cm in 2007 up to 91 cm in 2011 [39].

Seasonal and interannual variations of landfast ice thickness at the research stations in the Canadian Arctic Archipelago during 1950-2014 are presented in papers [32, 40, 41]. Mean values of maximum landfast ice thickness during the specified period were 2.11 m at Cambridge Bay, 2.02 m at Resolute, 2.27 m and 1.98 m at Eureka and Alert, respectively. In average, landfast ice thickness at these sites has declined for 4.5 cm per decade during 1957-2014 [40].

In 1971-1975 and 1977-1980 sea ice thickness near the Queen Elisabeth Islands was measured during ice drilling for hydrophone mounting by the seismic service. Results of data processing are shown in paper [42]. Thus, mean ice thickness in drilling holes was approximately 3 m in 1971-1974 and slightly more since 1975, i.e. from 3 to 4.6 m in 1978.

## **Main results of sea ice thickness measurements in the Arctic Basin**

The results of observed and measured sea ice thickness are of particular interest in the context of continuing discussion on magnitude and causes of ice decline in the Arctic Basin over the several decades (see annual IPCC reports <https://www.ipcc.ch/>).

Estimations of changes of sea ice thickness in the Arctic Basin are presented in several papers published at the late 1990s-early 2000s and based mainly on measuring sea ice draft along the submarine routes [43-49]. The estimations are ambiguous.

Generalization of data acquired on 12 submarine voyages between 1958 and 1992 [45] reveals no significant change in sea ice thickness in the vicinity of the North Pole, and the study [49] shows no changes in sea ice thickness from 1991 to 1996 based on data from 6 submarine cruises along 150°W.

However, more complete integration of submarine data over the Arctic Basin in the study [46] demonstrates that the overall mean thickness decreased by 42% by the mid-1990s against the mean value 1958-1977. The paper [48] also shows sea ice thinning between mid-1980s and early 1990s according to the data on springtime submarine cruises during 1976-1994. The authors suggest that this thinning is caused by decreased proportion of multi-year ice and increased proportion of thinner first-year ice.



The study [43] introduces estimations of changes in the Arctic ice thickness derived from satellite data between 1982 and 2003. It is reported that mean ice thickness in January increased from 1982 to 1988, decreased from 1988 to 1996 and increased again from 1996 to 2003 mainly in the central Arctic Basin. The results in [44] show no sea ice thinning in the Arctic Basin during 1993-2001 according to the data derived from satellite altimeter measurements.

Integration and comparison of the Arctic ice thickness data for the period 1958-2008 is given in the study [50] (submarine data for the periods 1958-1976, 1993-1997 and satellite data ICESat 2003-2008). Relative to submarine records for the periods 1958-1976 and 1993-1997, the ICESat data (2003-2008) show that ice thickness has decreased by 1.6 m or 53% and by 0.2 m or 12%, respectively. Besides, the papers [50, 51] indicate significant decrease in mean ice thickness from ICESat (2003-2008) induced by a substantial decline of multiyear ice extent in the Arctic.

Later studies analyze data obtained at the beginning of the 21st century which induce definite thinning of the Arctic sea ice. The study [52] analyze sea ice thickness measurements obtained with electromagnetic (EM) instruments in the Fram Strait at the end of summer season from 2003 to 2012. Mean sea ice thickness has decreased by more than 50% during this period. The most significant thinning was indicated between 2003 and 2008. The paper [53] integrates several data sources (submarine data, EM-data and buoy data) and presents

error assessments of existing sea ice thickness measurement techniques. The data indicate that the annual mean ice thickness in the central Arctic Basin has decreased from 3.45 m in 1975 to 1.11 m in 2013 which means a 65% decline. Sea ice changes results in seasonally ice-free areas in a considerable part of the Arctic. The year 2007 may be considered to be a tipping point when proportion of first year ice in the Arctic overpassed 50% [54].

In view of ambiguous estimates of changing Arctic sea ice thickness new estimates based on new data sources are needed. Dedicated ship-based measurements along the long-distance shipping routes may serve as such new data sources. Since the middle of the 20th century to the present days AARI has collected numerous unique ship-based visual data, as well as video-monitoring data since 2004. However, no integrated analysis has been done yet on sea ice thickness distribution and changes based on all available data. AARI's data compilation in the data base 'STK-LED' is currently in progress [55].

Important parts of the data base are observational data along the routes to the North Pole. The nuclear icebreaker 'Arktika' was the first to navigate to the circumpolar Arctic in August 1977 [56], the next was the nuclear icebreaker 'Sibir' in spring 1987 [57]. Navigation to the North Pole has become regular since 1990. Lighter ice conditions in the Arctic made it possible for ice-strengthened vessel 'Akademik Fedorov' to navigate independently in the high latitudes [58]. Since 1990s (with break at early 2000s) the AARI

specialists have conducted dedicated ship-based visual ice observations during navigation to the North Pole. Since 2009 visual observations have been supplemented by ice thickness measurements with TV-system [58-61]. Figure 5 represents map of all expeditions which used TV-system.

During the first cruises to the North Pole in 1977 and 1987 only visual ice observations were carried out. Comparison of data on sea ice thickness distribution along the shipping routes in August 1977 and 2005, as well as in May 1987 and 2006 is given in the study [62]. Mean first-year ice thickness along the track from ice edge in the Laptev Sea to the North Pole in August was 1.2 m in 1977 and 1.19 m in 2005, the same estimates of old year ice thickness were 2.38 m and 2.25 m, respectively. In the period of maximum ice cover in the Arctic in May mean first-year ice thickness along the route to the north-west of Franz

Josef Land archipelago was 1.38 m in 1987 and 1.23 m in 2006, mean old-year ice thickness was 2.56 m and 2.4 m, respectively.

Results of ice thickness measurements in the Arctic Basin during the navigation of nuclear icebreaker 'Rossiya' to the North Pole in August 1990 are shown in paper [63]. Measurements were conducted by video recording and making images of overturned ice manually from screen without using a software, which made it impossible to obtain a statistically significant amount of data and to assess its accuracy. Average ice thickness in 1990 along the 90°E in the area between 81°N and 90°N was 2.5 m. In 2004-2019 the TV-system was used in high-latitude expeditions in the Arctic Basin onboard the research vessel 'Akademik Fedorov' and nuclear icebreakers [17, 18]. The study [18] presents measurements of drifting level ice thickness derived from TV-system along the route between Franz Josef Land and the North Pole in summertime (July-August). The measurements were conducted in 2006-2009. The amount of data is more than 55 000 ice thickness measurements. The comparison of ship-based visual data obtained in 1990s before the current Arctic warming with data collected in 2006-2009 indicates following:

1. During 2006-2009 mean sea ice thickness has decreased along the shipping routes from Franz Josef Land to the North Pole as compared to 1990s. Maximal decline by 34% in July and 42% in August was recorded in 2007.

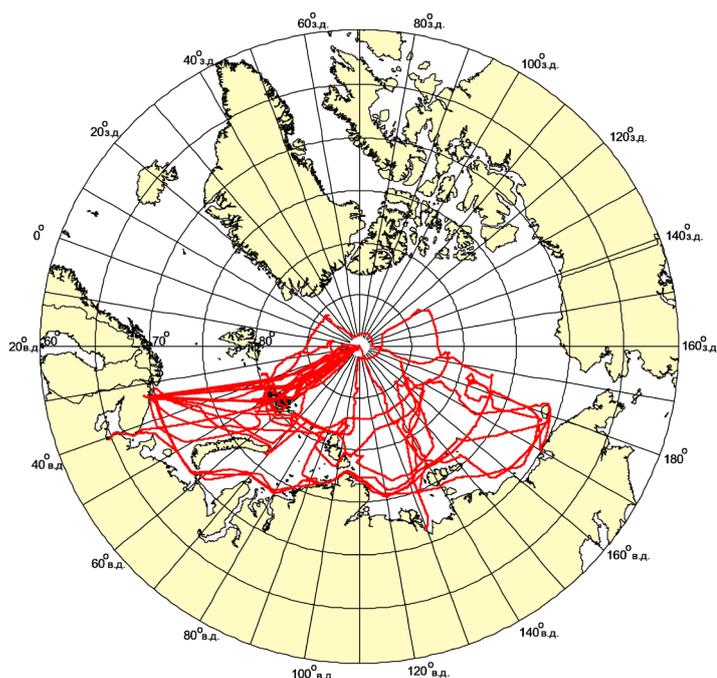


Figure 5 – High-latitude shipping cruises providing ship-based TV observations in 2004-2019.

2. Mean sea ice thickness in summertime remained the same in 2008 and 2009 as compared to summer season 2007.

3. Largest change in thickness for the period 2006-2009 was up to 21% for first-year level ice. Old level ice has decreased by 7-13%.

4. Using of the video monitoring system (TV-system) allows to collect extensive data on sea ice thickness along the shipping routes crossing the Arctic Basin. This technique is an advanced direction for automation of ship-based ice thickness observations. The results of ship-based observations along the route from Franz Josef Land to the North Pole in summertime 2018 are shown in paper [61]. Mean level ice thickness in 2018 has notably decreased compared to the measurements in 1991-1996 and 2006-2011. Mean thickness of old ice was almost 2.5 m in 1991-1996 and 2.25 m in 2006-2011. In 2018 the significant decline of old year ice thickness to 1.6 m was observed. Mean first-year ice thickness has decreased from 1.5 m in 1991-1996 to 1.25 m in 2006-2011 and reaches its minimal values 0.9 m in 2018.

## Conclusions

Maximal coverage by sea ice thickness data in the Arctic Basin nowadays is provided by acoustic sounding from submarines as well as by dedicated ship-based visual observations together with simultaneous TV ship observations from board of ice class vessels and icebreakers. Sonars on submarines measure ice draft, including keels of ice ridges, which prevent

unambiguous estimation of level ice thickness. At the same time the new opportunities are appeared for underway ship-based measurements from ice class vessels and icebreakers due to increased navigation in the Arctic Basin. An advantage of visual ship observations is the unified methodology of measurements proceeding which allows to compare data from different years in different regions, though disadvantage is visual kind of observations which required experienced ice observer and discontinuity of measurements as it is impossible for ice observer to estimate every overturned ice floe near the ship board. Besides, captains try to navigate in thinner ice which has an impact on ice thickness distribution along the ship route. However, TV-system allows to compensate the disadvantage of visual observations and improves significantly the accuracy of measurements.

Sea ice thickness measurements presented in this review were obtained in various areas of the Arctic in different seasons, by different techniques and with different time periods of generalization and, consequently, are not adequate to estimate unambiguously a climate and interannual variability of sea ice thickness in the Arctic. Nevertheless, late AARI researches confirmed by ship-based observations indicate that revealed changes in sea ice thickness are mainly driven by changes in the atmosphere dynamic processes rather than thermodynamic processes due to climate change. Dynamic processes in the atmosphere are associated with changes in atmospheric circulations

providing advection, hummocking and diverging of ice cover. Calculations based on approximation of vector fields of resulting ice drift over long-time periods show that in case of a low residual ice cover in the seas to the east of Severnaya Zemlya the circumpolar area which is usually

covered by old ice is progressively (within 1-2 years) covered by first-year ice 1.5-2.5 m thick due to ice drift. Thereby the significant sea ice thinning is indicated which has been replaced by inherent ice cover in a several years [34, 64, 65].

## Acknowledgements

This paper covers one of scientific activities of Frolov Sergey Viktorovich (1962-2021), who was the head of the Ice Navigation Research Laboratory of AARI since 2000. Sergey Viktorovich Frolov was an expert of the highest level in the fields of analysis of ice and hydrometeorological processes



development, calculating optimal navigation routes in the freezing seas, developing the basic principles of the Hydrometeorological Support of Navigation in the Arctic. He participated in numerous Arctic expeditions, including 13 Russian expeditions to the North Pole, 7 high-latitude expeditions onboard icebreakers and vessels for establishing and evacuation of drifting stations «North Pole» (SP-27, 28, 29, 33-40), 3 ultra-early cruises along the Northern Sea Route, 5 expeditions on the establishment of border of the Continental Shelf of Russia. For his high professional skill Sergey Frolov was awarded the Order «For Merit to the Fatherland» of the 1st grade, the Order «For Merit to the Fatherland» of the 2nd grade, a Certificate of Appreciation from Rosgidromet, the badge «The Honours Polar Explorer», the badge «Honorary Worker of Hydrometeorological Service of Russia». The article is published with profound gratitude for coordination, wisdom and fruitful scientific ideas of Sergey Viktorovich Frolov.

## References:

1. Fazovyj sostav i teplofizicheskie karakteristiki morskogo l'da. / Nazincev YU. L., Panov V. V.: SPb, Gidrometeoizdat, 2000. – 83 s.
2. Ledovye nablyudeniya na moryah. / Deryugin K. K., Karelin D. B.: Gidrometeoizdat, 1954. – 168 s.
3. Strass V. H. Measuring sea ice draft and coverage with moored upward looking sonars // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 1998. – V. 45, No.4. – pp. 795-818. DOI:10.1016/S0967-0637(97)00065-4
4. Wensnahan M., Rothrock D. A. Sea-ice draft from submarine-based sonar: Establishing a consistent record from analog and digitally recorded data // Geophysical Research Letters. – 2005. – V. 32 (11). <https://doi.org/10.1029/2005GL022507>
5. Morskoy led. Sbor i analiz dannyh nablyudenij, fizicheskie svojstva i prognozirovanie ledovyh uslovij (spravochnoe posobie). Pod red. Frolova I. E., Gavrilov V. P. – Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1997. – 402 s.
6. Rothrock D. A., Percival D. B., Wensnahan M. The decline in arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2008. – V. 113 (C5). <https://doi.org/10.1029/2007JC004252>
7. McLaren A. S. The under-ice thickness distribution of the Arctic Basin as recorded in 1958 and 1970 // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1989. – V. 94 (C4) – pp. 4971-4983. <https://doi.org/10.1029/JC094iC04p04971>
8. Kovacs A., Valleau N. C., Holladay J. S. Airborne electromagnetic sounding of sea ice thickness and sub-ice bathymetry // Cold Regions Science and Technology. – 1987. – V. 14 (3) – pp. 289-311. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(87\)90021-8](https://doi.org/10.1016/0165-232X(87)90021-8)
9. Haas C., Lobach J., Hendricks S., Rabenstein L., Pfaffling A. Helicopter-borne measurements of sea ice thickness, using a small and lightweight, digital EM system // Journal of Applied Geophysics. – 2009. – V. 67 (3) – pp. 234-241. DOI 10.1016/j.jappgeo.2008.05.005
10. Peterson I. K., Prinsenbergh S. J., Holladay J. S. Sea-ice thickness measurement: recent experiments using helicopter-borne EM-induction sensors // Resent Res. Devel. Geophysics. – 2003. – V. 5. – pp. 1-20.
11. Eicken H., Bluhm B. A., Collins R. E., R.R. G., Haas C., Ingham M., Mahoney A., Nicolaus M., Perovich D. "Field techniques in sea- ice research" in cold regions science and marine technology // Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO / Shen H. – Paris, France: Eolss Publishers, 2014.
12. Haas C., Hendricks S., Eicken H., Herber A. Synoptic airborne thickness surveys reveal state of Arctic sea ice cover // Geophysical Research Letters. – 2010. – V. 37 (9). <https://doi.org/10.1029/2010GL042652>
13. Haas C. Evaluation of ship-based electromagnetic-inductive thickness measurements of summer sea-ice in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica // Cold Regions Science and Technology. – 1998. – V. 27 (1). – pp. 1-16. hdl:10013/epic.11731.d001

14. Pfaffling A., Haas C., Reid J. E. Direct helicopter EM — Sea-ice thickness inversion assessed with synthetic and field data // *Geophysics*. — 2007. — V. 72 (4). — pp. F127-F137. hdl:10013/epic.26722.d001
15. Nablyudeniya za ledovoj obstanovkoj: uchebnoe posobie. — SPb: AANII, 2009. — 360 s.
16. Rukovodstvo po proizvodstvu sudovyh special'nyh ledovyh nablyudenij. — SPb: AANII, 2011. — 2011 s.
17. Frolov S. V., Klejn A. E., Tret'yakov V. YU. Rezul'taty ispol'zovaniya cifrovogo televizionnogo kompleksa dlya izmereniya tolshchiny l'da v Arkticheskom bassejne v 2004-2005 gg. // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. — 2007. — T. 75. — C. 123-127.
18. Frolov S. V., Tret'yakov V. YU., Klejn A. E., Alekseeva T. A. Novye dannye o tolshchine l'da i ee izmenchivosti v Arkticheskom bassejne v 2006-2009 godah // *Led i sneg*. — 2011. — T. 3, № 115. — C. 99-104.
19. Serovetnikov S. S., Frolov S. V., Klejn A. E. Sudovoj televizionnyj kompleks — realizaciya avtomatizirovannoj sistemy naturnyh izmerenij tolshchiny morskogo l'da // *Rossijskaya Arktika*. — 2018. — T. 2. — C. 41-55. DOI: 10.24411/2658-4255-2018-00017
20. Toyota T., Kawamura T., Ohshima K. I., Shimoda H., Wakatsuchi M. Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2004. — V. 109 (C6).
21. Toyota T. Application of remote sensing to the estimation of sea ice thickness distribution // *Advances in geoscience and remote sensing / Jedlovec G.* — London UK, 2009.
22. Vinje T., Nordlund N., Kvambekk Å. Monitoring ice thickness in Fram Strait // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1998. — V. 103 (C5). — pp. 10437-10449. <https://doi.org/10.1029/97JC03360>
23. Melling H., Riedel D. A., Gedalof Z. e. Trends in the draft and extent of seasonal pack ice, Canadian Beaufort Sea // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — V. 32 (24). <https://doi.org/10.1029/2005GL024483>
24. Krishfield R. A., Proshutinsky A., Tateyama K., Williams W. J., Carmack E. C., McLaughlin F. A., Timmermans M. L. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2014. — V. 119 (2). — pp. 1271-1305. <https://doi.org/10.1002/2013JC008999>
25. Hansen E., Gerland S., Granskog M. A., Pavlova O., Renner A. H. H., Haapala J., Løyning T. B., Tschudi M. Thinning of Arctic sea ice observed in Fram Strait: 1990–2011 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2013. — V. 118 (10). — pp. 5202-5221. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20393>
26. Rösel A., Itkin P., King J., Divine D., Wang C., Granskog M. A., Krumpfen T., Gerland S. Thin Sea Ice, Thick Snow, and Widespread Negative Freeboard Observed During N-ICE2015 North of Svalbard // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2018. — V. 123 (2). — pp. 1156-1176. <https://doi.org/10.1002/2017JC012865>
27. Renner A. H. H., Hendricks S., Gerland S., Beckers J., Haas C., Krumpfen T. Large-scale ice thickness distribution of first-year sea ice in spring and summer north of Svalbard

- // *Annals of Glaciology*. – 2013. – V. 54 (62). – pp. 13-18. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A146>
28. Haapala J., Lensu M., Dumont M., Renner A. H. H., Granskog M. A., Gerland S. Small-scale horizontal variability of snow, sea-ice thickness and freeboard in the first-year ice region north of Svalbard // *Annals of Glaciology*. – 2013. – V. 54 (62). – pp. 261-266. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A157>
29. Haas C., Beckers J., King J., Silis A., Stroeve J., Wilkinson J., Notenboom B., Schweiger A., Hendricks S. Ice and Snow Thickness Variability and Change in the High Arctic Ocean Observed by In Situ Measurements // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – V. 44 (20). – pp. 10,462-10,469. <https://doi.org/10.1002/2017GL075434>
30. Richter-Menge J. A., Farrell S. L. Arctic sea ice conditions in spring 2009–2013 prior to melt // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – V. 40 (22). – pp. 5888-5893. <https://doi.org/10.1002/2013GL058011>
31. Haas C., Howell S. E. L. Ice thickness in the Northwest Passage // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – V. 42 (18). – pp. 7673-7680. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>
32. Brown R., Cote P. Interannual Variability of Landfast Ice Thickness in the Canadian High Arctic, 1950-89 // *Arctic*. – 1992. – V. 45. – pp. 273-284. <https://www.jstor.org/stable/40511459>
33. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas - Centennial Ice Cover Observations. / Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Kovalev E. G., Smolyanitsky, M. V.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 166 p.
34. Nauchnye issledovaniya v Arktike. Tom 2. Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova morej Evrazijskogo shel'fa. / Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Kovalev E. G., Smolyanickij V. M. – SPb: Nauka, 2007. – 136 s.
35. Pripaj i zapripajnye polyn'i Arkticheskikh morej Sibirskogo shel'fa v konce XX - nachale XXI veka. / Karelin I. D., Karklin V. P. – SPb: AANII, 2012. – 180 s.
36. Ledovye usloviya morej Evropejskoj chasti Rossii. / Dumanskaya I. O. – Moskva, 2014. – 605 s.
37. Ledovye usloviya morej Aziatskoj chasti Rossii. / Dumanskaya I. O. – Moskva, 2017. – 637 s.
38. Gerland S., Renner A. H. H., Godtlielsen F., Divine D., Løyning T. B. Decrease of sea ice thickness at Hopen, Barents Sea, during 1966–2007 // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – V. 35 (6). <https://doi.org/10.1029/2007GL032716>
39. Ivanov B. V., Pavlov A. K., Andreev O. M., Zhuravskij D. M., Syvashchennikov P. N. Issledovaniya snezhno-ledyanogo pokrova zaliva Gren-ford (arh. SHpicbergen): istoricheskie dannye, naturnye issledovaniya, modelirovanie. // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. – 2012. – T. 2. – C. 43-54.
40. Howell S. E. L., Laliberté F., Kwok R., Derksen C., King J. Landfast ice thickness in the Canadian Arctic Archipelago from observations and models // *The Cryosphere*. – 2016. – V. 10 (4). – pp. 1463-1475. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1463-2016>
41. Vincent W. F., Gibson J. A. E., Jeffries M. O. Ice-shelf collapse, climate change, and habitat loss in the Canadian high Arctic // *Polar Record*. – 2001. – V. 37 (201). – pp. 133-142. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0032247400026954>
42. Melling H. Sea ice of the northern

- Canadian Arctic Archipelago // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2002. – V. 107 (C11). – pp. 2-1-2-21. <https://doi.org/10.1029/2001JC001102>
43. Belchansky G. I., Douglas D. C., Platonov N. G. Fluctuating Arctic Sea Ice Thickness Changes Estimated by an In Situ Learned and Empirically Forced Neural Network Model // *Journal of Climate*. – 2008. – V. 21 (4). – pp. 716-729. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1787.1>
44. Laxon S., Peacock N., Smith D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region // *Nature*. – 2003. – V. 425 (6961) – pp. 947-950. DOI: 10.1038/nature02050
45. McLaren A. S., Bourke R. H., Walsh J. E., Weaver R. L. Variability in Sea-Ice Thickness Over the North Pole from 1958 to 1992 // *The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment Geophysical Monograph Series*, 1994. – pp. 363-371. <https://doi.org/10.1029/GM085p0363>
46. Rothrock D. A., Yu Y., Maykut G. A. Thinning of the Arctic sea-ice cover // *Geophysical Research Letters*. – 1999. – V. 26 (23). – pp. 3469-3472. <https://doi.org/10.1029/1999GL010863>
47. Shy T. L., Walsh J. E. North Pole ice thickness and association with ice motion history 1977–1992 // *Geophysical Research Letters*. – 1996. – V. 23 (21). – pp. 2975-2978.
48. Tucker Iii W. B., Weatherly J. W., Eppler D. T., Farmer L. D., Bentley D. L. Evidence for rapid thinning of sea ice in the western Arctic Ocean at the end of the 1980s // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – V. 28 (14). – pp. 2851-2854. <https://doi.org/10.1029/2001GL012967>
49. Winsor P. Arctic sea ice thickness remained constant during the 1990s // *Geophysical Research Letters*. – 2001. – V. 28 (6). – pp. 1039-1041. <https://doi.org/10.1029/2000GL012308>
50. Kwok R., Rothrock D. A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – V. 36 (15). <https://doi.org/10.1029/2009GL039035>
51. Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H. J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2009. – V. 114 (C7). <https://doi.org/10.1029/2009JC005312>
52. Renner A. H. H., Gerland S., Haas C., Spreen G., Beckers J. F., Hansen E., Nicolaus M., Goodwin H. Evidence of Arctic sea ice thinning from direct observations // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – V. 41 (14). – pp. 5029-5036. <https://doi.org/10.1002/2014GL060369>
53. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations // *The Cryosphere*. – 2015. – V. 9 (1). – pp. 269-283. <https://doi.org/10.5194/tc-9-269-2015>
54. Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A., Koldunov N., Repina I. A., Smirnov A. V. Arkticheskiy ledyanoy pokrov stanovitsya sezonnyy? // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. – 2013. № № 4. – С. 50–65. <http://dx.doi.org/10.7868/S0205961413040076>
55. Frolov S. V., Makarov E. I., Tret'yakov V. YU., Serovetnikov S. S., Alekseeva T. A., Grishin E. A., Pryahin S. S., Sapershtejn E. B., YAroslavceva S. I., Sergeeva I. A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy



- dannyh №2019621801 "STK-LED" // Book Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh №2019621801 "STK-LED" / Editor, 2019.
56. Buzuev A. YA., Frolov S. V., YULin A. V. Vydayushchiesya morskije plavaniya v moryah Sibirskogo shel'fa i Arkticheskom bassejne vo vtoroj polovine XX veka. // ICETECH'2000 – SPb, 2000. – C. 79-83.
57. Rezul'taty pervoj nauchnoj ekspedicii v pripolyusnom rajone na atomnom ledokole "Sibir". Pod red. CHilingarova A. N., Krutskih L. – L.: Gidrometeoizdat, 1990. – 176 s.
58. Frolov S. V., YULin A. V. Specializirovannoe gidrometeorologicheskoe obespechenie vysokoshirotnyh rejsov NES "Akademik Fedorov" v 2000, 2004-2005 gg. // Problemy Arktiki i Antarktiki. – 2006. – T. 75. – C. 128-139.
59. Frolov S. V. Main typical features in the distribution of ice cover characteristics and their influence on icebreaker motion in the Arctic Basin in summertime (from data of highlatitudinal cruises). // Proc. of POAC'95. – T. 1 – Murmansk, Russia, August 15-18, 1995. – pp. 27-36.
60. YULin A. V. Osnovnye rezul'taty ledovyh nablyudenij za tolshchinoj ledyanogo pokrova v vysokoshirotnoj arkticheskoj ekspedicii ACEX-2004. // Problemy Arktiki i Antarktiki. – 2007. – T. 77. – C. 107-114.
61. Alekseeva T. A., Serovetnikov S. S., Frolov S. V., Sokolov V. T. Ledovye usloviya plavaniya v Arkticheskom bassejne v letnij period 2018 goda. // Rossijskaya Arktika. – 2018. – T. 2. – C. 31-40. DOI: 10.24411/2658-4255-2018-00016
62. Frolov S. V., Fedyakov V. E., Tret'yakov V. YU., Klejn A. E., Alekseev G. V. Novee dannye ob izmenenii tolshchiny l'da v Arkticheskom bassejne // Doklady Akademii Nauk. – 2009. – T. 425, № 1. – C. 104-108.
63. Tunik A. L. Route-specific ice thickness distribution in the Arctic Ocean during a North Pole crossing in August 1990 // Cold Regions Science and Technology. – 1994. – V. 22 (2). – pp. 205-217.
64. Gudkovich Z. M., Kovalev E. G. Kolebaniya ledovitosti rossijskih arkticheskikh morej v HKH v. i ocenka ee vozmozhnyh izmenenij v HKHI v // Nauchno-prakticheskoe soveshchanie «Gidrometeorologicheskoe obespechenie hozyajstvennoj deyatel'nosti v Arktike i zamerzayushchih moryah – Sankt-Peterburg, 2002. – C. 36-45.
65. Nauchnye issledovaniya v Arktike. Tom 1. Nauchno-issledovatel'skie drejfuyushchie stancii «Severnyj polyus». / Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Radionov V. F., Timohov L. A., SHirochkov A. V. – SPb: Nauka, 2005. – 267 s.

UDC 621.31 : 620.92 553.982  
DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-50-61

**Citing:**

R. Stepanov, T. Akhmetshin.  
Geodynamic Risk Assessments for Oil  
and Gas Industry of the Arctic Zone.  
Russian Arctic. 2021; № 12: p.p 50-61. (In  
Russ.). DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-  
50-61

Received: 03.03.2021  
Approved: 23.03.2021  
Published: 13.04.2021



This is an open access article distributed  
under the terms of the Creative  
Commons Attribution License  
(CC-BY 4.0)

## ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РИСКОВ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Р.О. Степанов<sup>1</sup>, Т.Р. Ахметшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дирекция Арктических программ МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
Москва, Россия; stepanovr@bmstu.ru

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический  
университет, Уфа, Россия; atr93@mail.ru

**Аннотация:** В статье показывается, что истощение действующих месторождений нефти и газа приводит к переносу основной добычи углеводородов в Арктическую зону Земного шара, где сосредоточены их значительные запасы. Говорится о том, что управление геодинамическими рисками на территориях нефтегазовых комплексов связано с использованием методов математического моделирования. Модели оценки геодинамических рисков подразделяются на детерминированные, вероятностные и модели, основанные

на использовании математического аппарата нечётких множеств. Для решения задачи риск-классификации территорий Арктической зоны применительно к размещению объектов нефтегазового комплекса использованы нечёткие модели. Метод решения задач управления геодинамическими рисками на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы, позволяет выполнить ранжирование объектов по степени уязвимости по отношению к проявлению геодинамических опасностей. Делается вывод, что подобный подход даёт возможность обосновывать качественные управленческие решения при обеспечении безопасности нефтегазовых комплексов.

**Ключевые слова:** нефтегазовая отрасль, геодинамический риск, территория, моделирование, оценка, нечеткая модель, минимизация опасности

## GEODYNAMIC RISK ASSESSMENTS FOR OIL AND GAS INDUSTRY OF THE ARCTIC ZONE

R.O. STEPANOV<sup>1</sup>, T.R. AKHMETSHIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Arctic Programs Directorate of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;  
stepanovr@bmstu.ru

<sup>2</sup> Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia; atr93@mail.ru

**Abstract:** The article shows that the depletion of existing oil and gas fields leads to the transfer of the main hydrocarbons production to the Arctic zone of the Globe, where their significant reserves are concentrated. It is stated that the management of geodynamic risks in the territories of oil and gas basins is associated with the use of mathematical modeling methods. Models for assessing geodynamic risks are divided into deterministic, probabilistic, and based on the use of the mathematical apparatus of fuzzy sets. To solve the problem of risk classification of the Arctic zone territories in relation to the location of oil and gas facilities, fuzzy models were used. The method of solving problems of managing geodynamic risks in the territories containing oil and gas complexes allows you to rank objects according to the degree of vulnerability in relation to the manifestation of geodynamic hazards. It is concluded that this approach makes it possible to justify high-quality management decisions in ensuring the safety of oil and gas complexes.

**Keywords:** oil and gas industry, geodynamic risk, territory, modeling, assessment, fuzzy model, hazard minimization

---

## Введение

Задачи оценки рисков на территориях с нефтегазовыми комплексами (НГК) приобретают особую значимость и всё большую актуальность в связи с тем, что количество аварий и катастроф здесь, связанных с природно-техногенными процессами геодинамического происхождения, продолжает оставаться высоким.

Приближающееся истощение существующих месторождений нефти и газа в регионах мира, находящихся в относительно благоприятных по климатическим, экономическим и экологическим условиям, приведет к переносу основной добычи туда, где ресурсы еще не разведаны или не разработаны.

Учитывая возникшие проблемы с поиском альтернативных видов топлива и источников энергии, в вопросах поддержания спроса на углеводороды и их добычи со всей очевидностью особую роль начинает играть Арктическая зона Земного шара, где сосредоточены их значительные запасы. По самым приблизительным оценкам в Арктике находится около 85 млрд баррелей нефти и столько же триллионов кубометров природного газа. При этом в российских границах сосредоточено около двух третей запасов газа и более 40% – черного золота [1].

И именно в Арктической зоне наиболее отчетливо проявляются специфические геодинамические угрозы, представляющие существенную опасность для создания, функционирования и развития нефтегазовых комплексов (НГК), на территориях, характеризующихся неустойчивой геодинамикой. Это – землетрясения, криповые подвижки, карстово-деформационные процессы, оползни, провалы, проседания и другие феномены, связанные с геодеформационными процессами в литосфере.

Воспроизвести геодинамические риски весьма проблематично натурно, в то же время их математическое моделирование имеет в современных условиях хорошие перспективы при решении задач обеспечения безопасного функционирования и развития нефтегазового сектора топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России.

К настоящему времени разработан достаточно широкий спектр математических моделей, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих решать различные задачи оценки геодинамического риска на различных по геологическому строению территориях [2-6], в строительстве [7, 8]. В ряде работ затронуты вопросы управления геодинамическими рисками [9, 10]. В то же время, представленные математические модели, методы и алгоритмы не позволяют в полной мере решать такие задачи, как, например, оценка риска повреждения или разрушения промысловых и иных промышленно-хозяйственных объектов НГК, сетей инженерных и транспортных коммуникаций, относящихся к инфраструктуре НГК, оценка риска принятия неверного решения при разведке нефти и газа, а также оптимального размещения объектов НГК с учетом геодинамических рисков.

Всё вышесказанное требует разработки более совершенных математических моделей, методов, алгоритмов для решения указанных задач, а также программных средств их реализации.

Настоящая статья посвящена решению актуальной научной задачи – разработке современных математических моделей и алгоритмов оценки геодинамических рисков с целью обеспечения безопасности объектов НГК от возможных проявлений геодинамических угроз.

## Модели оценки геодинамических рисков

При управлении рисками геодинамического характера на территориях НГК возникают четыре основные задачи: оценка безопасности территории, оценка состояния геологической среды, риск-классификация состояния объектов и их мониторинг. Все перечисленные задачи тесно связаны между собой, требуя для своего решения использование методов математического моделирования.

Модели оценки геодинамических рисков подразделяются на детерминированные, вероятностные и модели, основанные на использовании математического аппарата нечётких множеств [11].

Применяются **детерминированные модели** двух типов: двумерные и трёхмерные. Наиболее эффективны трёхмерные модели, базирующиеся на следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \rho g u_z(x, y, h) - \sigma_z(x, y, h) = 0, \\ \sigma_z(x, y, 0) + (\rho_0 - \rho) g u_z(x, y, 0) = \rho h_{\max} P(x, y), \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau_{xz}$  – касательные напряжения в плоскости  $XZ$ ;  $\sigma_z$  – вертикальная составляющая нормальных напряжений;  $u_z$  – вертикальная составляющая полного вектора смещений в геологической среде;  $P(x, y)$  – величина распределенной нагрузки в точке с координатами  $(x, y)$ ;  $\rho$  – средняя плотность вещества геологической среды,  $\rho_0$  – средняя плотность вещества ниже условной модельной границы приложения внешней распределенной нагрузки;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h_{\max}$  – наибольшая величина отклонения модельной нижней границы от нулевого уровня;  $h$  – средняя толщина рассматриваемого модельного упругого пространства.

Детерминированные модели ориентированы на оценку геодинамических рисков для достаточно протяжённых территорий регионального масштаба. Однако они не всегда корректно “работают” на меньших по площади территориях вследствие разреженности данных о полях геодинамических аномалий.

Подобных недостатков лишены **вероятностные модели** оценки сейсмического риска. Предполагается, что последовательность геодинамических состояний геологической среды некоторой территории представляет собой простейший поток однородных событий, удовлетворяющий условиям независимости, однородности и ординарности.

Используя дифференциальные уравнения Колмогорова, описана динамика вероятностей  $p_k(t)$  трёх состояний:

Состояния геологической среды опре-

$$\begin{cases} p_1'(t) = -\alpha_{13} p_1(t) + \alpha_{31} p_3(t), \\ p_2'(t) = -\alpha_{23} p_2(t) + \alpha_{32} p_3(t), \\ p_3'(t) = \alpha_{13} p_1(t) + \alpha_{23} p_2(t) - (\alpha_{31} + \alpha_{32}) p_3(t). \end{cases} \quad (2)$$

деляются следующим образом. Предполагается, что в некоторый момент времени  $t_0$  геосреда обладает некоторым энергетическим параметром  $E_0$ , отражающим опасные геологические процессы (ОГП).

Тогда состоянием 1 назовем такое состояние геосреды, при котором  $\Delta E_1 = E_1 - E_0 \rightarrow 0$ , т.е. она находится в равновесном устойчивом состоянии ( $E_1$  – энергетический параметр ОГП в момент времени  $t_1$ ).

Состоянием 2 назовем состояние, при котором геосреда находится в неустойчивом неравновесном состоянии, т.е.  $\Delta E_2 = E_2 - E_1 \neq 0$  ( $E_2$  – энергетический параметр ОГП в момент времени  $t_2$ ).

Состоянием 3 назовем квазиравновесное состояние, при котором геосреда,  $\Delta E_3 = E_3 - E_1 \neq 0$ , причем  $\Delta E_1 < \Delta E_3 \ll \Delta E_2$  ( $E_3$  – энергетический параметр ОГП в момент времени  $t_3$ ).

Величины  $\alpha_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) физически представляют собой сумму энергетических параметров процессов, протекающих в геосреде, окончание которых приводит к ее переходу из состояния  $i$  в состояние  $j$ .

Однако к территориям, значительно неоднородным в тектоническом отношении, как это имеет место в Арктической зоне, применение и детерминированных, и вероятностных моделей также не всегда оправдано по причине неопределенности данных. Это, в частности, относится к решению задачи риск-классификации территорий Арктической зоны применительно к размещению объектов НГК. Поэтому для её решения осуществлено применение **моделей, основанных на математическом аппарате нечётких множеств**.

При формировании базы правил системы нечёткого вывода в качестве входных переменных использовались характеристики геосреды, полученные на основании анализа макросейсмических и других

данных по геодинамическим явлениям, так и информация о напряжениях и смещениях, рассчитанных с помощью детерминированных и вероятностных математических моделей.

### Оценка рисков на территориях Арктической зоны

Рассмотрим метод формализации взаимодействия природных, техногенных и антропогенных процессов в НГК. С этой целью определим множества  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , отражающие совокупности факторов, способов и объектов природной, техногенной и антропогенной составляющих нефтегазового комплекса.

Элементами множества  $X$  (факторы воздействия на объекты НГК) определим следующие:  $x_1$  – «землетрясения»;  $x_2$  – «вертикальные и горизонтальные смещения на дневной поверхности»;  $x_3$  – «криповые подвижки»;  $x_4$  – «карстово-деформационные процессы»;  $x_5$  – «неоднородности геологической среды»;  $x_6$  – «неоднородности ландшафта»;  $x_7$  – «статическая нагрузка от зданий и сооружений»;  $x_8$  – «тектонические разломные нарушения»;  $x_9$  – «природные физические поля»;  $x_{10}$  – «технические воздействия»;  $x_{11}$  – «гидрологическая и гидрогеологическая сети»;  $x_{12}$  – «атмосферное влияние»;  $x_{13}$  – «организационно-правовое поле»;  $x_{14}$  – «социокультурное поле».

Элементами множества  $Y$  (способы воздействия на объекты НГК) являются:  $y_1$  – «механические колебания»;  $y_2$  – «геодинамические напряжения и деформации»;  $y_3$  – «опускания и поднятия»;  $y_4$  – «оползни»;  $y_5$  – «микросмещения по бортам разломов»;  $y_6$  – «подтопления, заболачивания»;  $y_7$  – «провалы»;  $y_8$  – «электромагнитные волны»;  $y_9$  – «акустические волны»;  $y_{10}$  – «температурное поле»;  $y_{11}$  – «инфразвуковое давление»;  $y_{12}$  – «трещиноватость геологической среды»;  $y_{13}$  – «поле биоактивного диапазона»;  $y_{14}$  – «пейзажное разнообразие»;  $y_{15}$  – «нормативные документы»;  $y_{16}$  – «общественное мнение»;  $y_{17}$  – «средства массовой информации»;  $y_{18}$  – «реклама».

К элементам множества  $Z$  (объекты НГК) отнесём следующие:  $z_1$  – «жилой дом, гостиница, общежитие»;  $z_2$  – «предприятие

торгово-бытовой сферы»;  $z_3$  – «медицинское учреждение»;  $z_4$  – «управляющий комплекс»;  $z_5$  – «административное здание»;  $z_6$  – «общая насосная станция»;  $z_7$  – «складское помещение (склад, ангар)»;  $z_8$  – «энергетическая станция»;  $z_9$  – «кустовая насосная станция»;  $z_{10}$  – «транспортные магистрали»;  $z_{11}$  – «инженерные сети и коммуникации»;  $z_{12}$  – «трубопровод»;  $z_{13}$  – «геологическая среда»;  $z_{14}$  – «природный ландшафт».

Решим задачу оценки воздействия элементов множества  $X$  на элементы множества  $Z$ . Из экспертных источников применительно к конкретному территориальному полигону в Арктической зоне РФ, содержащему НГК, получены оценки степени воздействия элементов множества  $X$  через элементы множества  $Y$  (нечёткое отношение  $P$  на множествах  $X$  и  $Y$ ), а также степени воздействия элементов множества  $Y$  на элементы множества  $Z$  (нечёткое отношение  $Q$  на множествах  $Y$  и  $Z$ ). Матрицы нечётких отношений представлены в виде значений функций принадлежности  $u_p(x_i, y_j)$  и  $u_q(y_i, z_j)$ ; максимальные степени воздействия соответствуют единице.

Воздействие факторов через различные способы формально определяется в виде бинарного нечёткого отношения  $P = \{(x_i, y_j), u_p((x_i, y_j))\}$ , заданного на декартовом произведении множеств  $X \times Y$ , а воздействие способов на объекты НГК формально определяется в виде бинарного нечёткого отношения  $Q = \{(y_i, z_j), u_q((y_i, z_j))\}$ , заданного на декартовом произведении множеств  $Y \times Z$ .

Определим композицию бинарных нечётких отношений  $P \otimes Q$ , функция принадлежности которой описывается следующим выражением [1]:

$$u_{P \otimes Q}(x_i, z_j) = \max_{y_i \in Y} \{ \min \{ u_p((x_i, y_i)), u_q((y_i, z_j)) \} \}, \forall (x_i, z_j) \in X \times Z \quad (3)$$

В подобной интерпретации функции принадлежности нечёткого отношения  $P \otimes Q$  отражают собой степень принадлежности множеству  $R = \{r_i | r_i \in [0; 1]\}$  значений воздействий внешних природных, техногенных и антропогенных факторов на объекты НГК. По существу, величины

$r_i$  представляют значения риска для каждого из объектов НГК от конкретного природного, техногенного или антропогенного источника воздействия.

На рисунках 1 и 2 в убывающем порядке приведены интегральные риски для объектов НГК и интегральные риски от природных, техногенных и антропогенных процессов, соответственно.

Как видно из рис. 1, наибольшему риску подвержены медицинские учреждения, предприятия торгово-бытовой сферы и жилые здания (0.7 и более), наименьшему – энергетические станции, транспортные магистрали и складские помещения (0.5 и менее).

Из рис. 2 следует, что наиболее опасными для объектов НГК являются вертикальные и горизонтальные движения на поверхности, землетрясения, техногенные воздействия, гидро- и гидрогеологическая сеть (более 0.7), наименее опасными – атмосферное влияние и тектонические разломные нарушения геологической среды (менее 0.4).

Предложенный метод формализованного представления рисков геодинамического происхождения для объектов НГК, основанный на нечётких отношениях, позволяет оценить объекты НГК на предмет их рисковости устойчивости, ранжировать природные, техногенные и

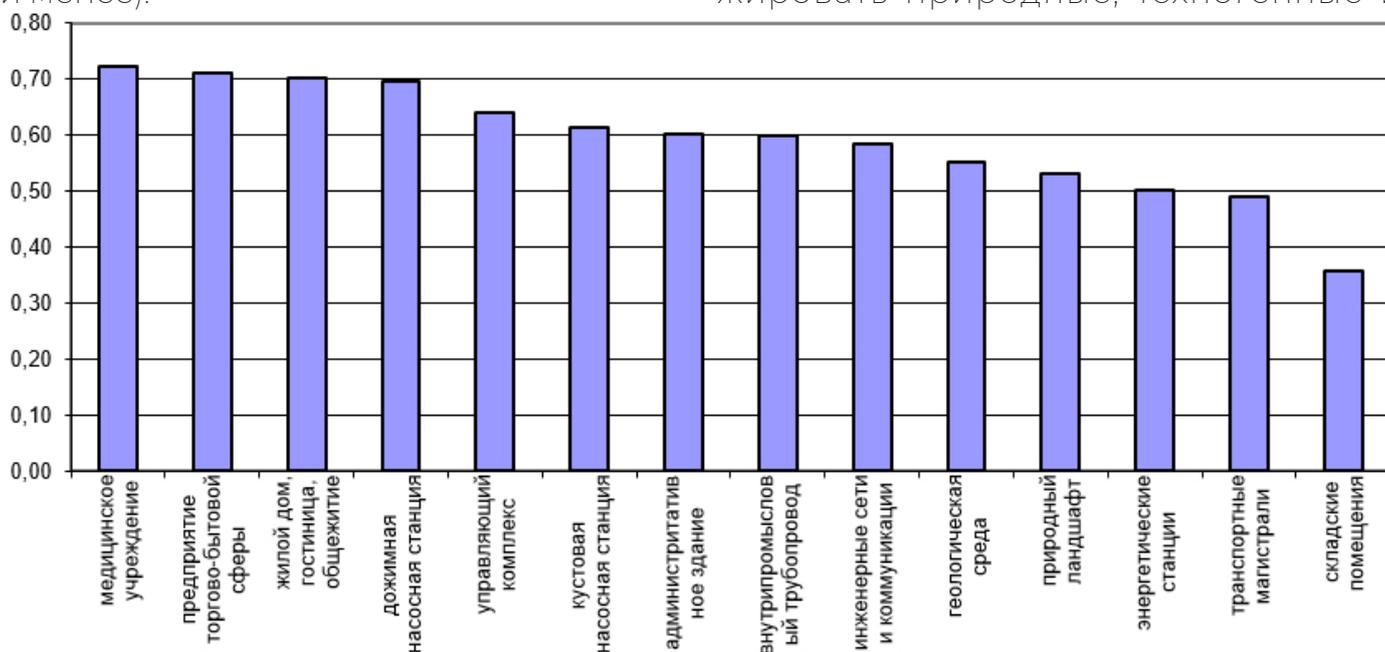


Рисунок 1 – Интегральный риск для объектов НГК.

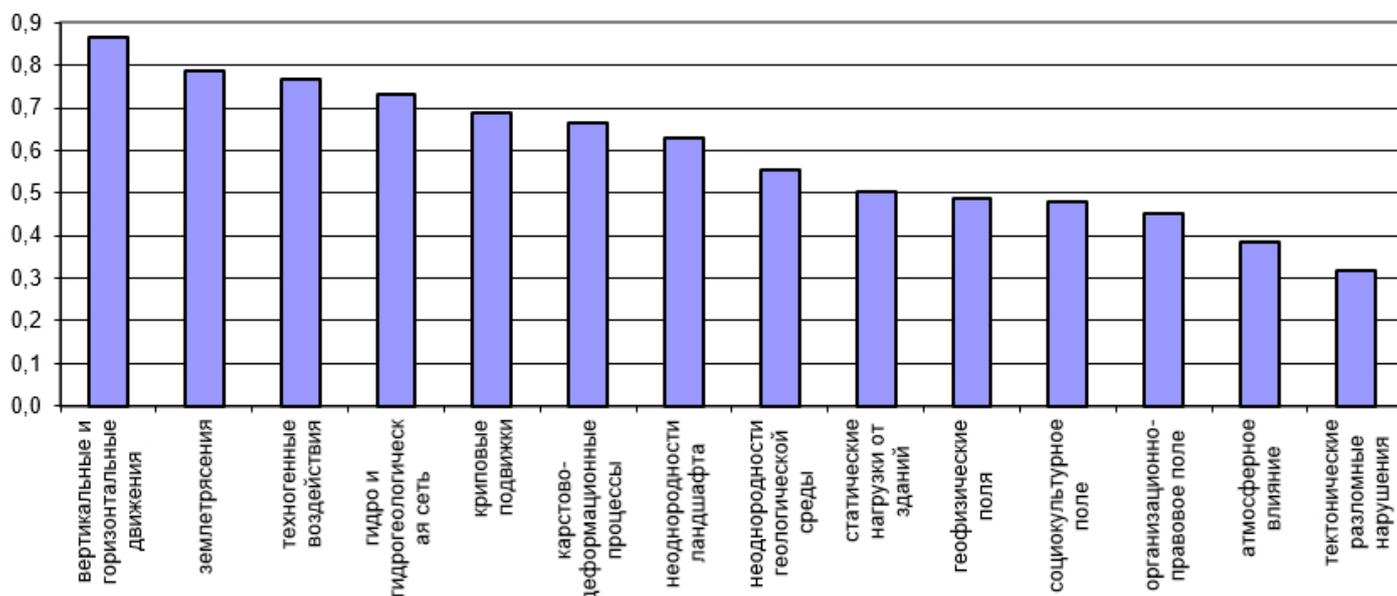


Рисунок 2 – Интегральный риск от природных, техногенных и антропогенных процессов.

антропогенные процессы по степени их воздействия на конкретные объекты, а также оценить интегральные риски для них и интегральные риски от указанных процессов.

### Риск-классификация территорий и объектов Арктической зоны

Оценка риска принятия неверного решения по территориальному размещению объектов НГК, возникающего в случае отсутствия учёта пространственного распределения зон геодинамических аномалий и зон возможного развития опасных процессов геодинамического происхождения, является одной из важнейших задач оценивания безопасности в Арктической зоне.

Одним из важных этапов оценки рисков на территории НГК является ранжирование её различных зон по уровню безопасности объектов. Оно позволяет оценивать не только интегральный риск для всей территории, но и выполнять «точечно-площадные» оценки. Однако для их использования необходимо обладать достоверной информацией о достаточно большой совокупности характеристик, описывающих исследуемую территорию. Например, о гравитационных, магнитных, тепловых, техногенных и других полях, являющихся пространственно распределёнными. Следует также иметь четкое представление о неоднородностях геологической среды, наличии разломов, трещиноватости, знать о состоянии различных строительных сооружений, инженерных сетей, коммуникаций и других объектов НГК, информация о которых, как правило, представляется в виде экспертных оценок.

Поэтому актуальна разработка метода, позволяющего и надежно классифицировать объекты НГК, и выполнять их риск-анализ. Рассмотрим суть предлагаемого метода.

Разобьем некоторую исследуемую территорию на множество таксонов-участков  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ . Во множество признаков, характеризующих риск-состояние каждого элемента  $T$ , учтён комплекс природных, техногенных и антропогенных воздей-

ствий, проявляющихся в пределах каждого таксона.

Комплексные параметры определены следующим образом:

$p_1$  – «природные геологические процессы» (ПГП);

$p_2$  – «особенности ландшафтно-геологического воздействия» (ОЛГВ);

$p_3$  – «природные физические поля» (ПФП);

$p_4$  – «техногенное воздействие» (ТВ);

$p_5$  – «антропогенное воздействие» (АВ).

Параметр  $p_1$  отражает подмножество множества  $X$ , определенного выше, характеризуя:  $x_1$  – «землетрясения»;  $x_2$  – «вертикальные и горизонтальные движения на поверхности»;  $x_3$  – «криповые подвижки»;  $x_4$  – «карстово-деформационные процессы».

Параметр  $p_2$  включает подмножество, включающее показатели:  $x_5$  – «неоднородность геологической среды»;  $x_6$  – «неоднородность ландшафта»;  $x_8$  – «тектонические разломные нарушения»;  $x_{11}$  – «гидро- и гидрогеологические сети».

Параметр  $p_3$  объединяет подмножество, характеризующих:  $x_9$  – «природные физические поля»;  $x_{12}$  – «атмосферное влияние».

Параметр  $p_4$  характеризует подмножество показателей, отражающих:  $x_7$  – «статические нагрузки»;  $x_{10}$  – «технические воздействия». Кроме того, дополнительно учитываются такие показатели, как техническое состояние объектов, загрязнение воздуха и влияние автомобильного транспорта.

Параметр  $p_5$  группирует показатели подмножества, относящиеся к полям гуманитарного характера:  $x_{13}$  – «организационно-правовому полю»;  $x_{14}$  – «социокультурному полю».

Каждый из таксонов-участков отнесён к одному из следующих классов:

$q_1$  – «безопасный таксон» (риск  $r < 0.2$ );

$q_2$  – «слабо опасный таксон» ( $0.2 \leq r < 0.3$ );

$q_3$  – «умеренно опасный таксон» ( $0.30 \leq r < 0.45$ );

$q_4$  – «опасный таксон» ( $0.45 \leq r < 0.60$ );

$q_5$  – «значительно опасный таксон» ( $0.6 \leq r < 0.8$ );

$q_6$  – «чрезвычайно опасный таксон»

$(0.8 \leq r < 0.9)$ ;

$q_7$  – «катастрофически опасный таксон»  
( $r > 0.9$ ).

Итак, общая задача заключается в том, чтобы классифицировать таксоны-участки, на которые разбивается исследуемая территория, содержащая НГК, по уровням безопасности (или уровням риска) при учете воздействий на них, исходящих от природной, техногенной и антропогенной составляющих окружающей среды.

Рассмотрим более подробно, как осуществляются процедуры оценки комплексных параметров  $p_i (i=1,5)$ . В настоящей статье сделаем это на примере комплексного параметра  $p_4$  – «техногенное воздействие».

При кластеризации находящихся на территории объектов по техногенным воздействиям на их риск-состояние используем оценки статической нагрузки на приповерхностные грунты и технические воздействия, количественно определяемые через такие элементы множества  $Y$  (способы воздействия на объекты НГК), как:  $y_1$  – «механические вибрации»;  $y_8$  – «электромагнитные волны»;  $y_9$  – «акустические волны»;  $y_{10}$  – «температурное поле»;  $y_{11}$  – «инфразвуковое давление», а также данные по техническому состоянию объектов, загрязнению воздуха и влиянию автотранспорта.

Указанные способы воздействия на объекты НГК необходимо учитывать во всем их многообразии. Например, вибрации порождаются не только природными явлениями (землетрясениями, провалами, оседаниями), но и техногенными процессами (работой различных технических устройств, оборудования предприятий, движением транспорта). Это в полной мере относится и к другим способам воздействия: электромагнитные волны; акустические волны; температурное поле; инфразвуковое давление.

При этом величины влияний техногенных воздействий объектов на риск-состояние таксона-участка будем обозначать как  $V_{(i)}$  (где  $i$  – порядковый номер влияния,  $k$  – порядковый номер объекта).

Определим признаки  $F^1_n$  (верхний индекс указывает на вид влияния, нижний – на номер признака):

$F^1_1$  – «статическая нагрузка»;

$F^1_2$  – «вибрация»;

$F^1_3$  – «электромагнитное излучение»;

$F^1_4$  – «акустический шум»;

$F^1_5$  – «тепловое поле»;

$F^1_6$  – «радиационное излучение»;

$F^1_7$  – «инфразвуковое давление»;

$F^1_8$  – «загрязнение воздуха».

Признаки  $F^1_n (n = 1,8)$  определяются и обобщаются экспертами по данным наблюдений и приборных исследований, а затем оцениваются по 100-балльной шкале.

Опыт показал, что из-за совместного использования весьма разнородной информации для единообразия подхода к ее обработке, множество исследуемых объектов целесообразно ограничить четырьмя кластерами.

Для технических воздействий кластеры объектов определим следующим образом (верхний индекс указывает на порядковый номер вида влияния, нижний – на номер кластера):

$C^1_1$  – «слабое воздействие» (0.00÷0.25);

$C^1_2$  – «умеренное воздействие» (0.25÷0.50);

$C^1_3$  – «значительное воздействие» (0.50÷0.75);

$C^1_4$  – «сильное воздействие» (0.75÷1.00).

В скобках в относительных единицах указаны диапазоны воздействий.

В результате для каждого объекта исследуемой территории получим функции, характеризующие степень его принадлежности тому или иному кластеру по техногенному воздействию.

Далее рассмотрим классификацию объектов исследуемой территории по их техническому состоянию. Определим признаки технического состояния объектов  $F^2_n$ :

$F^2_1$  – «состояние фундамента»;

$F^2_2$  – «состояние стен»;

$F^2_3$  – «состояние межэтажных перекрытий»;

$F^2_4$  – «состояние крыши»;

$F^2_5$  – «состояние окон»;

$F^2_6$  – «состояние систем коммуникаций».

Признаки  $F^2_n (n = 1,6)$  также определяются и обобщаются экспертами по данным наблюдений и приборных исследований,



а затем оцениваются также по 100-балльной шкале.

Кластеры определим следующим образом:

$C^2_1$  – «ветхие здания, не подлежащие восстановлению» ( $>0.8$ );

$C^2_2$  – «здания, требующие капитального ремонта» ( $0.6 \div 0.8$ );

$C^2_3$  – «здания, требующие текущего ремонта» ( $0.2 \div 0.6$ );

$C^2_4$  – «здания, находящиеся в хорошем состоянии» ( $<0.2$ ).

Как итог, получим функции принадлежности для объектов исследуемой территории, характеризующие их рисковое состояние в техническом отношении.

Наконец, определим признаки влияния автотранспорта  $V^3_{(k)}$  на риск-состояние таксона-участка:

$F^3_1$  – «вибрации»;

$F^3_2$  – «электромагнитное излучение»;

$F^3_3$  – «акустические шумы»;

$F^3_4$  – «тепловое поле»;

$F^3_5$  – «инфразвуковое давление»;

$F^3_6$  – «загрязнение воздуха».

Кластеры  $C^3_j$  определяются таким же образом, как и кластеры  $C^2_j$ .

Далее предположим, что значения влияний  $V^i_{(k)}$  (где  $i$  – порядковый номер влияния,  $k$  – порядковый номер объекта) объектов на риск-состояние отдельного таксона-участка в пределах каждого из кластеров  $C^i_j$  ( $i = 1, 3; j = 1, 4$ ) распределены по нормальному закону. При этом в качестве математических ожиданий  $a^i_j$  выступают центры кластеров. Также будем полагать, что радиусы  $\phi^i_j$  всех кластеров одинаковы.

Далее процедура выполняется в следующей последовательности.

Находим условные координаты  $\lambda^i_{(k)}$  каждого объекта ( $k$  – порядковый номер объекта) в кластерном пространстве:

$$\lambda^i_{(k)} = \sum_{j=1}^m u^i_{j(k)} \cdot a^i_j, \quad (4)$$

где  $u^i_{j(k)}$  – функции принадлежности для  $k$ -го объекта;  $m$  – количество кластеров (в нашем случае  $m = 4$ ).

Затем определяем минимальное отклонение  $\theta^i_{(k)}$  для  $k$ -го объекта в кластерном пространстве от центров кластеров:

$$\theta^i_{(k)} = \min D^i_{j(k)}; \quad D^i_{j(k)} = \left| \lambda^i_{(k)} - a^i_j \right|, \quad (5)$$

что позволяет определить, какому кластеру принадлежит рассматриваемый объект, и задать функции принадлежности  $\mu^i_{j(k)}$

для  $k$ -го объекта конкретному кластеру по следующим правилам:

Правило 1: «Если  $D^i_{j(k)} < \phi^i_j$ , то  $\mu^i_{j(k)} = 1$ »;

Правило 2: «Если  $D^i_{j(k)} = \phi^i_j$ , то  $\mu^i_{j(k)} = 0.5$ »;

Правило 3: «Если  $D^i_{j(k)} > \phi^i_j$ , то  $\mu^i_{j(k)} = 0$ ».

Затем находим интегральный риск для каждого объекта по его техногенному влиянию на риск-состояние отдельного таксона-участка  $V^1_{(k)}$ :

$$V^1_{(k)} = \sum_{j=1}^4 \lambda^i_{(k)} \mu^i_{j(k)}. \quad (7)$$

Подобным образом оцениваются интегральный риск от технического состояния  $V^2_{(k)}$  объекта и интегральный риск от влияния автотранспорта  $V^3_{(k)}$ .

Суммируя с определенными весовыми коэффициентами интегральные значения всех влияний на риск-состояние таксона-участка, оценим величину техногенного воздействия  $p_4$  для каждого  $k$ -го объекта в относительных единицах:

$$p_4^{(k)} = \sum_{i=1}^3 w^i_4 \cdot V^i_{(k)}. \quad (8)$$

Расчёты для всех остальных параметров ( $p_1, p_2, p_3, p_5$ ), определённых выше, выполняются аналогичным образом. Затем выполняется интегральная оценка всей территории и проводится классификация её таксонов-участков по уровню их безопасности.

В итоге блочная риск-классификация территорий, содержащих НГК, основанная на нечёткой кластеризации, дает возможность выполнять их количественный риск-анализ, что важно при разработке стратегии управления территориальными системами, а также при их освоении и преобразовании.

## Размещение объектов НГК с учётом геодинамических рисков

Рассмотрим модель и алгоритм оптимального размещения объектов НГК с учётом геодинамических рисков, обусловленных воздействием комплекса факторов природного, техногенного и антропогенного происхождения, рассчитанных на основе метода блочной риск-классификации.

Предположим, что на территории НГК планируется размещение множества объектов  $O = \{o_h | h = \overline{1, n}\}$ , и для каждого из таксонов-участков, на которые разбита территория, известна величина его риск-состояния  $S_i (i = \overline{1, n})$ .

Требуется:

1) определить, насколько целесообразно размещение объектов в пределах рассматриваемой территории с точки зрения их безопасности в отношении геодинамических рисков, обусловленных воздействием природными, техногенными и антропогенными факторами;

2) если объекты находятся на опасных участках, необходимо перепланировать их размещение с учетом минимизации геодинамических рисков.

Рассмотрим алгоритм решения этой задачи на примере конкретного объекта  $o_h \in O$ . Определим его положение на рассматриваемой территории как  $U(\rho; \eta)$ , где  $\rho$  – условная долгота;  $\eta$  – условная широта. Координаты конкретного объекта обозначим как  $(\rho_i; \eta_i)$ , если он «точечный». В ином случае его координаты задаются в виде матрицы координат.

Упростим задачу, полагая, что объект является «точечным», располагающимся только на одном участке-таксоне. При этом определено риск-состояние  $S_i$  таксона-участка, величина которого равна  $R_h$  для объекта  $o_h \in O$ . Если величина риска  $R_h \leq R_{reas}$  ( $R_{reas}$  – величина допустимого риска; reasonable – «разумный»), то объект может оставаться на прежнем месте размещения, если  $R_h > R_{reas}$ , то объект  $o_h \in O$  перемещается в другую позицию на рассматриваемой территории. Учтем два обстоятельства:

• на новом месте расположения объекта с координатами  $(\bar{\rho}_i; \bar{\eta}_i)$  должна быть

обеспечена его максимальная безопасность;

• перемещение необходимо производить таким образом, чтобы объект оказался бы на наименьшем расстоянии от предыдущего места расположения, т.е. должно быть выполнено условие минимизации пути перемещения:

$$\begin{cases} L_h = \sqrt{(\rho'_i - \rho_i)^2 + (\eta'_i - \eta_i)^2} \rightarrow \min, \\ R_h \leq R_{reas}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $L_h$  – расстояние между первоначальным и последующим положениями объекта  $o_h$ .

Сам же алгоритм перемещения единичного «точечного» объекта  $o_h \in O$  представляет собой последовательность следующих действий.

1. Выполняется оценка величин риск-состояний для каждого таксона-участка вдоль взаимно-перпендикулярных профилей, на которые разбивается исследуемая территория.

2. Осуществляется проверка уровня безопасности планируемого места расположения объекта с учетом выполнении второго условия (9). Если это условие выполняется, то объект остается на прежнем месте, если нет, то объект перемещается в другое место на территории.

3. Производится выбор безопасного с точки зрения риск-состояний таксона-участка для нового размещения объекта. Этап реализуется в виде следующей последовательности.

3.1. Из всех таксонов-участков выбирается такой таксон-участок  $T_c$ , что выполняются условия  $R_{Tc} \leq R_{reas}$  и  $R_{yc} = \min \|R_{reas}\|$  (где  $\|R_{reas}\|$  – матрица таксонов-участков с допустимыми значениями риска).

3.2. Выполняется проверка занятости таксона-участка каким-либо другим объектом.

3.3. Также должна быть свободна от объектов и некоторая область вокруг выбранного таксона-участка. Если это условие не выполняется, то происходит возврат к п. 3.1 и выбирается следующий по возрастанию значения риска таксон-участок, и вновь последовательно выполняем п. 3.2

и п. 3.3 до тех пор, пока указанное условие не будет выполнено.

3.4. Формируется массив  $\|\tilde{T}_n\|$ , в который включаются таксоны-участки, в которые могут быть перемещены объекты.

4. Выполняется анализ массива  $\|\tilde{T}_n\|$  на предмет определения таксона-участка, находящегося на минимальном расстоянии от предыдущего места расположения объекта.

5. Формируется массив таксонов-участков  $\|\hat{T}_n\|$ , занятых перемещенными объектами, и массив их координат.

После исчерпания множества объектов работа алгоритма завершается, и данные записываются в выходной файл в виде координат новых мест размещения объектов, который затем графически представляется в виде карты-схемы, отражающей *модель оптимального размещения объектов в НГК*.

## Выводы

1. Наблюдающееся истощение действующих месторождений нефти и газа в различных регионах мира, приводит к переносу основной добычи углеводородов туда, где ресурсы еще не разведаны или не разработаны. Поддержанию спроса на углеводороды и их добычи особая роль отводится Арктической зоне Земного шара, где сосредоточены их значительные запасы.

2. Управление рисками геодинамического характера на территориях нефтегазовых комплексов связано с решением четырех основных задач: оценка состояния геологической среды, оценка безопасности территории, риск-классификация состояния объектов и их мониторинг. Перечисленные задачи тесно связаны между собой, требуя для своего решения использование методов математического моделирования.

3. К настоящему времени разработан широкий спектр математических моделей, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих решать различные задачи оценки геодинамического риска. Модели оценки геодинамических рисков подразделяются на детерминированные, вероятностные и модели, основанные на

использовании математического аппарата нечётких множеств.

4. К территориям, значительно неоднородным в тектоническом отношении, как это имеет место в Арктической зоне, применение детерминированных и вероятностных моделей не всегда оправдано по причине неопределенности данных. Это относится к решению задачи риск-классификации территорий Арктической зоны применительно к размещению объектов нефтегазового комплекса. Для её решения целесообразно применение нечётких моделей.

5. При формировании базы правил нечёткого вывода в качестве входных переменных необходимо использовались характеристики геосреды, полученные на основании анализа макросейсмических и других данных по геодинамическим явлениям, а также информация о напряжениях и смещениях, рассчитанных с помощью детерминированных и вероятностных моделей.

6. Новая модель и алгоритм размещения объектов с учетом обеспечения необходимого уровня геодинамической безопасности дают необходимые практические результаты, отличающиеся эффективностью управления развитием территорий, содержащих нефтегазовые комплексы.

7. Метод решения задач управления геодинамическими рисками на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы, позволяет выполнить ранжирование объектов на них по степени уязвимости по отношению к проявлению геодинамических опасностей, а также провести ранжирование самих геодинамических процессов по степени их опасности в пределах оцениваемой территории. Подобный подход даёт возможность принимать более качественные управленческие решения по сравнению с традиционными процедурами при обеспечении безопасности нефтегазовых комплексов.

**Список литературы:**

1. Lindholt L., Glomsrød S. / Center for International Climate and Environmental Research. Discussion Papers No. 645. URL: <http://ideas.repec.org/s/ssb/dispap.html>. Oslo: Statistics Norway, Research Department, 2011. (Дата обращения 7.03.2021).
2. Ананьин И.В., Фаддеев А.О. Численное моделирование напряженного состояния тектонических нарушений в земной коре Центральной части Восточно-Европейской платформы (на примере Московско-Рязано-Саратовского авлакогена) / Материалы Международной конференции «Геодинамика и геоэкология». Архангельск: Ин-т экологических проблем Севера УрО РАН, 1999. – С. 11-14.
3. Ананьин И.В., Фаддеев А.О., Сим Л.А. Тектонические напряжения в земной коре центральной части Восточно-Европейской платформы (по результатам математического моделирования и структурно-геоморфологическим данным) / В сб.: Проблемы сейсмичности Восточно-Европейской платформы. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 2000. – С. 3-18.
4. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, Изд. дом ИНФРА-М, 2009. – 370 с.
5. Абрамова А.В., Бондарь К.М., Данилов Р.М., Минаев В.А., Павлова С.А., Попов А.Н., Фаддеев А.О. Моделирование геодинамических рисков в чрезвычайных ситуациях: монография / Под ред. К.М. Бондаря, В.А. Минаева, А.О. Фаддеева. Хабаровск: ДВЮИ МВД России, 2014. – 124 с.
6. Абрамова А.В. Математические модели оценки геодинамического риска на территории Армении // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. 2014. Вып. 4 (56). Электронный ресурс: <http://ipb.mos.ru/ttb/2014-4>. (Дата обращения 7.03.2021).
7. Минаев В.А., Топольский Н.Г., Фаддеев А.О., Бондарь К.М., Мокшанцев А.В. Геодинамические риски и строительство. Математические модели. М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 208 с.
8. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Пылькин А.Н., Бондарь К.М., Кираковский В.В. Гибридная ANFIS-сеть как инструмент снижения рисков при разработке проектов застройки территории / Материалы XXIII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2014». М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2014. – С. 116-121.
9. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Бондарь К.М., Сычев М.П., Видов С.В., Кираковский В.В., Кузьменко Н.А., Попов А.Н. Математическое моделирование геодинамических рисков: оценки и перспективы / Под ред. В.А. Минаева, А.О. Фаддеева, К.М. Бондаря. Хабаровск: Издательство Дальневосточного юридического института МВД России, 2015. – 212 с.
10. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Кузьменко Н.А. Моделирование и оценка геодинамических рисков. М.: РТСофт – Космоскоп, 2017. – 256 с.
11. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: Учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

**References:**

1. Lindholt L., Glomsrød S. / Center for International Climate and Environmental Research. Discussion Papers No. 645. URL: <http://ideas.repec.org/s/ssb/dispap.html>. Oslo: Statistics Norway, Research Department, 2011. (Accessed 7.03.2021).
2. Anan'in I. V., Faddeev A. O. Numerical Modeling of the Tectonic Disturbances Stress State in the Earth's Crust of the Central Part of the East European Platform (on the Example of the Moscow-Ryazan-Saratov Aulacogen) / Proceedings of the International Conference "Geodynamics and Geoecology". Arkhangelsk: Institute of Environmental Problems of the North of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1999. – Pp. 11-14.
3. Anan'in I. V., Faddeev A. O., Sim L. A. Tectonic Stresses in the Earth's Crust of the Central Part of the East European Platform (Results of Mathematical Modeling and Structural and Geomorphological Data) / In the Collection: Problems of Seismicity of the East European Platform. M.: Joint Institute of Earth Physics RAS Publishing House, 2000. - Pp. 3-18.
4. Minaev V. A., Faddeev A. O. Geoeological Risk Assessments. Modeling the Safety of Tourist and Recreational Territories. Moscow: Finance and Statistics, INFRA-M Publishing House, 2009. – 370 p.
5. Abramova A.V., Bondar K. M., Danilov R. M., Minaev V. A., Pavlova S. A., Popov A. N., Faddeev A. O. Modeling of Geodynamic Risks in Emergency Situations: Monography / Edited by K. M. Bondar, V. A. Minaev and A. O. Faddeev. Khabarovsk: Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2014. - 124 p.
6. Abramova A.V. Mathematical Models of Geodynamic Risk Assessment on the Territory of Armenia. 2014. Issue 4 (56). URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/2014-4>. (Accessed 7.03.2021).
7. Minaev V. A., Topolsky N. G., Faddeev A. O., Bondar K. M., Mokshantsev A.V. Geodynamic Risks and Construction. Mathematical Models. M.: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. – 208 p.
8. Minaev V. A., Faddeev A. O., Pyl'kin A. N., Bondar K. M., Kirakovsky V. V. Hybrid ANFIS-network as a Risk

- Reduction Tool in the Development of Territory Development Projects / Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference "Security Systems-2014". M.: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2014. – Pp. 116-121.
9. Minaev V. A., Faddeev A. O., Bondar K. M., Sychev M. P., Vidov S. V., Kirakovsky V. V., Kuzmenko N. A., Popov A. N. Mathematical Modeling of Geodynamic Risks: Estimates and Prospects / Edited by V. A. Minaev, A. O. Faddeev, K. M. Bondar. Khabarovsk: Publishing House of the Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2015. – 212 p.
  10. Minaev V. A., Faddeev A. O., Kuzmenko N. A. Modeling and Assessment of Geodynamic Risks. M.: RTSoft-Kosmoskop, 2017. – 256 p.
  11. Yarushkina N. G. Fundamentals of the Theory of Fuzzy and Hybrid Systems: Textbook. M.: Finance and Statistics, 2004. – 320 p.

UDC 551.467: 551.58

DOI: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76

**Citing:**

A.B. Timofeeva, M.V. Sharatunova. Multiyear variability of the fast ice thickness in the Laptev Sea according to the polar station data. 2021; N° 12: p.p 62-76. (In Russ.). 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76.

Received: 29.03.2021

Approved: 26.04.2021

Published: 28.04.2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

## МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПРИПАЯ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ

А.Б. Тимофеева<sup>1</sup> , М.В. Шаратунова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГНЦРФ ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия; tianna@aari.ru, mvsh@aari.ru

**Аннотация:** Проанализированы ряды данных по толщине припайного льда и приземной температуре воздуха сети наземных полярных станций Росгидромета в море Лаптевых. В ходе анализа выполнено сравнение значений характеристик за последний 15-летний период (2005-2020 гг.) с наблюдениями, произведенными до 2004 года, и выявлены изменения, соответствующие новым климатическим условиям. За последние 15 лет средние толщины на момент максимального нарастания (максимальная толщина льда) уменьшились на 6% в среднем по морю. Процесс нарастания льда стал происходить значительно медленнее, переход из одной возрастной градации льда в другую наблюдается на 1-2

декады позднее. Температура воздуха на рассматриваемых станциях в среднем на 3°C была выше чем в предыдущем периоде. Наибольшие изменения наблюдаются в осенние месяцы (октябре, ноябре) и в апреле. Сумма градусо-дней мороза (СГДМ), осредненная по станциям моря Лаптевых, уменьшилась на 15%; все 15 последних зимних сезонов могут быть отнесены к мягким. Выявлено, что уменьшение СГДМ хорошо согласуется с уменьшением среднесезонной (средней за ноябрь-май) толщины льда по станциям. Этот показатель представляется более информативным, чем максимальная толщина льда для оценки изменений. При осреднении по всем станциям выявлено снижение среднесезонной толщины льда на 10% за последние 15 лет.

**Ключевые слова:** толщина льда, припай, полярные станции, ледовые условия, море Лаптевых, сумма градусо-дней мороза

## MULTIYEAR VARIABILITY OF THE FAST ICE THICKNESS IN THE LAPTEV SEA ACCORDING TO THE POLAR STATION DATA

A.B. TIMOFEEVA<sup>1</sup> , M.V. SHARATUNOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SSCRF AARI, Saint-Petersburg, Russia; tianna@aari.ru, mvsh@aari.ru

**Abstract:** The series of data on the fast ice thickness and the surface air temperature at the Roshydromet land-based polar stations in the Laptev Sea are analyzed. Observations for the last 15-year period (2005-2020) are compared to observations prior to 2004, and the changes corresponding to the new climatic conditions are revealed. Over the past 15 years ice thicknesses during the period of maximum ice growth (maximum ice thickness) have decreased by 6% on average. The ice growth process has become much slower, transition between the sequential stages of ice development is observed 1-2 ten-days periods later. The surface air temperature at the considered stations was on average 3°C higher than for the previous period. The most significant changes are observed in the autumn months (October, November) and in April. The cumulative sum of the degree-day of frost averaged for the Laptev Sea stations, decreased by 15%; all 15 recent winter seasons can be classified as mild. It was revealed that the decrease of the cumulative sum of degree-day of frost is in a good agreement with the decrease of the mean-seasonal ice thickness (averaged for November-May) at the stations. This indicator seems to be more informative than the maximum ice thickness for estimation of the changes. Averaging over all stations revealed a 10% decrease of the mean-seasonal ice thickness during the past 15 years.

**Keywords:** ice thickness, fast ice, polar stations, ice conditions, Laptev Sea, sum of frost degree-days

## Введение

Процесс потепления в Арктике устойчиво развивается. Одним из проявлений этого процесса является быстрое сокращение площади арктического морского льда во все сезоны года [1-3]. Наиболее сильное сокращение площади ледяного покрова наблюдается в сентябре, в конце сезона таяния [4-6]. Потепление существенно сказывается на всем режиме развития ледяного покрова – изменяется начало сроков ледообразования [7], таяния и других режимных характеристик в российских арктических морях [8]. В ряде работ рассматриваются климатические колебания в Арктике с выделяющимися приблизительно 30-35-летними периодами «относительного похолодания и потепления» [9, 10]. Однако ряд авторов выделяет существенное усиление процессов потепления и уменьшения ледовитости с 2005 г. [11-13], отмечая, что, помимо изменения атмосферных процессов, термохалинная структура вод и циркуляции Северного Ледовитого океана (СЛО) перешли в новую фазу климатических изменений [15].

Толщина морского льда является важной характеристикой, а ее колебания – чувствительным индикатором изменения климата. Для оценки толщин льда используются как непосредственно контактные, так и разнообразные дистанционные измерения, в том числе выполненные с помощью гидролокаторов на подводных лодках [14, 15], электро-магнитное зондирование специальным оборудованием [16, 17] и альтиметрические наблюдения искусственных спутников Земли (ИСЗ). Большинство исследований толщины морского льда базируется на численном моделировании и информации полученной с помощью спутниковой радиолокационной альтиметрии [18-21]. Результаты всех исследований согласуются с утверждением, что морской лед в Арктике становится тоньше. Об этом же свидетельствуют косвенные оценки изменения толщины льда по изменениям в возрастном составе ледяного покрова [22]. Однако оценки на основе спутникового дистанционного зондирования и по данным численного моделирования характеризуются значи-

тельной неопределенностью и требуют валидации с контактными измерениями. Подобные сравнения выполнялись, например, по результатам ледовых исследований в экспедиции «Трансарктика» [23]. Но сравнение и верификация с контактными измерениями межгодовых изменений затруднительны из-за их эпизодичности и локальности.

В связи с этим измерения толщины на полярных станциях представляют существенный интерес, поскольку имеют длинный ряд наблюдений, собранный в одних режимных условиях из года в год. Это позволяет оценить многолетние изменения толщины льда, основываясь на достаточно точных контактных измерениях.

## Материалы и методы

В работе использовались данные по приземной температуре воздуха и толщине припайного льда, полученные на ряде наземных полярных станций сети Росгидромета.

Регулярные измерения толщины льда на полярных станциях начались в середине 30-х гг. XX века, часть которых была закрыта в течение 90-х гг. Для исследования были отобраны полярные станции моря Лаптевых (рис. 1) с примерно одинаковой длительностью наблюдений: о. Котельный, б. Тикси, м. Челюскин, пр. Санникова, Кигилях, (станцию м. Челюскин обычно относят к Карскому морю, однако, поскольку в западной части моря Лаптевых нет другой действующей полярной станции с длинным рядом наблюдений, она включена в настоящее исследование).

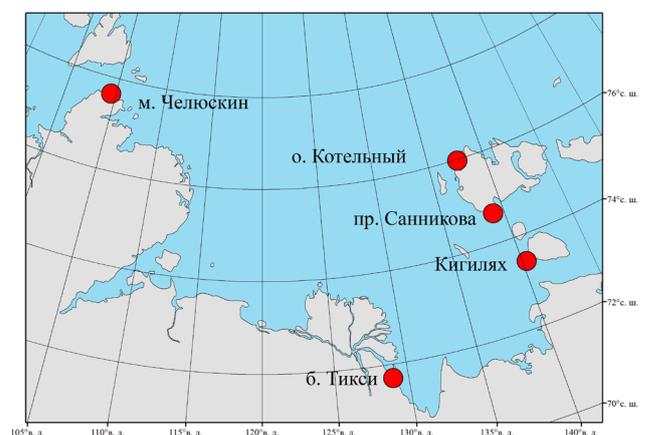
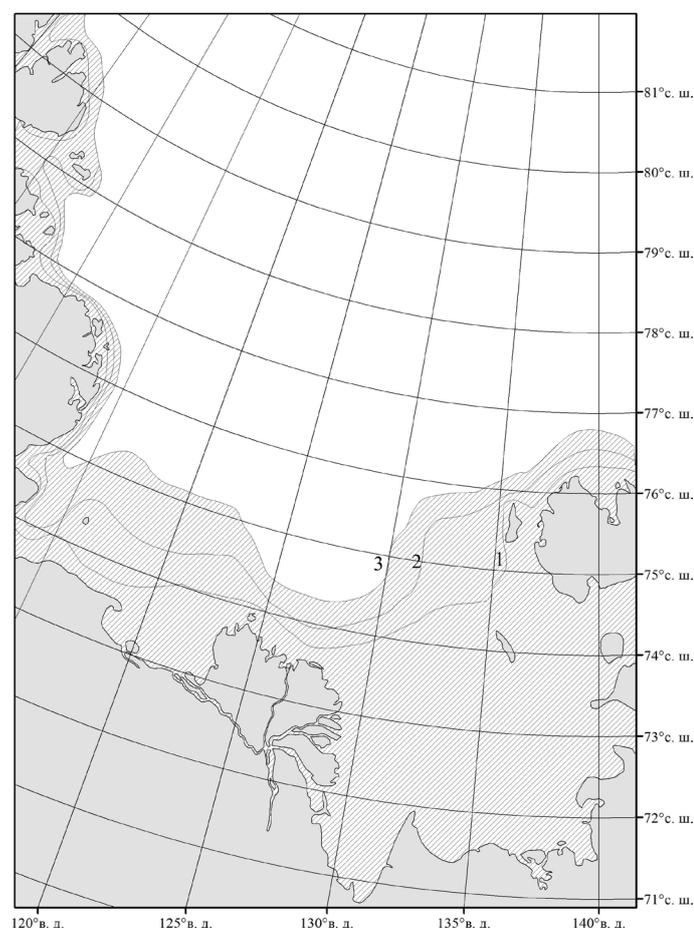


Рисунок 1 – Схема расположения полярных станций.

Все отобранные станции являются береговыми и производят измерения на припае, толщина которого обычно больше толщины дрейфующего льда [24, 25]. Припай формируется в зимний период и своего максимального развития достигает к марту-апрелю. Наиболее обширную площадь припай занимает в восточной мелководной части моря [26]. В западной части припай довольно узок, формируется вдоль побережья о-вов Северной Земли. Границы типового распространения припая в апреле представлены на рисунке 2. В летний период в подавляющем большинстве случаев припай полностью разрушается. Отмечены несколько случаев частичного сохранения припая после сезона таяния в годы с наиболее суровыми метеорологическими и ледовыми условиями.

Данные по толщине льда представляют собой результаты измерений в соответствии с Наставлением гидромете-



**Рисунок 2 – Характерное распространение припая в море Лаптевых в апреле (1 - минимальное положение; 2 - среднее положение; 3 - максимальное положение) [26].**

орологическим станциям и постам [27]. Измерения толщины производятся в постоянной точке (ПТ). Выбор ПТ осуществляется заблаговременно, с первых дней нового осеннего ледообразования. Припай в ПТ должен быть ровным, равномерно заснеженным и в целом типичным для объекта. ПТ должна находиться неподалеку от берега, но на глубине не менее 2 метров. Выход на припайный морской лед для измерений разрешается по достижении им толщины 12 сантиметров. По соображениям безопасности, вначале ПТ может быть временно организована вблизи берега на дополнительном участке. Затем, когда выход на припай становится достаточно безопасным, ПТ переносится на более удаленный от берега основной участок.

Бурение льда выполняется специальным буром, модификации которого изменялись и совершенствовались с течением времени. Современным техническим средством для бурения льда являются механические буры с компактными бензиновыми двигателями или электрические буры.

Первая пробуренная лунка в выбранном месте ПТ маркируется вмораживаемой вехой, в радиусе 10-15 метров от которой выполняются все последующие измерения. Круг, очерченный этим радиусом, собственно и является ПТ. Каждая вновь пробуренная лунка после измерения засыпается ледяной крошкой и снегом, но так, чтобы она оставалась приметной во избежание попадания в старую лунку при дальнейших измерениях. В состав наблюдений в ПТ входит измерение толщины и превышения над поверхностью воды (или глубины погружения) припайного льда, не менее чем в двух пробуриваемых лунках, а также высоты и плотности снежного покрова.

Измерение толщины льда осуществляется с использованием ледомерной рейки. Для определения среднего значения толщины припайного льда в ПТ можно ограничиться двумя лунками, если толщины в них различаются менее чем на 5 см. В противном случае бурится третья, а при необходимости и четвертая лунки.



Резко отличающиеся значения толщины льда обязательно фиксируются, но в расчет не принимаются. Высоту снежного покрова на льду измеряют специальными снегомерными рейками, а плотность снега — весовым снегомером.

Дискретность проведения измерений ежелекандная. Если по каким-либо причинам не удалось выполнить измерения в установленный день, они проводятся в ближайшие сутки с благоприятными условиями для работы.

Архив ААНИИ содержит результаты измерений толщины льда за каждую декаду месяца, преимущественно с октября (иногда с сентября) по июль. В рядах наблюдений есть пропуски информации, причиной которых могло являться отсутствие наблюдений в отдельные годы, проблемы с поступлением информации по каналам связи, наличие человеческого фактора.

В настоящем исследовании данные по толщине за сентябрь и октябрь во внимание не принимались по причине большого количества пропусков по годам, особенно в первые декады (из-за невозможности проводить измерения до становления припая достаточной толщины). Для уменьшения ошибок в расчетах значения наблюдений, вызывающие сомнения (например, правдоподобность экстремальных значений), проверялись сравнением с информацией соседних станций (с ледовыми и метеоусловиями), и иногда при несоответствии исключались.

Также исключались случаи, не соответствующие задачам исследования, когда наблюдались нарушения в наблюдении за сезонным ходом нарастания толщины льда. Резкие скачки толщины в сезонном ходе, происходящие за одну декаду (т.е. значительно превышающие средние значения прироста толщины за одну декаду в эти сроки), трактовались как «подсов» льда в результате динамических процессов и торошения. Все такие случаи из расчетов исключались, как и результаты наблюдений после разрушения припая в ПТ и последующей смены площадки (обычно этот факт фиксируется в примечаниях), как нехарактерные.

В отдельные годы на станциях, например, на о. Котельный в сезон 1962-1963 гг., припай не разрушился за лето, и осенние измерения толщины проводились на остаточном льду. Такие значения также были исключены из расчетов как не соответствующие задаче оценки процесса нарастания толщины льда. Данные по температуре воздуха, полученные на тех же станциях для исследования, использовались осредненные за месяц.

Для анализа были взяты ряды данных по толщине с ноября по июнь по 2020 г. включительно, начиная с конца 30-х годов, с начала регулярных измерений. Год начала измерений может различаться по станциям, что отмечено в таблице 1.

**Таблица 1**  
**Общая информация о рядах наблюдений на полярных станциях моря Лаптевых.**

Пункт наблюдений	Характеристика	Год начала	Число лет набл.	Пропуски данных, %
м. Челюскин	Температура (среднемесячная)	1933	88	0
	Толщина льда (ежелекандная)	1937/1938	83	7
Тикси	Температура (среднемесячная)	1936	85	0
	Толщина льда (ежелекандная)	1940/1941	81	3
о. Котельный	Температура (среднемесячная)	1936	85	0
	Толщина льда (ежелекандная)	1939/1940	81	2
пр.Санникова	Температура (среднемесячная)	1942	79	1
	Толщина льда (ежелекандная)	1942/1943	78	4
Кигилях	Температура (среднемесячная)	1939	82	1
	Толщина льда (ежелекандная)	1939/1940	81	2

## Результаты

Изменения приповерхностной температуры воздуха над покрытой льдами в зимний период акваторией Северного Ледовитого Океана (СЛО) характеризуются повышением зимних температур после 1998 г. и ростом летних температур после 1996 г. [10, 11]. Потепление привело к сокращению площади арктического

морского ледяного покрова в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким ее минимумом в сентябре 2012 г. Некоторые авторы [11-13] выделяют 2005 год как начало нового состояния климатической системы, с существенными изменениями как в океанических процессах, так и в атмосферных, в том числе резкое увеличение положительной аномалии температуры воздуха (рисунок 3) и стремительного сокращения ледяного покрова в последние 15 лет.

Другие характеристики ледяного покрова, такие как толщина, сплоченность, положение границ многолетних льдов и др., были также подвержены климатическим изменениям. По этой причине в данной работе было решено сравнить данные по толщине льда и температуре, полученные на полярных станциях моря Лаптевых за последний 15-летний период (2005-2020 гг.) с наблюдениями, произведенными до 2004 года.

В осенний период ледообразование происходит на чистой воде, акватория свободна ото льда, поскольку в подавляющем большинстве случаев припай полностью разрушается за летний период [24]. Формирование припая начинается при толщине молодого льда 6-8 см. Толщина льда постепенно нарастает, достигая максимальных значений в апреле-мае. Максимальная толщина льда, за-

фиксированная в каждом годовом цикле, используется для дальнейшего анализа. На рисунке 4 представлена межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по рассматриваемым станциям.

Как видно на графиках, межгодовая изменчивость толщины льда может значительно варьировать от года к году. Межгодовой ход на станции м. Челюскин несколько отличается от других станций, поскольку в нем более четко прослеживаются долгопериодные колебания 30-35 лет, со значительным увеличением толщины льда в 60-80е годы. Это вполне соответствует выявленным ранее климатическим колебаниям [9, 10] и особенностям развития гидрометеорологических процессов в этой части моря, в том числе связь с режимными особенностями Карского моря [24, 25, 29].

Основные статистические характеристики по максимальной толщине льда за весь ряд наблюдений, а также отдельно за последний 15-летний период приведены в таблице 2. Средние толщины на момент максимального нарастания и по станциям в восточной части моря колеблются в пределах 209-221 см. Для станции м. Челюскин средняя толщина несколько ниже, и составляет 192 см. На всех станциях толщина льда имеет значительные амплитуды колебаний (55-92 см).

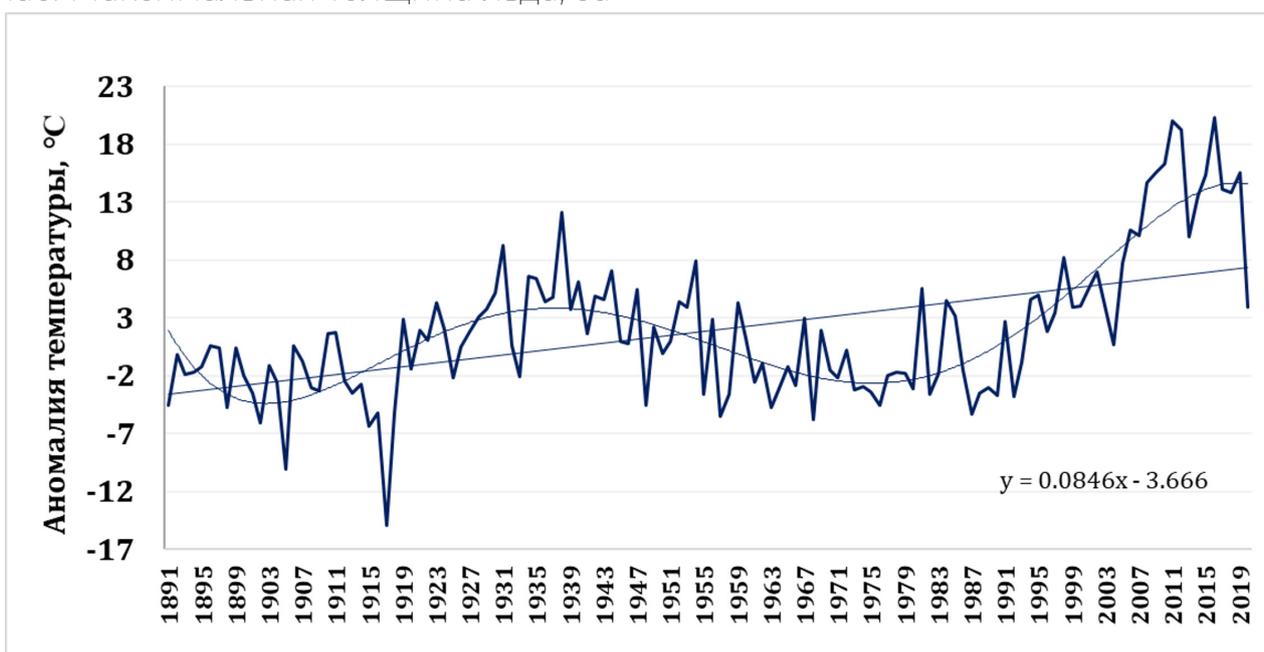


Рисунок 3 – Межгодовая изменчивость аномалии осредненной температуры воздуха в широтной зоне 70-85° с.ш. (аппроксимация аномалий выполнена полиномом 6-й степени.)

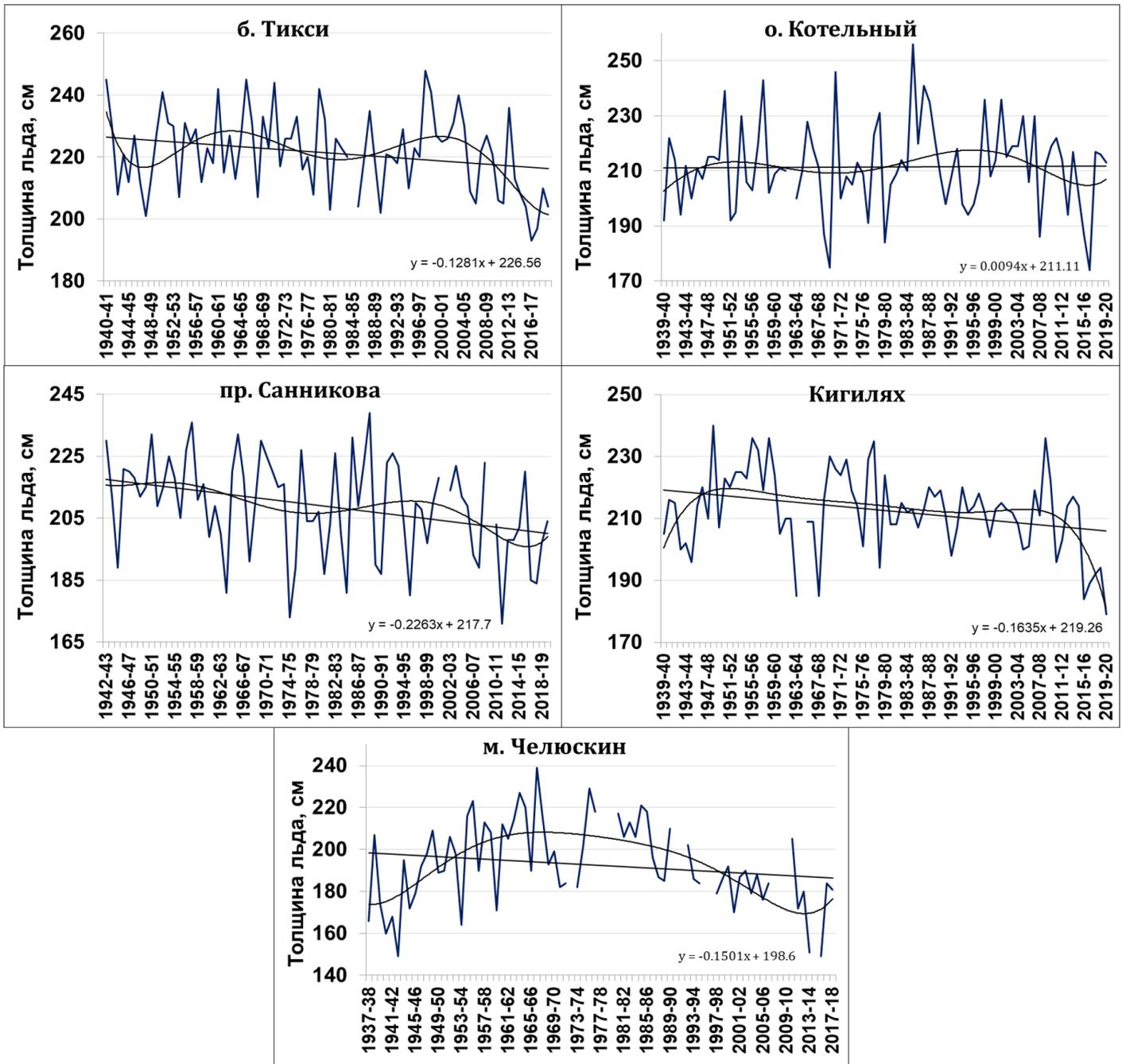


Рисунок 4 – Межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по измерениям на полярных станциях (аппроксимация выполнена полиномом 6-й степени).

Изменения толщины льда имеет выраженный отрицательный тренд (кроме станции о. Котельный). Все абсолютные максимумы толщины льда на каждой из рассматриваемых станций были зафиксированы в период до 2005 г. Наибольшая толщина была отмечена на станции о. Котельный зимой 1984/1985 гг. (256 см). Все абсолютные минимумы толщины

льда зафиксированы в последний 15-летний период (таблица 2). Средние толщины на момент максимального нарастания за последние 15 лет уменьшились на всех станциях на 1-11%. Наименьшие изменения средней толщины выявлены на станции о. Котельный (-3 см), наибольшие на станции м. Челюскин (-21 см).

Таблица 2

Статистические характеристики толщины льда на полярных станциях моря Лаптевых.

	м.Челюскин (с 1937/1938)	б.Тикси (с 1940/1941)	о. Котельный (с 1939/1940)	пр.Санникова (с 1942/1943)	Кигилях (с 1939/1940)
Весь ряд наблюдений					
Среднее, см	192	221	212	209	213
Максимум, см	239	248	256	239	240
Минимум, см	147	193	174	171	179
Размах, см	92	55	82	68	61
СКО	21	12	16	16	13
Период по сезон 2004/2005					
Среднее, см	196	224	212	211	214
Максимум, см	239	248	256	239	240
Минимум, см	149	201	174	173	185
Размах, см	90	47	82	66	55
СКО	19	11	16	15	15
Период с сезона 2005/2006 по сезон 2019/2020					
Среднее, см	175	211	209	198	204
Максимум, см	205	236	230	223	236
Минимум, см	147	193	174	171	179
Размах, см	58	43	56	52	57
СКО	17	11	15	13	11
Изменение средний толщины за последние 15 лет					
Разница, см	-21	-13	-3	-13	-10

На рисунке 5 представлены графики нарастания толщины льда (подекадно) и годовой ход среднемесячной температуры воздуха: с года начала наблюдений по станциям до 2004 года и за последние 15 лет. Очевидно, что в последние 15 лет нарастание толщины происходит значительно медленнее на всех станциях. Так, достижение толщины, например, 100 см, происходит на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений (до 2004 г.).

Только на станции о. Котельный в последние 15 лет к концу апреля-мая толщина льда приближается к среднепогодным значениям. Разница толщины

льда за каждую декаду между исследуемыми временными периодами представлена в таблице 3. В целом, стоит отметить, что разброс изменений в рамках сезонного нарастания льда может быть довольно ровным по всем декадам, как на станции б. Тикси (7-13 см), или иметь большую амплитуду значений, как на станции о. Котельный (3-32 см). При этом более значительные изменения на большинстве станций наблюдаются в начале периода нарастания и уменьшаются, начиная с января. Наибольшие изменения в течение всего сезона показывает станция м. Челюскин.

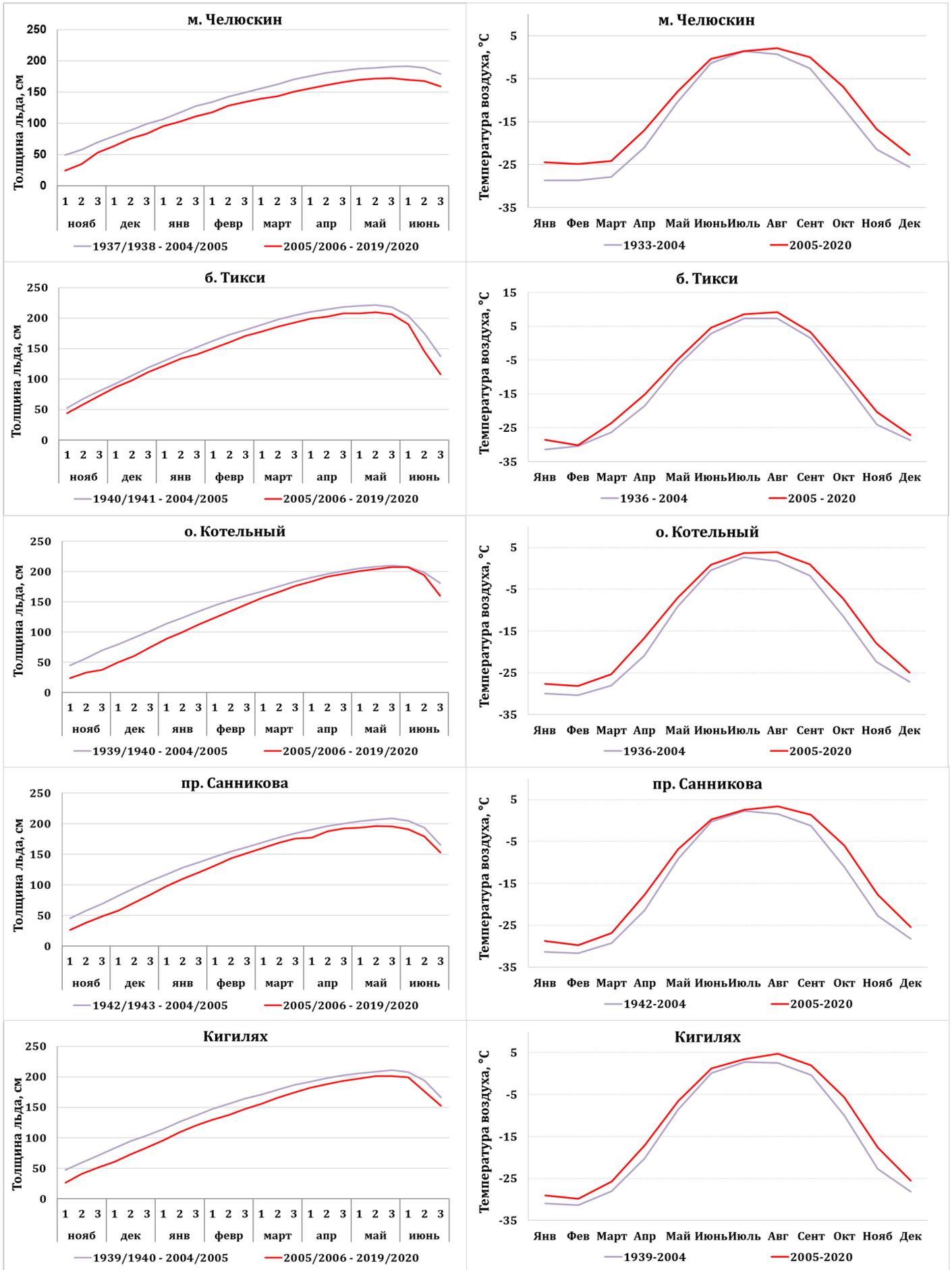


Рисунок 5 – Подекадное нарастание толщины льда (слева) и среднемесячная температура воздуха (справа), осредненные за периоды: начало наблюдений - 2004 г. и 2005 – 2020 гг.

Таблица 3

Ежедекадные изменения средней толщины льда за последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (см).

месяц	ноябрь			декабрь			январь			февраль			март			апрель			май			Среднее за сезон
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
м.Челюскин	-25	-23	-17	-16	-13	-16	-11	-15	-16	-17	-15	-15	-16	-19	-19	-20	-20	-19	-18	-17	-18	-17
б.Тикси	-9	-9	-8	-6	-8	-7	-7	-7	-12	-13	-13	-10	-11	-12	-12	-11	-12	-10	-13	-12	-12	-10
о.Котельный	-21	-23	-32	-29	-30	-27	-25	-23	-22	-21	-18	-14	-11	-9	-7	-7	-4	-4	-4	-4	-3	-16
пр.Санникова	-19	-20	-21	-24	-24	-23	-19	-18	-16	-14	-11	-10	-10	-8	-9	-13	-9	-8	-10	-10	-13	-15
Кигилях	-21	-18	-20	-23	-22	-20	-18	-17	-17	-17	-19	-17	-15	-13	-12	-10	-9	-9	-9	-8	-10	-15
Среднее	-19	-19	-20	-20	-19	-19	-16	-16	-17	-16	-15	-13	-13	-12	-12	-12	-11	-10	-11	-10	-11	-15

На графиках сезонного хода температуры воздуха (рисунок 5) заметно, что в последние 15 лет среднемесячная температура в течение всего годового цикла была на 0,1-5,1°C выше средней за предыдущий период до 2004 г. Значения разницы среднемесячной температуры между исследуемыми периодами приведены в таблице 4. Наибольшие изменения тем-

пературы на 3,7-5,1°C наблюдаются преимущественно в осенние месяцы (октябре, ноябре), а также в апреле. Наименьшие - с увеличением температуры на 0,1-2,4°C, с мая по август. Для осенне-зимнего сезона характерно повышение температуры на 1,6-3,4°C, кроме станции м. Челюскин, где с января по апрель повышение среднемесячной температуры составляет 3,7-4,2°C.

Таблица 4

Изменения среднемесячной температуры воздуха за последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (°C).

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Среднее за год
м.Челюскин	4.2	3.8	3.7	4.1	2.4	1.0	0.1	1.3	2.6	5.0	4.7	2.8	3.0
б.Тикси	2.9	0.1	2.7	3.4	1.7	1.7	1.2	1.9	1.6	2.6	3.7	1.4	2.9
о.Котельный	2.4	-2.2	2.6	4.1	2.1	1.3	1.0	2.1	2.7	4.2	4.4	2.3	2.6
пр.Санникова	2.6	1.9	2.4	3.7	2.3	0.5	0.3	1.8	2.7	5.0	5.0	2.8	2.6
Кигилях	2.0	1.5	2.3	3.1	2.1	1.1	0.8	2.2	2.4	4.4	5.1	2.6	2.0
Среднее	2.8	1.9	2.7	3.7	2.1	1.1	0.7	1.9	2.4	4.2	4.6	2.4	2.6

Для оценки суровости зимнего периода часто используется показатель СГДМ. В работе [29] были определены критерии и осуществлен расчет интервалов критериев суровости зим (мягкой, умеренной, суровой) по СГДМ для станций м. Челюскин, о. Котельный и б. Тикси до 2015 г. К умеренным отнесены зимы с СГДМ в интервале от значения, соответствующего «среднее плюс 20 % амплитуды» до значения «сред-

нее минус 20 % амплитуды», из расчета исключены самая холодная и самая теплая зимы, как наименее характерные.

Нами был повторен расчет по описанной в пособии методике с продлением рядов наблюдений за температурой до 2020 г. и выделением новых интервалов СГДМ для определения типов зим по суровости. В таблице 5 представлены результаты расчетов.

Таблица 5

Средние значения СГДМ и повторяемость суровых (С), умеренных (У) и мягких (М) зим за исследуемые периоды времени.

ГМС	СГДМ, °С		Повторяемость типов зим, %					
	До 2004г.	2005-2020гг.	До 2004г.			2005-2020гг.		
	Сред.	Сред.	С	У	М	С	У	М
Челюскин, 83г., (с 1937/1938)	5445	4436	19	55	7	0	20	80
Тикси, 81г., (с 1940/1941)	5342	4820	20	53	14	0	47	53
о. Котельный, 81г., (с 1939/1940)	5509	4732	21	60	4	0	20	80
Санникова, 78л., (с 1942/1943)	5596	4812	21	55	5	0	7	93
Кигилях 81г., (с 1939/1940)	5377	4510	21	57	4	0	0	100
Среднее по морю, 78л., (с 1942/1943)	5468	4662	22	56	3	0	0	100

Анализ данных показывает, что за последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом, СГДМ, осредненная по всем станциям моря Лаптевых, уменьшилась на  $806^{\circ}\text{C}$ , что составляет 15%. При этом наибольшие изменения СГДМ наблюдаются на станции м. Челюскин (-19%), а наименьшие на станции б. Тикси (-10%). За последнее 15 лет ни на одной из станций не наблюдалось зимы, отвечающей критериям суровой. На долю умеренных зим приходится от 7% (пр. Санникова) до

47% (б. Тикси). Количество мягких зим выросло на 39-96% по станциям и составило 53% (б. Тикси) - 100% (Кигилях). Расчеты показывают, что при осреднении значений по рассматриваемым станциям, все 15 последних зимних сезонов могут быть отнесены к мягким. На рисунке 6 представлены изменения СГДМ, а также средней за сезон (с ноября по май) толщины льда и толщины льда на момент максимального нарастания за последний 15-летний период.

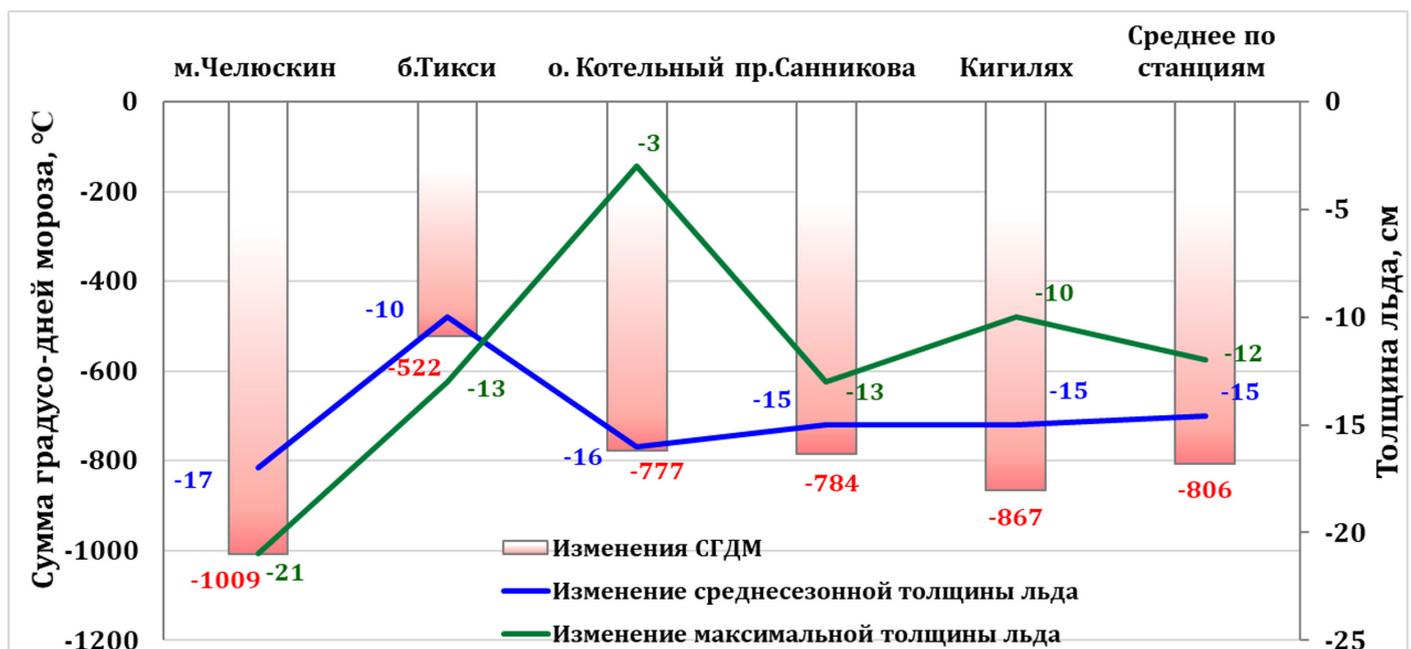


Рисунок 6 – Изменения СГДМ, средней за сезон и на момент максимального нарастания толщины льда по станциям моря Лаптевых за последний 15-летний период.

Как видно на рисунке 6, уменьшение СГДМ хорошо согласуется с уменьшением среднесезонной толщины льда по станциям. Наибольшие изменения обоих характеристик наблюдаются на станции м. Челюскин, наименьшие на станции б. Тикси. При этом согласованность СГДМ с максимальной толщиной льда значительно меньше. Особенно резко выделяются значения станции о. Котельный, где при значительном уменьшении СГДМ и среднесезонной толщины льда, максимальная толщина практически не изменилась за последнее аномально теплое 15-летие.

Связь СГДМ с толщиной льда изучалась многими авторами [30, 31]. Проведенный корреляционный анализ (результаты представлены в таблице 6) длинных 78-83-летних рядов показывает более тесную связь СГДМ со среднесезонной толщиной льда. Эта связь значительно выше, чем связь с максимальной толщиной, на большинстве станций. При осреднении значений по всему морю (по всем станциям) коэффициент корреляции составляет 0,6-0,7 и является значимым для 78-летнего ряда наблюдений.

На рисунке 7 приведен осредненный по всем исследуемым станциям межгодовой ход повторяемости суровых, умеренных и мягких зим с соответствующими значениями СГДМ и график многолетней изменчивости среднесезонной толщины

Таблица 6

Коэффициенты корреляции СГДМ с среднесезонной и максимальной толщиной льда по станциям моря Лаптевых.

Станция	СГДМ/Среднесезонная толщина льда	СГДМ/Максимальная толщина льда
м.Челюскин	0,6	0,4
б.Тикси	0,5	0,6
о.Котельный	0,4	0,3
пр.Санникова	0,5	0,3
Кигилях	0,4	0,2
Среднее по морю	0,7	0,6

льда (аппроксимация полиномом 6 степени). В межгодовом ходе хорошо выделяется период 1960х-1980х с высокой повторяемостью суровых зим и большими толщинами льда. Период потепления Арктики 1930х-1940х [9, 10, 32] также хорошо распознается по повышению повторяемости мягких и умеренных зим, а также пониженной толщиной льда до 1950-х годов. Последний 15-летний период резко выделяется высокой повторяемостью мягких зим и значительным снижением среднесезонной толщины льда.

**Обсуждение результатов и заключение**

Изучение толщины льда на полярных станциях не может в полной мере характеризовать динамику толщины ледяного покрова во всей Арктике, поскольку

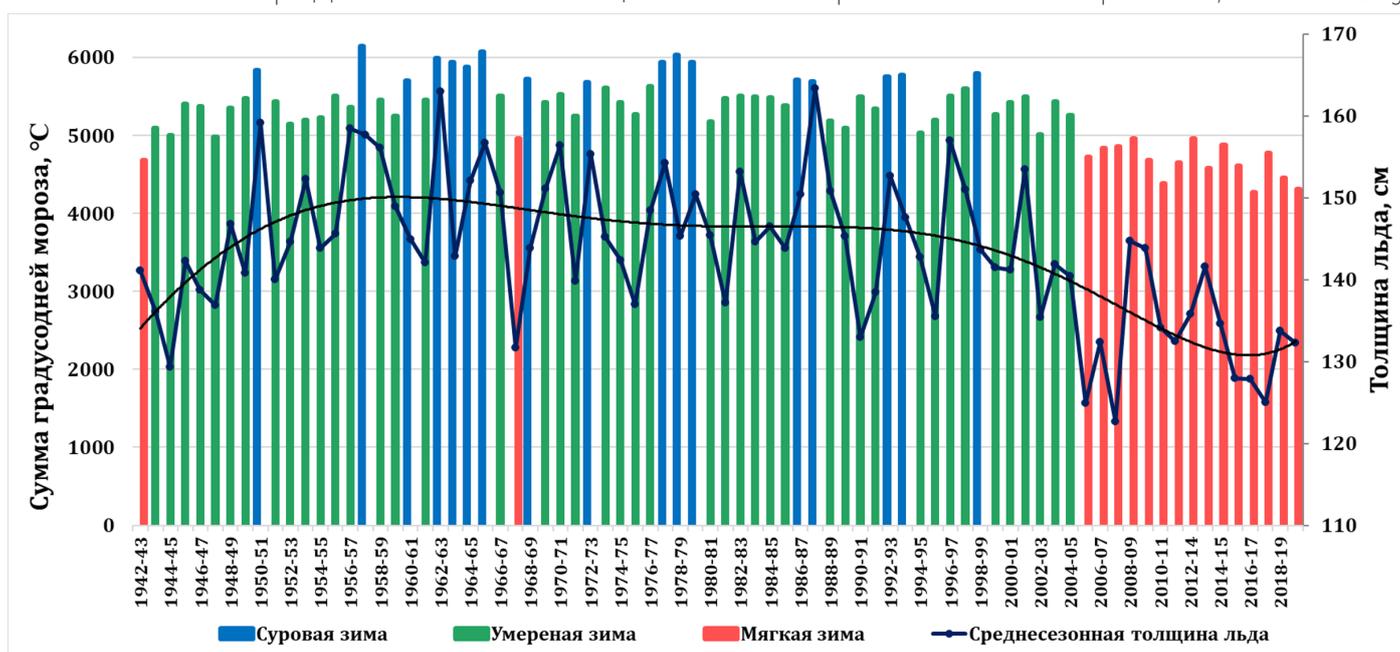


Рисунок 7 – Межгодовая изменчивость осредненной по морю СГДМ и среднесезонной толщины льда.



измерения проводятся на припайном льду, а не на дрейфующем. Тем не менее, длинный ряд наблюдений, достаточно высокая точность контактных измерений дает возможность с большой достоверностью оценить изменения такой характеристики, как толщина льда, в современных климатических условиях.

Чаще всего в различных исследованиях для оценки климатических изменений используется такая характеристика, как максимальная толщина льда, т.е. максимум, который был достигнут в ходе одного зимнего сезона. Межгодовая изменчивость максимальной толщины льда по станциям характеризуется значительным размахом колебаний (55-92 см) и, кроме станции о. Котельный, выраженным отрицательным трендом. Средние толщины на момент максимального нарастания колеблются в пределах 209-221 см. в восточной части моря, 192 см на м. Челюскин в западной части.

Все абсолютные максимумы толщины льда по станциям за полный ряд наблюдений были зафиксированы в период до 2005 г., в то время как абсолютные минимумы толщины льда зафиксированы в последние 15 лет. Средние толщины на момент максимального нарастания (максимальная толщина льда) за последние 15 лет уменьшились на всех станциях на 1-11%. (6% в среднем по морю) по сравнению с предыдущим периодом. Наименьшие изменения выявлены на станции о. Котельный (- 3 см), наибольшие на станции м. Челюскин (-21 см).

В ходе анализа подекадных значений толщины льда выявлено, что процесс нарастания в последние 15 лет происходит значительно медленнее на всех станциях. Сроки перехода в следующую возрастную градацию сместились на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений. Только на станции о. Котельный к концу мая толщина льда приближается к среднемуголетним значениям.

Температура воздуха на рассматриваемых станциях в последние 15 лет в среднем на 2,6°C была выше, чем в предыдущем периоде. Наибольшие изменения, 3,7-5,1°C, наблюдаются в осенние месяцы

(октябре, ноябре), а также в апреле. Для зимнего сезона характерно повышение температуры на 1,6-3,4°C, а для летнего – на 0,1-2,4°C. Значительное повышение температуры воздуха осенью способствует более позднему началу ледообразования, весной – замедлению нарастания и более раннему началу таяния льда.

Сумма градусо-дней мороза (СГДМ) хорошо характеризует изменение суровости зимнего периода. За последние 15 лет по сравнению с предыдущим периодом, СГДМ, осредненная по всем станциям моря Лаптевых, уменьшилась на 15%. Расчеты показывают, что ни на одной из станций не наблюдалось зимы, отвечающей критериям суровой, а при осреднении значений по станциям, все 15 последних зимних сезонов могут быть отнесены к мягким.

Установлено, что уменьшение СГДМ хорошо согласуется с уменьшением среднесезонной (средней за ноябрь-май) толщины льда по станциям, гораздо лучше, чем с максимальной толщиной льда. Проведенный корреляционный анализ длинных 78-83-летних рядов показывает их более тесную связь на большинстве станций и более высокий коэффициент корреляции (0,7).

В различных исследованиях часто используют именно максимальную толщину льда, в том числе для оценки климатических изменений. Однако максимальная толщина льда может не отражать наблюдаемых климатических изменений в полной мере, как это выявлено, например, на станции о. Котельный, где максимальная толщина льда почти не изменилась за последние 15 лет при значительном уменьшении СГДМ. Максимальное значение в годовом цикле обычно фиксируется в апреле или мае, т.е. в конце периода нарастания. Однако дата, когда был достигнут максимум и как быстро происходило нарастание льда обычно не учитывается, и в анализе участвует только максимальное значение. Тем не менее, с уменьшением холодного периода, снижением показателя СГДМ, сокращением активного периода нарастания льда, должна уменьшаться и его толщина, что лучше отражает

такая характеристика, как среднесезонная толщина льда. Этот показатель представляется более информативным, поскольку он компилирует внутри себя и максимальные значения, и более медленное нарастание льда, а также лучше коррелирует с СГДМ. В примере с о. Котельный это также хорошо заметно, поскольку среднесезонная толщина льда уменьшается в соответствии с уменьшением СГДМ, в отличие от максимальной. По результатам анализа рядов данных, осредненных по

всем станциям выявлено снижение среднесезонной толщины льда на 10% за последние 15 лет.

В заключение можно отметить, что последний 15-летний период (2005-2020 гг.) выделяется наиболее мягкими условиями за всю историю наблюдений на полярных станциях моря Лаптевых. Это подтверждает другие исследования, которые выделяют именно этот период в качестве нового состояния климатической системы.

### Список литературы:

1. Comiso, J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. *J. Clim.* 2012, 25, 1176–1193. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00113.1>
2. Petty, A. A., Stroeve, J. C., Holland, P. R., Boisvert, L. N., Bliss, A. C., Kimura, N., and Meier, W. N.: the Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 12(2), 433–453, <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>, 2018.
3. Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., and Barrett, A. P.: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climate Change*, 110, 1005–1027, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>, 2012.
4. Serreze, M. C., Stroeve, J., Barrett, A. P., and Boisvert, L. N.: Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 11463–11485, <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>, 2016.
5. Stroeve, J. C., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., and Barrett, A.: Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 41(4), 1216–1225, <http://doi.org/10.1002/2013GL058951>, 2014.
6. Serreze, M. C., Holland, M. M., and Stroeve, J.: Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover, *Science*, 315, 1533–1536, <https://doi.org/10.1126/science.1139426>, 2007.
7. Егоров А.Г., Павлова Е.А. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;65(4):389–404. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
8. Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А., Шаратунова М.В., Хотченков С.В. Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических море в современном климатическом периоде, *Труды ГОИН* № 220. стр. 44–60. М. 2019 ISSN: 0371-7119
9. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. *Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations.* Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester. 2009. 164 p.
10. Иванов В.В., Алексеенков Г.А. Коржииков А. Я. О совершенствовании макроциркуляционного метода долгосрочного метеорологического прогноза в Карском море//*Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России)*. – 2018. №4 (370). С. 105–121. ISSN 2618-9631
11. Алексеев Г.В., Радионов В. Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 1(103), С. 32–42.
12. Timofeeva, A., Ivanov, V., Yulin, A., and Khotchenkov, S.: Multiyear variability of atmospheric processes and ice cover in the Laptev Sea since 1942 to 2019, *EGU General Assembly2020, Online*, 4–8 May 2020, EGU2020-12269, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12269,2020>
13. Ашик И.М., Иванов В. В., Кассенс Х., Махотин М.С., Поляков И.В. Основные результаты океанологических исследований Северного Ледовитого океана в последнее десятилетие // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 1(103), С. 42–56.
14. Rothrock, D. A., Yu, Y. and Mayakut, G .A. Thinning of Arctic Sea Ice Cover. *Geophys. Res. Let.* 26, 1999, pp. 3469–3472. <https://doi.org/10.1029/1999GL010863>
15. Rothrock, D., Zhang, J. & Yu, Y. The Arctic Ice Thickness Anomaly of the 1990s: A Consistent View from Observations and Models. *J. Geophys. Res.* 108, 2003. <https://doi.org/10.1029/2001JC001208>.
16. Haas, C., Late-Summer Sea Ice Thickness Variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 Derived from Ground-based Electromagnetic Sounding, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 2004, L09402. <https://doi.org/10.1029/2003GL019394>.
17. Haas, C., Howell, S. (), Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*. 42., 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>.
18. Kwok, R.; Untersteiner, N. The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today* 2011, 64, 36–41. <https://doi.org/10.1063/1.3653854>
19. Ricker, R., Hendricks, S., Girard-Ardhuin, F., Kaleschke, L., Lique, C., Tian-Kunze, X., Nicolaus,

- M., and Krumpen, T.: Satellite observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2015, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3236–3245, <https://doi.org/10.1002/2016GL072244>, 2017a.
20. Ricker, R., Hendricks, S., Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., King, J., and Haas, C.: A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data, *The Cryosphere*, 11, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>
  21. Stroeve, J.C., Schroeder, D., Tsamados M., Feltham, D. Warm winter, thin ice?. *The Cryosphere*. 12., 2018, 1791-1809. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018>
  22. Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(2):124-143. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>
  23. Смоляницкий В.М., Тюряков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020; 66(3):337-348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348> 1607–1623, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>, 2017b.
  24. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб. Изд. ААНИИ. 2012. 180 с. 16. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. / Под ред. Е.У. Миронова – СПб. Изд. ААНИИ. 2010. 320 с.
  25. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. / Под ред. Е.У. Миронова – СПб. Изд. ААНИИ. 2010. 320 с.
  26. Карклин В.П., Карелин И.Д., Юлин А.В., Иванов Н.Е., Усольцева Е.А. Особенности формирования припая в море Лаптевых. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. № 3(97), С. 5-14.
  27. РД 52.10.842-2017 Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. Введен взамен предыдущего. Дата введения 2018-07-01
  28. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017;(3):16-26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26>
  29. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИФ-СОЦИН, 2017. 640 с.
  30. Зубов Н.Н. О льдах Арктики и Антарктики.- Москва:МГУ, 1956. -60 стр.
  31. Доронин Ю.П. К вопросу о нарастании морского льда // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1959. No 1. С. 73–79.
  32. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.:Гидрометеоиздат, 1960. -560 с. (с. 330-333)

## References:

1. Comiso, J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. *J. Clim.* 2012, 25, 1176–1193. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00113.1>
2. Petty, A. A., Stroeve, J. C., Holland, P. R., Boisvert, L. N., Bliss, A. C., Kimura, N., and Meier, W. N.: the Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 12(2), 433-453, <http://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>, 2018.
3. Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., and Barrett, A. P.: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climate Change*, 110, 1005–1027, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>, 2012.
4. Serreze, M. C., Stroeve, J., Barrett, A. P., and Boisvert, L. N.: Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 11463–11485, <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>, 2016.
5. Stroeve, J. C., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., and Barrett, A.: Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 41(4), 1216-1225, <http://doi.org/10.1002/2013GL058951>, 2014.
6. Serreze, M. C., Holland, M. M., and Stroeve, J.: Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover, *Science*, 315, 1533–1536, <https://doi.org/10.1126/science.1139426>, 2007.
7. Egorov A.G., Pavlova E.A. Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century. *Arctic and Antarctic Research*. 2019;65(4):389-404. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
8. Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A., Sharatunova M.V., Hotchenkov S.V. Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. *Trudy GOIN № 220: 44-60. M. 2019 ISSN: 0371-7119 (in Russ.)*
9. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. *Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester. 2009. 164 p.*
10. Ivanov V.V., Alekseyenkov G.A., Korzhikov A.Ya. On improvement of the microcirculation method for long-range weather forecasting in the Kara Sea Hydrometeorological research and Forecasts (*Trudy Hydrometcentra Rossii*), 2018. №4 (370): 105-121. ISSN 2618-9631 (In Russ.)

11. Alekseev, G. V., Radionov, V. F., Alexandrov, E. I., Ivanov, N. E., and Kharlanenkova, N. E., Climate change in the Arctic under global warming. *Arctic and Antarctic Research*. 2015. № 1(103): 32-42. (In Russ.)
12. Timofeeva, A., Ivanov, V., Yulin, A., and Khotchenkov, S.: Multiyear variability of atmospheric processes and ice cover in the Laptev Sea since 1942 to 2019, EGU General Assembly2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-12269, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12269,2020>
13. Ashik I. M., Ivanov V. V., Kassens H., Makhotin M. S., Polyakov I. V. General results of Arctic Ocean oceanological studies in the last decade. *Arctic and Antarctic Research*. 2015. № 1(103): 42-56. (In Russ.)
14. Rothrock, D. A., Yu, Y. and Mayakut, G .A. Thinning of Arctic Sea Ice Cover. *Geophys. Res. Lett.* 26, 1999, pp. 3469-3472. <https://doi.org/10.1029/1999GL010863>
15. Rothrock, D., Zhang, J. & Yu, Y. The Arctic Ice Thickness Anomaly of the 1990s: A Consistent View from Observations and Models. *J. Geophys. Res.* 108, 2003. <https://doi.org/10.1029/2001JC001208>.
16. Haas, C., Late-Summer Sea Ice Thickness Variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 Derived from Ground-based Electromagnetic Sounding, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 2004, L09402. <https://doi.org/10.1029/2003GL019394>.
17. Haas, C., Howell, S. (), Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*. 42., 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL065704>.
18. Kwok, R.; Untersteiner, N. The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today* 2011, 64, 36–41. <https://doi.org/10.1063/1.3653854>
19. Ricker, R., Hendricks, S., Girard-Arduin, F., Kaleschke, L., Lique, C., Tian-Kunze, X., Nicolaus, M., and Krumpen, T.: Satellite observed drop of Arctic sea ice growth in winter 2015–2015, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3236–3245, <https://doi.org/10.1002/2016GL072244, 2017a>.
20. Ricker, R., Hendricks, S., Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., King, J., and Haas, C.: A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data, *The Cryosphere*, 11. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1607-2017>
21. Stroeve, J.C., Schroeder, D., Tsamados M., Feltham, D. Warm winter, thin ice?. *The Cryosphere*. 12., 2018, 1791-1809. [10.5194/tc-12-1791-2018](https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018). <https://doi.org/10.5194/tc-12-1791-2018>
22. Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(2):124-143. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>
23. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(3):337-348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348> (In Russ.)
24. Karelin I.D., Karklin V.P. Landfast ice and flaw polynyas of the Arctic seas of Siberian offshore in late XX – early XXI century. SPb. AARI Publ. 2012. 180 p. (In Russ.)
25. Ice phenomena threatening Arctic shipping / Ed. Mironov Ye.U. – SPb. AARI Publ. 2010. 320 p. (In Russ.)
26. Karklin V. P., Karelin I. D., Yulin A.V., Ivanov N.E., Usoltseva E. A. Landfast ice formation features in the Laptev Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2013. № 3(97):5-14.
27. RD 52.10.842-2017 Manual for hydrometeorological stations and posts. Issue 9. Hydrometeorological observations at sea stations and posts. Part I. Hydrological observations at coastal stations and posts. Implemented instead of the previous one. Implementation date 2018-07-01 (In Russ.)
28. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the southwestern part of the Kara sea during autumn-winter season. *Arctic and Antarctic Research*. 2017;(3):16-26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26> (In Russ.)
29. Dumanskaya I. O. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow: IG–SOCIN, 2017, 640 p. (In Russ.)
30. Zubov N. N. Concerning the ice of the Arctic and Antarctic.- Moscow: Moscow State University, 1956. -60 p. (In Russ.)
31. Doronin Yu. P. Concerning the issue of sea ice development. *Arctic and Antarctic Research* 1959. No. 1. pp. 73-79. (In Russ.)
32. Girs A. A. Fundamentals of long-term weather forecasts. L.: Hydrometeoizdat, 1960. 560 p. (p. 330-333)

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ АСПЕКТ

Материалы рубрики представлены Советом молодежных арктических лидеров (СМАЛ).

СМАЛ - международная молодежная организация, призванная объединить представителей молодежи России, Норвегии, Дании, Канады, США, других приарктических и иных государств, готовых к сотрудничеству в Арктике, для совместного решения проблем региона, а также с целью привлечения внимания к ним со стороны широкой общественности, органов государственной власти и международных институтов.

Дорогие друзья!

Ни для кого не секрет, что сейчас к Арктике приковано огромное внимание со стороны ведущих мировых держав – как приарктических, так и нерегинальных. По мнению некоторых экспертов, уже к середине XXI в. Арктика станет одним из ключевых регионов на планете, от обстановки в котором будет зависеть общее состояние международных отношений. В то же время, именно Арктика в настоящее время сталкивается с множеством серьезных вызовов: от роста политической напряженности и постепенной милитаризации региона до изменения климата и экономических трудностей, лишь обострившихся в период пандемии коронавируса. В отношениях между арктическими странами присутствует недоверие, что негативно отражается на международном сотрудничестве и затрудняет поиск эффективных ответов на современные вызовы, что, в свою очередь, создает угрозы для будущего важнейшего региона Земли. Мы последнее поколение, способное реально изменить ситуацию к лучшему – поэтому мы решили действовать, здесь и сейчас! Совет молодежных арктических лидеров – это первый шаг на пути к устойчивому развитию Арктики. СМАЛ – это сообщество молодых людей, которым небезразлично будущее Арктики. СМАЛ – это организация, ориентированная на реальные действия для всестороннего развития региона. Девиз нашей организации: «Ведём Арктику к устойчивому будущему – вместе», и мы глубоко убеждены, что решить большинство стоящих сегодня перед Арктикой проблем можно, лишь объединив усилия ярких и амбициозных молодых людей из арктических и неарктических стран. И если слова 'you say you want a real solution' из песни The Beatles про вас, тогда вы знаете, где найдете единомышленников и поддержку!

С наилучшими пожеланиями,  
Генеральный секретарь СМАЛ  
Никита Сергеевич  
Липунов



## THE INTERNATIONAL DIMENSION OF THE NORTHERN SEA ROUTE

N.S. LIPUNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 2<sup>nd</sup> year master student, 'Russian Foreign Policy and Diplomacy' programme Moscow State Institute of International Relations (MGIMO-University), Moscow, Russia; nickitalipunov@mail.ru

**Abstract:** The Foundations of the State Policy of the Russian Federation in the Arctic until 2035 refers to the Northern Sea Route as Russia's 'national transport communication' but not all countries agree with this wording. This article uses the positions of Russia, some Arctic (Norway, the United States) and non-Arctic (China) countries as examples to show the full range of interests of various players with regard to the future development of the Northern Sea Route.

**Keywords:** international relations, Arctic, Arctic states, international transport corridor, Northern Sea Route, Northeast passage, Russia, Norway, USA, China

### Introduction

Interest in the Arctic and its resources has been growing steadily in recent years, both on the part of traditional Arctic powers and non-regional players. This is not surprising: according to scientists, the Arctic is home to vast undiscovered reserves of natural resources, and the region itself occupies a strategic position with considerable logistical potential. Two major transport corridors pass through the Arctic: the Northwest Passage and the Northeast Passage. The main part of the latter is the Northern Sea Route (NSR), a shipping route in the Russian Arctic. It is currently the focus of attention both in Russia and abroad: the Northwest Passage, which runs in the territorial waters and exclusive economic zone of Denmark (Greenland), Canada and the United States, is blocked by ice for most of the year and has a much shorter navigation period than the NSR.

### The NSR: a Russian or an International Transport Corridor?

The NSR is the shortest route between European Russia and the Far East. It runs through the seas of the Arctic and Pacific Oceans from the Kara Gates<sup>1</sup> to Provideniya Bay<sup>2</sup>. The total length of the NSR in this section is approximately 5,600 km, so this

<sup>1</sup> It is generally accepted that the NSR begins at the Kara Gates, but sometimes the 'capital of the Russian Arctic' Murmansk is taken as the starting point and the entire route is divided into two sections: the Western and the Eastern ones.

route is almost twice as short as other sea routes from Europe to the Far East [3].

Currently, the NSR transports mainly fuel and energy raw materials and equipment for field development and infrastructure construction. The NSR's cargo turnover in 2014-2019 increased almost eightfold: from 4 to 31.5 million tons per year [13]. The growth has been particularly rapid in the last two years, partly due to an increase in the volume of liquefied natural gas shipments at the port of Sabetta (the Yamal Peninsula).

The Russian merchant shipping law defines the boundaries of the NSR water area [4, art. 5.1]. But despite the fact that the NSR runs in the territorial waters and exclusive economic zone of Russia, its development has various international aspects: the route attracts the attention of many regional and non-regional players.

Further in the article, the full palette of interests of various players with regard to the development of the NSR will be shown, using the positions of Russia, some Arctic (Norway, the USA) and non-Arctic (China) states as examples.

<sup>2</sup> Russia's Ministry for the Development of the Far East and Arctic has recently proposed almost doubling the boundaries of the NSR water area, from Murmansk to Sakhalin. See Sevморпост' [Electronic resource] // Kommersant [website]. – 21.05.2020. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4349939> (accessed on 28.12.2020).

## Russia's 'National Thruway'

In the previous version of the Strategy for the Development of the Arctic Zone of Russia (hereinafter – the AZRF), the NSR was designated as 'Russia's historically established national single transport communication in the Arctic' [5] which is the baseline of the Russian approach.

The Arctic is a strategically important region for Russia: accounting for about 18% of the total area of Russia, it generates 11% of its national income, accounts for 22% of Russian exports, and produces about 80% of its natural gas and 60% of its oil reserves [10]. The development of the Arctic is impossible without adequate infrastructure, especially the transport one. Russian authorities attach great importance to the NSR, because land and air transport routes in the AZRF are underdeveloped.

In 2018, Russian President Vladimir Putin set the goal of increasing NSR's cargo turnover up to 80 million tons by 2024. The COVID-19 pandemic has made its adjustments: there are cautious statements now about the need to lower this target.

The main reason for the expected reduction in NSR's cargo turnover is the drop

in demand for energy resources caused by the coronavirus pandemic. The impact is ambivalent: on the one hand, the reduced demand has led to lower production and fewer resources to be transported. On the other hand, the decreased demand has meant that large-scale Arctic development projects have temporarily lost their economic viability.

A number of companies have already announced to postpone the launch of new production and refining capacities. Experts interviewed by *Rossiyskaya Gazeta* believe that with the recovery of demand for energy resources in the mid-term perspective the Northern Sea Route will be able to meet the targets again. In such case, the volume of cargo traffic will have reached 120 million tons by 2030 and 180 million tons – by 2035 [14]. Можно выделить три основных аспекта, определяющих позицию России по СМП: военный, экономический и энергетический.

Three main aspects determining Russia's position on the NSR can be distinguished: the military, economic and energy ones.

The Arctic, due to its geographical position, is a strategically important region for Russia in terms of ensuring

### ГРАНИЦЫ СЕВМОРПУТИ В РАЗНЫЕ ВРЕМЕНА

ИСТОЧНИК: КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ ЦЕНТР «ГЕКОН».

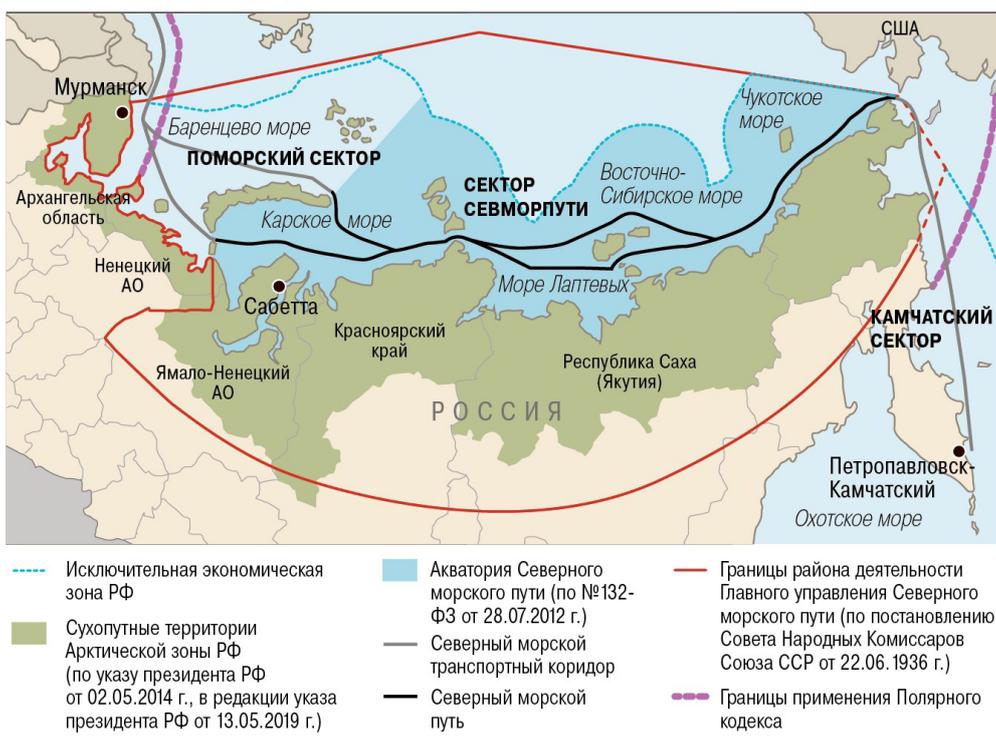


Рисунок 1 – Карта СМП. Источник: консультативный центр «Гекон».

national security in its broadest sense. The development of the NSR will increase the transport accessibility of the Russian North – and increase the mobility and efficiency of the armed forces units deployed in the AZRF.

Economically, the NSR is the main transport route in the North, linking the remote territories of the AZRF and often being the only way for them to deliver goods. Moreover, the NSR is part of the larger international Northeast Passage. With proper development and appropriate investment in infrastructure<sup>3</sup>, it can compete with the key maritime ITCs linking Europe and Asia via the Suez Canal and the Strait of Malacca, which can significantly strengthen Russia's international maritime transport market position.

Finally, the energy aspect lies in significant reserves of natural resources – mainly hydrocarbons – which, once extracted, need to be brought onshore, transported to other parts of the country and then exported to foreign markets. In this context, the NSR appears to be the main logistical artery for energy resources in northern latitudes. The NSR is already one of the main transportation routes for Russian LNG (Yamal LNG).

<sup>3</sup> Such attempts are already being made (see e.g. Northern Sea Route Infrastructure Development Plan 2035 [Electronic resource] // Russia's Ministry for the Development of the Far East and Arctic [website]. – 30.12.2019. – URL: [https://minvr.gov.ru/press-center/news/24164/?sphrase\\_id=1480825](https://minvr.gov.ru/press-center/news/24164/?sphrase_id=1480825) (accessed on 28.12.2020)), although criticised by many Russian experts as clearly insufficient.

Thus, Russia 1) considers the NSR a national transport corridor and develops respective national legislation based on the international maritime law<sup>4</sup>; 2) is actively developing infrastructure along the entire route to gradually increase cargo turnover and transform the NSR into one of the leading ITCs.

However, many other countries do not share this 'national approach' of Russia and actively criticise the development of the NSR. In the following sections we will examine their positions in detail.

### Crouching U.S., Hidden Norway

Other regional players are reserved about the idea of developing the NSR, and some openly criticise the Russian approach to transport route management. For example, for Canada and Denmark, the NSR is a competitor to the Northwest Passage, although using the latter as an ITC is a matter of a very distant future.

Norway, for instance, takes a neutral and wait-and-see approach to the NSR and at the official level declares the project to be economically inexpedient while raising the issue of its compliance with environmental standards [8]. Foreign Minister I.M. Eriksen Søreide in an interview with *Izvestiya* said that 'the NSR had serious problems with everything from search and rescue

<sup>4</sup> Further on the legal aspects of shipping on the NSR see RIAC Reader. The Northern Sea Route [Electronic resource] // The Russian International Affairs Council [website]. – URL: <https://russiancouncil.ru/sevmorout> (accessed on 28.12.2020).



Рисунок 2 – Порт Сабетта, ЯНАО. Источник: ООО «Маламут-Транс».



operations and insufficient infrastructure along the entire route to the extremely harsh climate' [11].

The United States, on the opposite, has strongly criticised the project and challenged Russia's right to manage the NSR, demanding freedom of navigation along the entire route. U.S. Secretary of State Pompeo, speaking at the Arctic Council summit in Rovaniemi, called the navigation regime established by Russia on the NSR illegal. He noted the deep concern of the U.S. over 'Russia's claims to international waters of the NSR, including plans to align the route with China's Maritime Silk Road project' [9].

Such a U.S. approach is understandable: over the past decades, Washington has shown little interest in Arctic policy, has not invested in the development of an icebreaker fleet – and has fallen significantly behind in terms of developing the Arctic [7]. Against the backdrop of Russia's growing activity on the NSR and the gradual increase of China's presence in the region, the United States seeks to preserve its position, questioning the legitimacy of Russia's actions and trying to create an appropriate image in the eyes of the world community. Such a rhetoric resonates: some major American and European companies have already refused to use the NSR as a container transportation

route. Russian authorities attributed it to 'Russia's leading position in the Arctic basin' and the lack of other states' developing capacities in the North, including a nuclear-powered icebreaker fleet [12]. Under these circumstances, Trump's proposal to buy Greenland from Denmark does not seem so absurd: the island occupies a critical position.

### China and 'The Polar Silk Road'

Non-Arctic states, especially those in East and Southeast Asia, have been increasingly interested in the NSR. For them, the NSR is an attractive alternative route for supplying products to European markets. The most active player here is China, which is increasingly asserting its Arctic ambitions and is even positioning itself as a 'near-Arctic state'.

In 2018, the Chinese government outlined the basic principles and objectives of country's Arctic policy in a white paper. With regard to the NSR, which is referred to in the document as the Northeast Passage, China, without challenging the jurisdiction of the respective countries in the Arctic waters<sup>5</sup>, states the need for free navigation along the entire route [6]. Beijing has even set the task of aligning the NSR with the Belt and Road project and is already proposing to develop

<sup>5</sup> Obviously, Russia is implied here.



Рисунок 3 – Слева направо: министр иностранных дел Норвегии И.М. Эриксен Сёрайде, министр иностранных дел России С.В. Лавров, министр иностранных дел Швеции М. Вальстрем и госсекретарь США М. Помпео на министерской встрече Арктического совета 7 мая 2019 г. в Рованиеми, Финляндия. Источник: Vesa Moilanen/Lehtikuva via AP.

it as 'The Polar Silk Road' [6].

Such a position has provoked strong criticism on the part of some Arctic states, most notably the United States, which is concerned about China's excessive strengthening in the region. Nevertheless, some researchers think that this policy is dictated by purely commercial considerations and appears to be very cautious so far [2]. Moreover, China's proposals on joint development of the NSR fit into the current logic of Moscow, which is interested in attracting foreign investment to develop the infrastructure of the transport artery provided that it retains control over the route. Some experts even call China 'Russia's closest partner in the development of the NSR' [1].

### Conclusion

The high level of interest in the NSR is defined by its potential as an alternative to the main maritime ITCs and the growing importance of the Arctic in international relations. For Russia, the development of the NSR is a strategic objective, without which it is impossible to strengthen its position as a leading Arctic power. Other regional players – for example, the United States – actively resist this development and contest Russia's right to manage the NSR. Non-Arctic countries are expected to advocate its free use, pursuing their own economic interests and seeking to establish themselves as regional players – as China does.

Thus, we can observe a clear clash of interests of various international players on the issue of the NSR development – both regional and non-regional ones – and it will depend on Russia's determination and persistence whether the NSR can one day become a full-fledged Russian alternative to other maritime ITCs.



Рисунок 4 – Спикер Информационного бюро Государственного совета КНР Ху Кайхонг представляет новую арктическую стратегию Китая на пресс-конференции 26 января 2018 г. в Пекине, Китай. Источник: CNBC.

## References:

1. Zvorykina J., Teteryatnikov K. The Northern Sea Route as a Tool of Arctic Development // The Russian Economic Journal. – 2019. – N 4. – P. 21-44.
2. Moe A., Stokke O.S. China and Arctic shipping: Policies, interests and engagement // Kitaj v mirovoj i regional'noj politike. Istorija i sovremennost'. – 2019. – №24. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/china-and-arctic-shipping-policies-interests-and-engagement> (accessed on 28.12.2020).
3. Bol'shaya Sovetskaya enciklopediya [Electronic resource]. – URL: [http://www.aggregateria.com/s/severnyj\\_morskoy\\_put.html](http://www.aggregateria.com/s/severnyj_morskoy_put.html) (accessed on 28.12.2020).
4. Trade Shipping Code of the Russian Federation of 30.04.1999 N 81-Φ3 (ed. of 13.07.2020) // Sobranie zakonodatel'stva RF. – 03.05.1999. – N 18. – Art. 2207 (accessed on 28.12.2020).
5. Strategiya razvitiya Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2020 goda [Electronic resource] // The Government of Russia [website]. – 2013. – URL: <http://government.ru/info/18360/> (accessed on 28.12.2020).
6. China's Arctic Policy White Paper [Electronic resource] // The State Council of the People's Republic of China [website]. – 26.01.2018. – URL: [http://english.www.gov.cn/archive/white\\_paper/2018/01/26/content\\_281476026660336.htm](http://english.www.gov.cn/archive/white_paper/2018/01/26/content_281476026660336.htm) (accessed on 28.12.2020).
7. Is America losing out on the Northern Sea Route? [Electronic resource] // Raconteur Media [website]. – 10.09.2019. – URL: <https://www.raconteur.net/global-business/usa/northern-sea-route/> (accessed on 28.12.2020).
8. Norway Has Doubts about Development of Russia's Northern Sea Route [Electronic resource] // Russia Business Today [website]. – 26.08.2019. – URL: <https://russiabusinesstoday.com/environment/norway-has-doubts-about-development-of-russias-northern-sea-route/#:~:text=Running%20from%20the%20city%20of,a%20permit%20from%20Russian%20authorities> (accessed on 28.12.2020).
9. 9. US Secretary of State calls Russia's Arctic ambitions 'illegal' [Electronic resource] // Bellona [website]. – 07.05.2019. – URL: <https://bellona.org/news/arctic/2019-05-us-secretary-of-state-calls-russias-arctic-ambitions-illegal> (accessed on 28.12.2020).
10. 10. Arktika. Infografika [Electronic resource] // Ministry for the Development of the Far East and the Arctic of the Russian Federation [website]. – URL: <https://minvr.gov.ru/#gallery6> (accessed on 28.12.2020).
11. 11. BezOslovno: Rossiya budet osvaivat' Sevmorput' bez uchastiya Norvegii [Electronic resource] // Izvestiya [website]. – 26.08.2019. – URL: <https://iz.ru/912535/elnar-bainazarov/bezoslovno-rossiia-budet-osvaivat-sevmorput-bez-uchastiia-norvegii> (accessed on 28.12.2020).
12. 12. V RF ob"yasnili otkaz zapadnyh kompanij ot Severnogo morskogo puti [Electronic resource] // Sputnik Lithuania [website]. – 22.11.2019. – URL: <https://lt.sputniknews.ru/russia/20191122/10727104/V-RF-obyasnili-otkaz-zapadnykh-kompaniy-ot-Severnogo-morskogo-puti.html> (accessed on 28.12.2020).
13. 13. Ob"em perevozok gruzov v akvatorii Severnogo morskogo puti [Electronic resource] // Edinaya mezhvedomstvennaya informacionno-statisticheskaya sistema (EMISS) [website]. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/51479> (accessed on 28.12.2020).
14. 14. Ugol' sbrosil gruz [Electronic resource] // Rossijskaya gazeta [website]. – 30.08.2020. – URL: <https://rg.ru/2020/08/30/plany-zagruzki-severnogo-morskogo-puti-mogut-byt-skorrektirovany.html> (accessed on 28.12.2020).

## REVIEW OF ARCTIC POLICY OF FINLAND IN 2010S

P.A. KURPAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 4<sup>th</sup> year student,  
Moscow State Institute of International Relations (MGIMO-University), Moscow, Russia;  
p.a.kurpas@my.mgimo.ru

**Abstract:** Finland is one of the main actors in Arctic international relations. It has managed to influence the development of the region by means of its Arctic policy, transmitted through Arctic Council and other regional organizations. This article studies the history of development of the current Finnish Arctic policy and its main clauses. In the third part of the article the Finnish Arctic Strategy 2013 is compared to the Swedish one, published in 2020. As a result of the comparison, Finnish Strategy is found still quite relevant. In the fourth part the author examines the results of the implementation of Finnish Arctic policy and states that it has been comparatively successful.

**Keywords:** Arctic policy, Arctic strategy, Arctic States, Finland, Arctic Council, Northern Dimension

Finland is one of the eight Arctic States. From the perspective of international law, Finland was for the first time referred to as an Arctic State in 1991, when the governments of the USSR, Finland, Canada, Denmark, Iceland, Norway, Sweden, and the United States signed the Declaration on the Protection of Arctic Environment (1991 Rovaniemi Declaration) and the Arctic Environmental Protection Strategy [1]. These international legal acts launched the so called Rovaniemi process, which was intended to gradually intensify cooperation in the region [2]. As a result, the Arctic Council (AC) was established in 1996. The Declaration on the Establishment of the AC (1996 Ottawa Declaration) confirmed the Arctic State status of Finland [3].

It is worth mentioning that it was Finland that initiated the Rovaniemi process [2]. This indicates that already in the 1990s the state clearly positioned itself as an independent actor capable of influencing future development of the Arctic.

Acknowledging the country's active role in shaping the international legal regime in the region in 1990s and 2000s, we should, however, note that Finland's Arctic policy of that period cannot be called fully consistent and independent from other state policies. While at the beginning of 1990s the Arctic itself was of considerable interest to Finland, by the end of the decade the focus of Finland's foreign policy had shifted and the

Arctic agenda, although still quite important for the country's authorities, had been superseded by the Northern Dimension initiative — a project with a greater geographic scope. In its framework Finnish policy in the Arctic developed in 2000s [2].

By the end of 2000s both Arctic and non-Arctic States' interest towards the region had surged, prompted by such factors as globalization, rise in the prices of natural resources in the 2000s, accelerating pace of climate change, and recognition of the Arctic's new transportation role. This resulted in a "boom" of publishing of Arctic strategies — between 2009 and 2013 such documents were developed and issued by all member states of the AC [5].

First Arctic strategy of Finland (hereinafter referred to as the 2010 Strategy) [7] was released by the government of Mari Kiviniemi in July 2010. Its objectives included protecting the environment, developing the region's economy and transportation system, involving indigenous peoples in decision-making process, enhancing the role of regional international organizations, and strengthening the presence of the EU in the Arctic. It is important to note that a distinctive feature of the 2010 Strategy is that it was designed to deal mostly with foreign policy issues.

The 2010 strategy was in force for a relatively short time — until 2013. At the end of 2012, it became clear that there was a

need to update and expand its content. This was due to the rapidly growing international importance of the Arctic region and partial reorientation of Finland's development vector towards the north [8].

In August 2013, the government of Jyrki Katainen published a new, currently effective Finland's Arctic Strategy (hereinafter referred to as the 2013 Strategy). In essence, it is a more comprehensive version of the 2010 strategy, which takes into account both foreign and domestic development priorities of the country. The main objective was to stimulate economic growth and increase the competitiveness of the region with due regard for the environmental constraints.

Table 1 summarises the key objectives of the 2013 Strategy, divided into six blocks<sup>1</sup>: economy, international cooperation, social sphere, science, environment and security. While making up the table, the author paid attention mainly to the objectives

<sup>1</sup> The clustering of the objectives is made by the author for ease of analysis. The way the objectives are divided into blocks in the 2013 Strategy is different.

that are important from the international perspective.

The following measures are foreseen for the implementation of the 2013 Strategy: improvement of legislative regulation; provision of public funding; involvement of expert community; expansion of the scale of the activities, carried out by specialised agencies; active participation in international organisations; development of additional control mechanisms, etc.

It should be noted that the 2013 Strategy was generally in line with the Arctic strategies of the other AC member states. The differences may seem quite significant when comparing the strategies pairwise, but in essence, the main objectives and activities of all the eight Arctic States during the period under review are same [5].

In 2016-2017, the government of Juha Sipilä updated the 2013 Strategy. It did not make any sweeping changes, but only refined Finland's strategic priorities [9]. In addition, the update slightly shifted the



Figure 1: Arctic Council: Member States and Permanent Observers as of September 2019 Source - Arctic Portal: [https://arcticportal.org/images/news/2019/Arctic\\_Council\\_members\\_and\\_observers\\_2019.jpg](https://arcticportal.org/images/news/2019/Arctic_Council_members_and_observers_2019.jpg)

emphasis in the foreign policy block of objectives, highlighting the need to link the Arctic issues and the problems of the Nordic countries in general.

The 2016-2017 update currently remains the latest revision of Finland's Arctic strategy. In its programme the current government of Sanna Marin [12] indicates the intention to draw up a new Arctic strategy, which would consider Finland's long-term goals and the resources needed to realise them. The publication of this document is scheduled for March 2021.

For a more detailed analysis, it seems relevant to compare the 2013 Strategy (with the adjustments made in 2016-2017) with the new Arctic Strategy of Sweden [13]. The main reason for this is that the Sweden's Arctic Strategy was released only in September 2020. Therefore, a comparison with it — taking into account its previous version [14] — will allow for an approximate assessment of how relevant the 2013 Strategy is at the moment.

The comparison suggests that the 2013

Strategy is still quite relevant in general and reflects key trends in the development of the Arctic region. The only aspect in which Finland's current Arctic Strategy is clearly outdated is its understanding of the current geopolitical situation (for example, the Swedish 2020 Strategy places much more emphasis on military issues, which have only become relevant in the last few years). However, it is difficult to call this a fundamental shortcoming – geopolitical factor is changing very dynamically, which cannot be promptly reflected in strategic documents.

To conclude, let us briefly describe the results of the implementation of Finland's Arctic policy in 2010s. They are most clearly seen when we study Finland's chairmanship in the AC in 2017-2019. Its results [15] can be used as a first approximation to assess how successful Finland's Arctic policy was in general.

The main achievements of Finland's two-year chairmanship belong to the fields of environmental protection, digital

Table 1.

Key objectives of the 2013 Strategy

Block	Generalised objectives
Economy	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Increase the international competitiveness of Finland's traditional export sectors (Arctic shipbuilding, clean technologies in mining and energy sectors, Arctic tourism, etc.), taking into account the changes taking place in the Arctic climate</li> <li>· Develop the infrastructure in the Finnish Arctic</li> <li>· Promote sustainable use of natural resources</li> </ul>
International cooperation	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Intensify contacts with neighbouring countries in the field of common transport infrastructure</li> <li>· Increase cooperation within regional organisations (especially the AC and BEAC), Northern Dimension policy, bilateral partnerships and at subregional level</li> <li>· Improve Finland's international image as an Arctic State</li> <li>· Promote EU policy in the Arctic</li> </ul>
Social sector	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Improve the quality of life and working conditions of residents of the Finnish Arctic</li> <li>· Preserve and develop indigenous cultures</li> </ul>
Science	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Expand the scope and the range of Arctic research and education programmes</li> <li>· Participate in international scientific and technological cooperation on the issues related to the Arctic</li> </ul>
Environment	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Respect the environmental limits of the Arctic region, take into account the risks associated with the active presence of human and the need to prevent pollution in all activities carried out by Finland in the Arctic</li> <li>· Integrate climate change mitigation and adaptation objectives into Finnish international cooperation projects</li> <li>· Develop methods to assess and manage the risks associated with global warming</li> </ul>
Security	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Promote peaceful conflict resolution in the Arctic through regional organisations</li> <li>· Develop professional skills of rescuers and military personnel serving in the Arctic</li> <li>· Strengthen international defence cooperation, particularly by organizing joint exercises</li> </ul>

infrastructure and education. The projects implemented in these areas are in line with the updated 2013 Strategy. Finland's international cooperation initiatives were also successful in a number of respects.

However, the political tensions between the AC members did affect the outcome of Finland's chairmanship. For example, the AC ministerial meeting on 7 May 2019 did not adopt a joint declaration – for the first time in the history of the AC. This was largely due to the United States' tough stance against inclusion of environmental agenda issues into the declaration. Also the AC's Strategic Plan of Action was not approved, and the idea of the Arctic Summit at the Head of State level failed, too.

Because of this facts we cannot suggest that Finland's Arctic policy of the period under review was a complete success. However, it must be acknowledged that, at least in 2017-2019, its implementation was largely successful.

To sum up, Finland's Arctic policy in the 2010s was comprehensive, flexible and progressive, responding to the main challenges of the decade. Its future development is likely to involve the strengthening of the environmental pillar as well as the increased role of security and defence issues while retaining its main features and priorities. One thing that is absolutely certain is that in the future Finland will not relinquish its status of an active player in the Arctic region.



Figure 2. Collective photo of participants at the AC ministerial meeting on 7 May 2019 Source - Rossiyskaya Gazeta: <https://rg.ru/2019/05/07/v-finlandii-otkrylas-ministerskaia-vstrecha-arkticheskogo-soveta.html>

## References:

1. Arctic Environmental Protection Strategy. Declaration on the Protection of Arctic Environment. Rovaniemi, June 1991. Available at: [http://library.arcticportal.org/1542/1/artic\\_environment.pdf](http://library.arcticportal.org/1542/1/artic_environment.pdf) (accessed 28.10.2020).
2. Heikkilä M. If We Lose the Arctic: Finland's Arctic thinking from the 1980s to present day. Rovaniemi, The Arctic Centre, University Of Lapland, 2019. Available at: <https://lauda.ulapland.fi/bitstream/handle/10024/63651/Heikkila.Markku.If-we-lose-the-arctic.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (accessed 14.11.2020).
3. Arctic Council. Declaration on the Establishment of the Arctic Council. Joint Communiqué of the Governments of the Arctic Countries on the Establishment of the Arctic Council. Ottawa. September 19, 1996. Available at: [https://oaarchive.arctic-council.org/bitstream/handle/11374/85/EDOCS-1752-v2-ACMMCA00\\_Ottawa\\_1996\\_Founding\\_Declaration.PDF?sequence=5&isAllowed=y](https://oaarchive.arctic-council.org/bitstream/handle/11374/85/EDOCS-1752-v2-ACMMCA00_Ottawa_1996_Founding_Declaration.PDF?sequence=5&isAllowed=y) (accessed 28.10.2020).
4. Vuorenpää M.-L. Severnoe izmerenie: vzaimovyygodnoe sotrudnichestvo segodnya i v budushchem [The Northern Dimension: mutually beneficial cooperation today and in the future] // Sovremennaya Evropa [Contemporary Europe]. 2019, № 3. (In Russian). Available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_39277684\\_95513131.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39277684_95513131.pdf) (accessed 28.10.2020).
5. Heininen L. State of the Arctic Strategies and Policies – A Summary // Arctic Yearbook 2012. Available at: [https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2012/Scholarly\\_Papers/1.Heininen.pdf](https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2012/Scholarly_Papers/1.Heininen.pdf) (accessed 30.10.2020).
6. Exner-Pirot H. The Arctic in International Affairs // The Palgrave Handbook of Arctic Policy and Politics. Palgrave Macmillan, 2020. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-20557-7> (accessed 30.10.2020).
7. Suomen arktinen strategia [Arctic Strategy of Finland]. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja [Publication series of the Office of the Council of State]. 7/2010. (In Finnish). Available at: <https://www.arcticfinland.fi/loader.aspx?id=1d985922-a197-4a9e-b1e8-a6205486ad8d> (accessed 02.11.2020).
8. Suomen arktinen strategia 2013: Valtioneuvoston periaatepäätös 23.8.2013 [Arctic Strategy of Finland 2013: decision in principle of the Council of State 23.8.2013]. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja [Publication series of the Office of the Council of State], 14/2013. (In Finnish). Available at: <https://vnk.fi/documents/10616/334509/Arktinen+strategia+2013/fc8d6442-daa6-4e94-b774-84b863393977> (accessed 02.11.2020).
9. Hallituksen linjaukset arktisen strategian päivityksen painopisteistä [The Government's direction on the priorities of the revision of the Arctic Strategy]. Valtioneuvoston kanslia [Office of the Council of State], 2016. (In Finnish). Available at: <https://vnk.fi/documents/10616/334509/Arktisen+strategian+p%C3%A4ivitys+FIN.pdf/842d4b06-0be3-41c9-bcf7-a93943a63a8b/Arktisen+strategian+p%C3%A4ivitys+FIN.pdf> (accessed 14.11.2020).
10. Coates K. S., Holroyd C. Europe's North: The Arctic Policies of Sweden, Norway, and Finland // The Palgrave Handbook of Arctic Policy and Politics. Palgrave Macmillan, 2020. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-20557-7> (accessed 30.10.2020).
11. Arktisen strategian päivityksen toimenpidesuunnitelma [Schedule of measures of the revision of the Arctic Strategy]. Valtioneuvoston kanslia [Office of the Council of State], 2017. (In Finnish). Available at: <https://vnk.fi/documents/10616/3474615/Arktisen+strategian+toimenpidesuunnitelma/89cbd206-b6c5-4b04-a32a-0585facb6d99/Arktisen+strategian+toimenpidesuunnitelma.pdf> (accessed 14.11.2020).
12. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019: Osallistava ja osaava Suomi — sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta [Program of Prime Minister Sanna Marin's Government 10.12.2019: Inclusive and competent Finland — a socially, economically and ecologically sustainable society]. Helsinki, Valtioneuvoston julkaisuja [Publications of the Council of State], 2019:31. (In Finnish). Available at: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161931/VN\\_2019\\_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161931/VN_2019_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (accessed 15.11.2020).
13. Sweden's strategy for the Arctic region. Government Offices of Sweden, 2020. Available at: <https://www.government.se/4ab869/contentassets/c197945c0be646a482733275d8b702cd/swedens-strategy-for-the-arctic-region-2020.pdf> (accessed 05.12.2020).
14. Sweden's strategy for the Arctic region. Government Offices of Sweden, 2011. Available at: <https://www.government.se/4ab1ed/contentassets/85de9103bbbe4373b55eddd7f71608da/swedens-strategy-for-the-arctic-region> (accessed 05.12.2020).
15. Zhuravel' V. P. Predsedatel'stvo v Arkticheskom sovete: ot Finlyandii k Islandii [The Chairmanship in the Arctic Council: from Finland to Iceland] // Sovremennaya Evropa [Contemporary Europe]. 2019, № 4. (In Russian). Available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_41304623\\_53458840.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41304623_53458840.pdf) (accessed 26.12.2020).



«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.