

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Том 65, № 3, 2019

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2019

Журнал продолжает основанное в 1937 г. периодическое издание «Проблемы Арктики».

Выходит 4 раза в год. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)

The journal continues the series of "Arctic Research", founded in 1937.

Four issues per year. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)

Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Главный редактор – чл.-корр. РАН И.Е. Фролов

Ученый секретарь редколлегии – канд. биол. наук И.А. Алехина (тел. +7 (812) 416-4251)

Литературный редактор – Е.В. Миненко

Члены редколлегии:

д-р геогр. наук Г.В. Алексеев, канд. физ.-мат. наук Л.П. Бобылев, чл.-корр. РАН Н.Б. Вахтин,
д-р Т. Вихма (Финляндия), д-р геогр. наук М.Н. Григорьев, канд. физ.-мат. наук А.И. Данилов,
д-р Д.В. Дивин (Норвегия), чл.-корр. РАН С.А. Добролюбов, **д-р физ.-мат. наук В.В. Иванов**
(зам. главного редактора), **чл.-корр. РАН В.Д. Каминский** (зам. главного редактора),
д-р физ.-мат. наук В.М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Б.В. Козелов, академик РАН В.М. Котляков,
д-р геол.-минерал. наук Г.Л. Лейченко, проф. М. Леппаранта (Финляндия),
канд. геогр. наук В.Я. Липенков (зам. главного редактора), канд. техн. наук В.А. Лихоманов,
академик НАН В.Ф. Логинов (Беларусь), д-р геогр. наук А.С. Макаров, д-р геогр. наук В.Н. Малинин,
д-р физ.-мат. наук А.П. Макштас, проф. А.В. Марченко (Норвегия),
академик РАН Г.Г. Матишов (зам. главного редактора), д-р геогр. наук Е.У. Миронов,
канд. биол. наук А.В. Неелов, д-р геогр. наук А.Ю. Прошутинский (США), академик РАН О.Н. Пугачев,
канд. геогр. наук В.Ф. Радионов, д-р Д. Райно (Франция), д-р физ.-мат. наук В.А. Рожков,
акад. РАН В.А. Румянцев, д-р техн. наук К.Е. Сазонов, д-р техн. наук К.Г. Ставров, проф. Й. Тиде (Германия),
д-р физ.-мат. наук Л.А. Тимохов (зам. главного редактора), чл.-корр. РАН А.А. Тишков,
д-р физ.-мат. наук О.А. Трошичев, чл.-корр. РАН Н.Н. Филатов, д-р геогр. наук К.В. Чистяков

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief – corresponding member of the Russian Academy of Sciences

Ivan E. Frolov

Editorial Secretary – Irina A. Alekhina (phone: +7 (812) 416-4251)

Literary Editor – Elena V. Minenko

Members of the editorial board:

G.V. Alekseev, L.P. Bobylev, K.V. Chistyakov, A.I. Danilov, D.V. Divine (Norway),
S.A. Dobrolyubov, N.N. Filatov, M.N. Grigoriev, **V.V. Ivanov** (deputy of the Editor-in-Chief),
V.D. Kaminsky (deputy of the Editor-in-Chief), V.M. Kattsov, V.M. Kotliakov, B.V. Kozelov,
G.L. Leitchenov, M. Leppäranta (Finland), V.A. Likhomanov, **V.Ya. Lipenkov** (deputy of the Editor-in-Chief),
V.F. Loginov (Belarus), A.S. Makarov, A.P. Makshtas, V.N. Malinin, A.V. Marchenko (Norway),
G.G. Matishov (deputy of the Editor-in-Chief), E.U. Mironov, A.V. Neelov, A.Yu. Proshutinsky (USA),
O.N. Pugachev, V.F. Radionov, D. Raynaud (France), V.A. Rozhkov, V.A. Rumiantsev, K.E. Sazonov,
K.G. Stavrov, **L.A. Timokhov** (deputy of the Editor-in-Chief), J. Tiede (Germany), A.A. Tishkov,
O.A. Troshichev, N.B. Vakhtin, T. Vihma (Finland)

Оригинал-макет и подготовка к печати: А.А. Меркулов. Англоязычное редактирование: Д.Г. Хвостенко.

Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС 77-73644 от 7 сентября 2018 г.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ЭЛ № ФС 77-73287 от 20 июля 2018 г.

Выданы Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал публикует статьи по научным специальностям ВАК 25.00.25, 25.00.27, 25.00.28, 25.00.29, 25.00.30, 25.00.31.

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

e-mail: aaresearch@aari.ru. Сайт журнала: <https://www.aaresearch.science/jour>

Подписные индексы издания в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать»

70279 – на год; 48657 – на полгода; 70278 – на полгода (для предприятий и организаций).

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2019; © Росгидромет, 2019.

СОДЕРЖАНИЕ

ОКЕАНОЛОГИЯ

О.Я. Сочнев, К.А. Корнишин, Я.О. Ефимов, Е.У. Миронов, В.С. Порубаев.
Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода
в юго-западной части Карского моря 239

*I.E. Frolov, V.V. Ivanov, K.V. Filchuk, A.P. Makshtas, V.Yu. Kustov, I.A. Mahotina,
B.V. Ivanov, A.V. Urazgildeeva, V.L. Syoemin, O.L. Zimina, A.A. Krylov, V.A. Bogin,
V.Yu. Zakharov, S.A. Malyshev, E.A. Gusev, P.E. Baryshev, S.V. Pilgaev, S.M. Kovalev,
A.B. Turyakov.* Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean
on the R/V “Akademik Tryoshnikov” (Трансарктика-2019: зимняя экспедиция
в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников») 255

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

O.A. Troshichev, D.A. Sormakov. PC index as a proxy of the solar wind energy that
entered into the magnetosphere (summary) (PC индекс как показатель энергии
солнечного ветра, поступающей в магнитосферу (итоги)) 275

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

Д.О. Владимирова. О разрабатываемом методе анализа ледяных кернов
с высоким разрешением 300

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

А.А. Суханова, С.В. Попов, С.П. Поляков, М.П. Кашкевич, В.Л. Мартьянов.
Георадарные исследования для подготовки взлетно-посадочной полосы
на морском льду в районе полевой базы Оазис Бангера, Восточная Антарктида... 315

В.Ю. Третьяков, С.В. Фролов, М.И. Сарафанов. Изменчивость ледовых условий
плавания по трассам Северного морского пути за период 1997–2018 гг. 328

СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ

Н.Б. Вахтин, Е.В. Лярская. Человеческие и инфраструктурные связи
Арктической зоны РФ: методологические подходы к изучению 341

Памяти Бориса Ивановича Имерекова 353

CONTENTS

OCEANOLOGY

O.Ya. Sochnev, K.A. Kornishin, Ya.O. Yefimov, Ye.U. Mironov, V.S. Porubayev.
Interannual variability of the ice-free period duration in the southwestern Kara Sea..... 239

I.E. Frolov, V.V. Ivanov, K.V. Filchuk, A.P. Makshtas, V.Yu. Kustov, I.A. Mahotina, B.V. Ivanov, A.V. Urazgildeeva, V.L. Syoemin, O.L. Zimina, A.A. Krylov, V.A. Bogin, V.Yu. Zakharov, S.A. Malyshev, E.A. Gusev, P.E. Baryshev, S.V. Pilgaev, S.M. Kovalev, A.B. Turyakov. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov” (in English)..... 255

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

O.A. Troshichev, D.A. Sormakov. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere (summary) (in English)..... 275

GLACIOLOGY AND CRYOLOGY

D.O. Vladimirova. On the high-resolution ice core analysis method under development 300

APPLIED ISSUES

A.A. Sukhanova, S.V. Popov, S.P. Polyakov, M.P. Kashkevich, V.L. Martyanov. GPR research for the organization of the runway on the sea ice in the area of the Bunger Oasis field base, East Antarctica 315

V.Yu. Tretyakov, S.V. Frolov, M.I. Sarafanov. The variability of ice conditions along the Northern sea route for the period 1997–2018 328

SOCIAL GEOGRAPHY AND SOCIAL ANTHROPOLOGY

N.B. Vakhtin, E.V. Liarskaya. Human and infrastructural connectivity of the Arctic zone of the Russian Federation: methodological approaches to research... 341

In memory of Boris I. Imerekov 353

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.326.2(268.52)

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

О.Я. СОЧНЕВ¹, К.А. КОРНИШИН¹, Я.О. ЕФИМОВ², Е.У. МИРОНОВ^{3*}, В.С. ПОРУБАЕВ³

¹ — ПАО «НК «Роснефть», г. Москва, Россия

² — ООО «Арктический научный центр», г. Москва, Россия

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*mir@aari.ru

INTERANNUAL VARIABILITY OF THE ICE-FREE PERIOD DURATION IN THE SOUTHWESTERN KARA SEA

O.Ya. SOCHNEV¹, K.A. KORNISHIN¹, Ya.O. YEFIMOV², Ye.U. MIRONOV^{3*}, V.S.PORUBAYEV³

¹ — PAO "OC "Rosneft", Moscow, Russia

² — ООО "Arctic Research Center", Moscow, Russia

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*mir@aari.ru

Received June, 13, 2019

Accepted July, 30, 2019

Keywords: dates of ice clearance and ice formation, ice-free period, interannual variability, the Kara Sea

Summary

In the coming years, exploration drilling in the geological structures in the Kara Sea is planned. It will be carried out during the ice-free period using floating drilling facilities of a different ice class. The aim of the work is analysis of the interannual variability of duration of the ice-free period in the area of the geological structures the results of which are necessary for planning operational activity of the drilling platforms and optimization of expenses for exploration drilling on the Arctic shelf. For an assessment of interannual variability of the ice-free period duration in the area of the geological structures there were used data on the dates of water area clearance from ice and beginning of ice

Citation: Sochnev O.Ya., Kornishin K.A., Yefimov Ya.O., Mironov Ye.U., Porubayev V.S. Interannual variability of the ice-free period duration in the southwestern Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 239–254. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254.

formation in the southwestern part of the Kara Sea for the period of 30 years on the basis of the AARI weekly ice charts. An analysis of interannual variability of the ice-free period duration showed that a 20-year summer (1989–2008) and a 10-year (2009–2018) intervals could be identified. It is shown that in the last decade as a result of combination of favorable hydrometeorological conditions the ice-free period duration has increased by more than 1 month. An analysis of the main hydrometeorological factors determining the ice-free period duration indicated that it is possible to perform an assessment of duration of exploration drilling operations in the water area of the East-Prinovozemelsky license blocks with a period in advance of several months. Drilling with the use of ice-resistant drilling platform allows us to extend the operation period, as drilling could be started after disappearance of close ice and finished after the ice thickness growth up to 30 cm.

Поступила 13 июня 2019 г.

Принята к печати 30 июля 2019 г.

Ключевые слова: безледный период, даты очищения и ледообразования, Карское море, межгодовая изменчивость.

Рассмотрена межгодовая изменчивость сроков очищения акватории ото льда, начала ледообразования и продолжительность безледного периода в районе геологических структур в юго-западной части Карского моря. Показано, что в последнее десятилетие в результате сочетания благоприятных гидрометеорологических условий продолжительность безледного периода увеличилась более чем на месяц. Анализ основных гидрометеорологических факторов, определяющих продолжительность безледного периода, показал, что возможно выполнять оценку продолжительности операционного периода поисково-разведочного бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков с заблаговременностью в несколько месяцев.

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Приновоземельские лицензионные участки расположены в акватории юго-западной части Карского моря. Географически они ограничены архипелагом Новая Земля с запада, полуостровом Ямал с юга и полуостровом Таймыр с востока. Северо-восточная граница акватории проходит по условной линии, соединяющей мыс Желания и о. Диксон [1, 2]. В акватории лицензионных участков выявлены несколько перспективных на углеводороды структур, местоположение которых показано на рис. 1, а также открыто месторождение «Победа» в районе геологической структуры «Университетская».

В ближайшие годы на геологических структурах в Карском море планируется проведение поисково-разведочного бурения, которое ведется в безледный период с использованием плавучих буровых установок (ПБУ) различного ледового класса. В юго-западной части Карского моря продолжительность безледного периода составляет в среднем два-три месяца, и имеет значительную межгодовую изменчивость [2, 3]. Предварительная оценка возможной продолжительности безледного периода позволит осуществлять планирование операционной деятельности буровых платформ (начало мобилизации, количество скважин, комплекс гидродинамических исследований и т.д.) и, таким образом, оптимизировать затраты на поисково-разведочное бурение на арктическом шельфе.

Продолжительность безледного периода зависит от сроков очищения акватории ото льда и начала ледообразования. Сроки наступления ледовых фаз зависят от особенностей ледового режима в локальных районах Карского моря, которые определяются проявлениями гидрологических и метеорологических факторов, стоком рек, рельефом дна и очертанием берегов. В юго-западной части Карского моря выделены

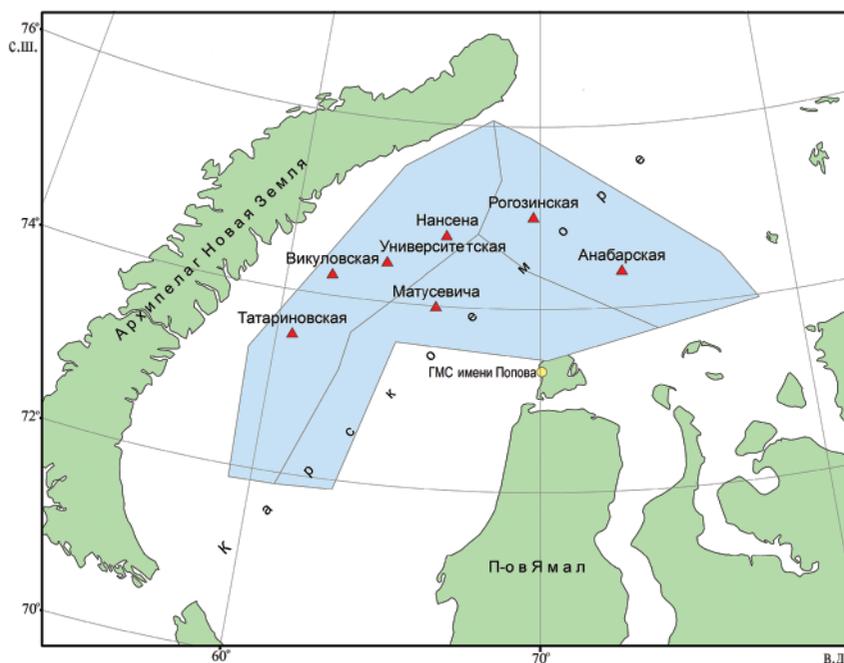


Рис. 1. Расположение геологических структур Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря

Fig. 1. Location of the geological structures of the East-Prinovozemelsky license areas in the southwestern part of the Kara Sea

четыре локальных района, которые имеют однородные ледовые условия, к ним относятся: Ямало-Югорский, Обь-Енисейский, Новоземельский южный и северный районы [2, 4]. Сплошные льды Новоземельского ледяного массива вытаскивают обычно последними. Шесть геологических структур находятся в Новоземельском северном и южном районах, Анабарская структура — в Обь-Енисейском районе (см. рис. 1). На ледовый режим Обь-Енисейского района сильное влияние оказывает сток рек Обь и Енисей, что проявляется в более раннем начале таяния льдов и очищения акватории, а также в более раннем замерзании распресненных вод. Таким образом, необходимо детальное рассмотрение процессов очищения ото льда и замерзания для каждой геологической структуры.

Целью работы является анализ межгодовой изменчивости сроков очищения акватории ото льда, начала ледообразования и безледного периода для оценки продолжительности операционного периода поисково-разведочного бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря.

ДААННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Формирование цифровых массивов ледового картирования для акватории российских арктических морей выполняется на регулярной основе Мировым центром данных по морскому льду (МЦД МЛ) ААНИИ. Ледовая карта является информационным продуктом для комплексного отображения в пространстве характеристик ледяного покрова, она создается на основе экспертного анализа данных наблюдений

и дистанционного зондирования ледяного покрова в соответствии с международными и национальными стандартами ледового картирования. Для анализа данных были использованы ледовые карты ААНИИ с дискретностью одна неделя, построенные на основе спутниковой информации за период с 1989 по 2018 г. (<http://wdc.aari.ru/datasets/>). Использовался 30-летний период, который рекомендуется ВМО для анализа климатических данных. С 1997 г. для хранения и отображения ледовых карт применяется формат SEAGRID-3, который позволяет использовать геопривязанные данные по распределению льда для анализа и их визуализации. В летний период (июнь–сентябрь) карты представлены в виде распределения сплоченности льда, а в зимний период (октябрь–май) в виде распределения льдов разной возрастной градации (толщины).

Для анализа термических условий использовались ежесуточные данные измерений температуры воздуха на гидрометеорологических станциях (ГМС) им. Попова (о. Белый) и о. Диксон из архивов Госфонда (<http://meteo.ru>), как наиболее репрезентативных для акватории юго-западной части Карского моря. На основе этих данных были рассчитаны суммы градусо-дней мороза.

В работе использован критерий дата достижения льдом толщины 30 см в новый сезон замерзания. Толщина льда была рассчитана в каждой точке от фактического момента появления льда на основе эмпирического выражения, связывающего толщину льда с температурой воздуха, которое исходит из теоретической формулы Стефана, показавшего, что толщина льда пропорциональна квадратному корню из суммы градусо-дней мороза. Расчетные данные сопоставлялись с фактическими ледовыми картами распределения возраста льда.

Построение регрессионных зависимостей, оценка коэффициентов корреляции (на 5 % уровне значимости), коэффициентов детерминации и подбор вида аппроксимации временных рядов выполнялся на основе стандартных программ.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРОКОВ ОЧИЩЕНИЯ ОТО ЛЬДА И НАЧАЛА ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА АКВАТОРИИ ВОСТОЧНО-ПРИНОВОЗЕМЕЛЬСКИХ ЛИЦЕНЗИОННЫХ УЧАСТКОВ

Очищение акватории ото льда обычно начинается в первой половине июня, а заканчивается, в зависимости от интенсивности таяния, в течение июля или августа. В работе [2] показано, что межгодовые сроки очищения моря настолько велики, что, когда при экстремально легких ледовых условиях очищение заканчивается, при экстремально тяжелых условиях оно только начинается. Тем не менее продолжительность очищения моря ото льда составляет около шести декад, как при экстремально легких, так и при экстремально тяжелых ледовых условиях.

В качестве критерия очищения использовалась дата исчезновения льда на акватории всех семи геологических структур. Анализ данных за 30 лет показал, что выделяются два периода во временной изменчивости сроков очищения ото льда акватории, где расположены геологические структуры. При построении рис. 2 использованы средние даты очищения и начала замерзания для всех геологических структур. Как видно из рис. 2, граница раздела между периодами находится в интервале от 2007 до 2010 г. В качестве окончания первого периода и начала второго были выбраны 2008 и 2009 гг. соответственно. Выделены 20-летний (1989–2008 гг.) и 10-летний (2009–2018 гг.) периоды. За последнее десятилетие произошло существенное смещение сроков очищения акватории ото льда на более поздние даты.

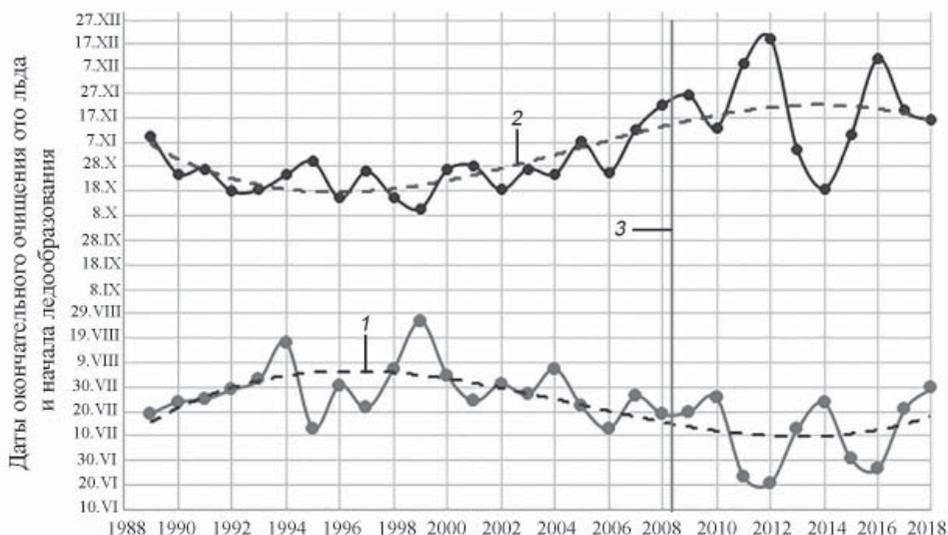


Рис. 2. Межгодовая изменчивость дат очищения акватории ото льда и начала ледообразования на геологических структурах Восточно-Приновоземельских лицензионных участков.

1 — линия тренда дат окончательного очищения, 2 — линия тренда дат начала замерзания, 3 — линия разграничения межгодовых изменений на два периода

Fig. 2. Interannual variability of the dates of water area clearance from ice and beginning of ice formation in the geological structures of the East Prizevozemelsky license blocks.

1 — the trend line of the dates of final clearance, 2 — trend line of the dates of the beginning of freezing, 3 — line of delimitation of interannual changes into two periods

Межгодовая изменчивость дат очищения ото льда и начала замерзания аппроксимированы функциями полинома третьей степени (линии тренда). Анализ рис. 2 показывает, что сами графики и линии тренда близки к зеркальному отражению друг друга. Это свидетельствует о том, что изменения в ледовых фазах происходят с синхронной составляющей, обусловленной единой причиной. Совместный анализ межгодового хода температур воздуха, дат очищения ото льда и начала замерзания показал, что основным фактором, определяющим сроки очищения акватории ото льда и начала замерзания в районе большинства геологических структур, является степень суровости предшествующего холодного сезона, количественно выражаемая суммой градусо-дней мороза периода отрицательных температур.

В табл. 1 приведены статистические характеристики сроков окончательного очищения акватории ото льда на геологических структурах Восточно-Приновоземельских лицензионных участков и смещение дат очищения за два рассмотренных периода: 20 и 10 лет.

В период с 1989 по 2008 г. средние даты очищения ото льда приходились на конец июля – начало августа. Лишь на структуре Анабарская средняя дата очищения была относительно ранней (13 июля). Размах в датах очищения ото льда в эти годы изменялся в пределах 55–92 дня, при этом среднеквадратическое отклонение (СКО) было значительно меньше, составляя 13–21 день. За последнее десятилетие (2009–2018 гг.) средние даты очищения отмечались в первой половине июля. Раз-

**Средние и экстремальные даты окончательного очищения акватории ото льда
за периоды 20 (1989–2008 гг.) и 10 лет (2009–2018 гг.)
в районе геологических структур юго-западной части Карского моря**

Структуры	Даты очищения ото льда за период 20 лет (1989–2008 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Даты очищения ото льда за период 10 лет (2009–2018 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Смещение дат таяния за периоды 20 и 10 лет, дни		
	ранняя	средняя	поздняя			ранняя	средняя	поздняя			ранних	средних	поздних
Рогозинская	12.07.01	29.07	05.09.94	14	55	23.06.15	17.07	03.08.18	16	41	19	13	33
Нансена	08.07.01	31.07	06.09.99	14	60	19.06.12	15.07	13.08.17	17	55	19	16	24
Университетская	28.06.95	31.07	23.08.94	14	56	15.06.12	12.07	10.08.17	18	56	13	18	13
Викуловская	28.06.95	05.08	28.09.99	20	92	11.06.11	12.07	13.08.10	21	63	17	25	46
Татариновская	21.06.95	02.08	06.09.99	21	77	04.06.11	09.07	10.08.10	22	67	17	24	27
Матусевича	22.06.05	25.07	02.09.94	17	72	12.06.12	10.07	04.08.17	17	53	10	14	29
Анабарская	08.06.05	13.07	03.08.99	13	56	01.06.15	03.07	25.07.13	20	54	7	10	9

мах составил 41–67 дней, а СКО 16–21 день. На структуре Анабарская за последнее десятилетие средняя дата очищения ото льда, так же, как и в предыдущий период, является самой ранней по сравнению с датами на остальных структурах и приходится на 3 июля.

В последнее десятилетие произошло смещение сроков очищения в сторону более ранних дат. Смещение средних дат, в зависимости от структуры, изменялось от 10 до 25 дней, причем наименьшее смещение имело место на структуре Анабарская и составило 10 дней.

Анализ данных многолетней изменчивости сроков ледообразования за 30 лет (см. рис. 2) показал, что также имеются существенные отличия начала сроков замерзания за период 20 лет (1989–2008 гг.) и 10 лет (2009–2018 гг.). За последнее десятилетие произошло значительное смещение сроков ледообразования на более поздние даты, и оно составило от 15 до 30 суток в зависимости от структуры. В табл. 2 приведены общие статистические характеристики сроков ледообразования на геологических структурах Восточно-Приновоземельских лицензионных участков за два рассмотренных периода 20 и 10 лет.

В период 1989–2008 гг. средние даты начала ледообразования отмечались во второй половине октября. Исключение составила дата на структуре Татариновская, где средняя дата начала ледообразования отмечалась позже и приходилась на 7 ноября. Размах между поздними и ранними датами начала ледообразования в этот период составлял 37–54 дня.

Средние даты ледообразования за последнее десятилетие (2009–2018 гг.) сместились на ноябрь, а на структуре Татариновская на 2 декабря. Размах между поздними и ранними датами в этот период увеличился до 38–74 дней. Среднеквадратическое отклонение сроков ледообразования изменялось от 14 до 26 дней в зависимости от расположения геологических структур.

Средние и экстремальные даты начала ледообразования за периоды 20 (1989–2008 гг.) и 10 лет (2009–2018 гг.) в районе геологических структур юго-западной части Карского моря

Структуры	Даты ледообразования за период 20 лет (1989–2008 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Даты ледообразования за период 10 лет (2009–2018 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Смещение дат ледообразования за периоды 10 и 20 лет, дни		
	ранняя	средняя	поздняя			ранняя	средняя	поздняя			ранних	средних	поздних
Рогозинская	05.10.96	21.10	22.11.08	13	48	16.10.14	16.11	29.12.11	26	74	11	26	37
Нансена	04.10.99	23.10	22.11.08	12	49	15.10.14	17.11	22.12.12	22	68	11	26	30
Университетская	07.10.96	27.10	24.11.08	13	48	22.10.14	23.11	24.12.12	21	63	15	27	30
Викуловская	12.10.92	30.10	29.11.08	14	48	22.10.14	29.11	30.12.11	24	69	10	30	31
Татариновская	17.10.98	07.11	07.12.05	14	51	23.10.14	02.12	31.12.11	23	69	6	25	24
Матусевича	06.10.96	30.10	29.11.08	16	54	18.10.14	23.11	28.12.12	24	71	12	23	29
Анабарская	02.10.98	18.10	08.11.08	10	37	15.10.14	02.11	22.11.12	14	38	13	15	14

Для сроков замерзания юго-западной части Карского моря характерна большая пространственная неоднородность, продолжительность распространения замерзания по акватории составляет более одного месяца. Раннее замерзание происходит в северных районах моря, а также в Обь-Енисейском районе, где происходит распределение моря за счет притока речных вод. Сравнительно позднее замерзание характерно для юго-западной части акватории, что обусловлено затоком теплых вод из Баренцева моря через пролив Карские Ворота.

Анализ изменчивости дат очищения ото льда и начала ледообразования на акваториях геологических структур Восточно-Приноземельских лицензионных участков, при учете степени связи сроков очищения и ледообразования с суммой градусо-дней мороза, позволяет разделить геологические структуры на две группы. Геологические структуры Анабарская, Матусевича и Рогозинская следует отнести к Обь-Енисейскому району, остальные четыре структуры к Новоземельскому району.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СРОКИ ОЧИЩЕНИЯ АКВАТОРИИ ОТО ЛЬДА И ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

Основные природные факторы, определяющие сроки начала таяния и замерзания в арктических морях, описаны в работе [5]. После устойчивого перехода теплового бюджета верхней снежно-ледяной поверхности к положительным значениям начинается процесс таяния льдов. По мере увеличения поступления солнечной радиации и распространения снежниц нарастает интенсивность таяния. Летние воздушные переносы из Арктического бассейна приносят холодные воздушные массы, что существенно уменьшает интенсивность таяния. Воздушные массы из Северной Атлантики и со стороны прогретого материка, напротив, способствуют очищению моря [2].

В связи с неоднородностью возрастного состава (толщины) ледяного покрова сначала вытаивает более тонкий лед позднего зимнего образования, а затем лед

осеннего образования. Основным фактором, определяющим сроки очищения акватории ото льда, является площадь и толщина ледяного покрова, образовавшегося за весь предшествующий холодный сезон. Процесс таяния на акватории будет осуществляться тем дольше, чем больше толщина льда, и большую площадь будет занимать однолетний толстый лед.

Косвенную оценку максимальной толщины льда можно выполнять по сумме градусо-дней мороза за предшествующий холодный сезон. Выполненные расчеты показывают, что связь сроков очищения с суммой градусо-дней мороза для некоторых геологических структур характеризуется коэффициентом корреляции более 0,8.

Анализ архивных данных дает основание полагать, что прогнозирование будет эффективным для случаев ранних и поздних сроков очищения ото льда. Это позволит уточнить метод ледового прогноза ААНИИ по Карскому морю, утвержденный Центральной методической комиссией Росгидромета [6] (как по заблаговременности, так и по точности для отдельных геологических структур). Средние сроки очищения акватории ото льда характеризуются достаточно большим диапазоном изменения значений суммы градусо-дней мороза, что снижает возможность точной оценки ожидаемого срока окончательного таяния и требует учета других факторов, влияющих на процессы очищения ото льда. В этом случае процесс таяния во многом зависит от даты перехода температуры воздуха к положительным значениям и повторяемости адвекции теплых воздушных масс. Косвенно эти процессы характеризуют среднемесячные значения температуры воздуха в летний период. Учет таких факторов предпочтительно производить на основе метода локально-генетической типизации ледовых условий [4].

Значимыми гидрометеорологическими факторами, определяющими большую межгодовую изменчивость сроков ледообразования в юго-западной части Карского моря, являются теплосодержание моря, приток теплых вод, переносы воздушных масс с различной температурой и влажностью [2].

Для района семи геологических структур Восточно-Приновоземельских лицензионных участков теплозапас воды является основным фактором, влияющим на сроки замерзания. Накопление теплозапаса водных масс происходит в течение безледного периода, который определяется сроками очищения ото льда. Чем раньше произойдет таяние ледяного покрова, тем больше окажется период времени для формирования теплозапаса. Как указано выше, сроки очищения ото льда зависят от суммы градусо-дней мороза за предшествующий холодный период. Зависимость дат начала замерзания от суммы градусо-дней мороза за предшествующий холодный период для рассматриваемых структур также высокая и в среднем характеризуется коэффициентом корреляции 0,82. Таким образом, сроки очищения акватории ото льда и начала ледообразования во многом определяются одним и тем же фактором — суровостью предшествующего холодного сезона, который оценивается по сумме градусо-дней мороза.

Корреляционная связь сроков очищения и ледообразования с суммой градусо-дней мороза хорошо выражена в районах геологических структур Нансена, Университетская, Рагозинская, Викуловская и Татариновская. В районе структур Матусевича и Анабарская связь менее четкая. Эти структуры расположены в районе Ямальского и Обь-Енисейского течений, которые могут оказывать существенное влияние на сроки очищения и ледообразования.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА

Промежуток времени от даты очищения акватории до начала замерзания составляет продолжительность безледного периода. На рис. 3 показана изменчивость продолжительности безледного периода в районе геологических структур юго-западной части Карского моря за последние 30 лет. Изменчивость характеризуется короткопериодными произвольными флуктуациями, которые обусловлены влиянием различных факторов и долгопериодной цикличностью, обусловленной климатическими изменениями за периоды более 10 лет [7]. Под цикличностью в данном случае понимается повторяющееся возвращение продолжительности безледного периода к исходному значению. В монографии [8] выполнен анализ спектральной плотности колебаний многолетних значений площади льда и показано, что в западных арктических морях значительную роль играют циклы продолжительностью около 50 и 20 лет. Их общий вклад превышает 30 %, аналогичный вывод получен и для ряда других характеристик ледяного покрова (толщина льда, ледообмен и др.). В работе [9] показано, что продолжительность безледного периода имеет значимый цикл около 60 лет, который необходимо учитывать при климатических оценках.

Преобладающим фактором, определяющим короткопериодную межгодовую изменчивость безледного периода в этой части моря для большинства геологических структур, является степень суровости предшествующего холодного сезона (сумма градусо-дней мороза за предшествующий холодный период). Другие факторы, проявляющиеся в отдельные годы, могут нарушить зависимость продолжительности безледного периода от суммы градусо-дней мороза, что усложняет оценку сроков очищения и начала замерзания на конкретный сезон.

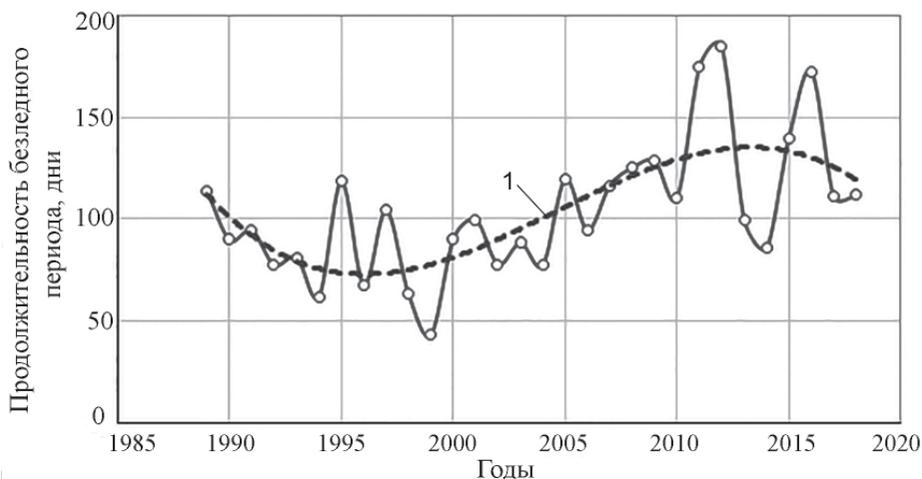


Рис. 3. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода с 1989 по 2018 г. в районе Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря.

1 — линия тренда, аппроксимация полиномом третьей степени

Fig. 3. Interannual variability of the ice-free period duration from 1989 to 2018 in the East Prinovozemelsky license block in the southwestern part of the Kara Sea.

1 — trend line, approximation by a third-degree polynomial

Кроме короткопериодных флуктуаций на интервале 30 лет выделяются два периода, средние значения и стандартные отклонения которых существенно отличаются. По аналогии с выделением двух временных интервалов по срокам очищения ото льда (рис. 2) для продолжительности безледного периода в качестве окончания первого временного интервала и начала второго были выбраны 2008 и 2009 гг., соответственно. Выделены 20-летний (1989–2008 гг.) и 10-летний (2009–2018 гг.) периоды. Эмпирическая кривая за 30 летний ряд также аппроксимирована полиномом третьей степени (рис. 3).

В последнее десятилетие продолжительность безледного периода существенно увеличилась по сравнению с предшествующим периодом. Его средние, экстремальные значения и стандартные отклонения для районов геологических структур приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние и экстремальные значения продолжительности безледного периода на акватории геологических структур Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря

Структуры	Продолжительность безледного периода за 20 лет (1989–2008 гг.), дни				Продолжительность безледного периода за последние 10 лет (2009–2018 гг.), дни				Увеличение продолжительности безледного периода за последние 10 лет, дни		
	минимум	средняя	максимум	СКО	минимум	средняя	поздняя	СКО	минимум	среднее	максимум
Рогозинская	42	84	126	22	75	123	180	37	33	39	54
Нансена	28	84	124	23	82	126	186	34	54	42	62
Университетская	59	88	127	23	89	134	192	36	30	46	65
Викуловская	16	86	130	29	88	140	202	42	72	54	72
Татариновская	44	96	149	30	90	146	210	42	46	49	61
Матусевича	48	98	155	29	86	135	199	38	38	38	44
Анабарская	65	97	141	17	82	122	152	26	17	24	11

В среднем продолжительность безледного периода за последние 10 лет, по сравнению с периодом за последние 20 лет, увеличилась более чем на один месяц. Увеличилось также и среднеквадратическое отклонение этой характеристики. Большая дисперсия продолжительности периода открытой воды, ее высокие значения в последнее десятилетие приводят к необходимости детального рассмотрения влияющих на него факторов и выделения нескольких сценарных условий, принципиальных для проведения поискового бурения.

Для каждой из структур может быть построена линейная регрессионная зависимость между числом градусо-дней мороза (ГДМ) на гидрометеорологической станции, расположенной на о. Белый, и продолжительностью операционного периода. Для четырех структур: Нансена, Университетская, Викуловская и Татариновская, где зависимость хорошо выражена ($R = 0,83–0,87$), можно разработать методику по определению даты очищения ото льда и даты начала замерзания, основываясь на учете данных по температуре воздуха за прошедший холодный сезон. Для оценки параме-

тров безледного периода в районе геологических структур Рогозинская, Матусевича и Анабарская, где связь менее четкая ($R = 0,70-0,75$), необходимо учитывать влияние и других факторов, рассмотренных выше, что выходит за рамки данной статьи.

СЦЕНАРИИ ОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ

Бурение с использованием неледостойкой передвижной платформы (СПБУ, ППБУ) ограничено наличием чистой воды на акватории, где производятся работы. Определяющими факторами при выборе сценария операционного периода являются продолжительность безледного периода, а также даты его начала и окончания. Примером подобной организации работ является поисково-разведочное бурение, выполненное ПАО «НК «Роснефть»» в Карском море в 2014 г. Бурение выполнялось с неледостойкой ППБУ «West Alpha» (рис. 4) в безледный период с июля по октябрь.



Рис. 4. ППБУ «West Alpha» в Карском море в 2014 г.

Fig. 4. «West Alpha» Floating Drilling Rig in the Kara Sea in 2014

Анализ продолжительности безледного периода за 10 последних лет (2009–2018 гг.) позволил выделить три типа периодов: короткий, средний и длительный. На основе таких же критериев было выделено количество таких типов за период 20 лет (1989–2008 гг.). Характеристики продолжительности трех типов операционного периода приведены в табл. 4.

В период с 1989 по 2008 г. длительных безледных периодов практически не было. Преобладали годы с короткими безледными периодами. В последнее десятилетие ледовые условия стали более благоприятными, стали чаще отмечаться средние и несколько реже длительные безледные периоды. Вероятность благоприятных условий в последнее десятилетие составляла около 80 %.

Основными вопросами с точки зрения ледовых условий при планировании поисково-разведочного бурения неледостойкой платформой на Восточно-Приновоземельских лицензионных участках являются: дата мобилизации буровой платформы к проливу Карские Ворота и продолжительность безледного периода в районе геологических структур. Продолжительность бурения и первоочередных испытаний скважины выбирается исходя из левой границы интервала операционного периода, а правая граница учитывается при планировании дополнительных испытаний скважины.

Несмотря на теоретическую возможность использования неледостойких платформ в коротком безледном периоде, максимальная эффективность достигается при

**Характеристики продолжительности трех типов операционного периода
для неледостойкой платформы на геологических структурах
за периоды 1989–2008 гг. и 2009–2018 гг.**

Характеристики	Периоды											
	короткий (<100 суток)				средний (100–150 суток)				длительный (>150 суток)			
	Количество лет	%	Средняя продолжит. дни	Средняя ГДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит. дни	Средняя ДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит. дни	Средняя ГДМ
1989–2008 гг.												
Рогозинская	15	75	75	4165	5	25	109	3644	0	0	Нет*	Нет
Нансена	14	70	73	4194	6	30	109	3706	0	0	То же	То же
Университетская	13	65	74	4181	7	35	115	3799	0	0	“	“
Викуловская	12	60	68	4243	8	40	113	3755	0	0	“	“
Татариновская	10	50	72	4222	10	50	120	3873	0	0	“	“
Матусевича	11	55	76	4198	8	40	120	3881	1	5	155	3723
Анабарская	12	60	86	4059	8	40	114	1030	0	0	Нет	Нет
2009–2018 гг.												
Рогозинская	4	40	88	3471	3	30	120	3636	3	30	171	2779
Нансена	2	20	85	3511	5	50	116	3554	3	30	162	2779
Университетская	1	10	89	3717	6	60	118	3512	3	30	180	2779
Викуловская	2	20	88	3826	5	50	128	3428	3	30	194	2779
Татариновская	1	10	90	3717	5	50	122	3521	4	40	189	2952
Матусевича	2	20	92	3626	5	50	123	3508	3	30	185	2779
Анабарская	2	20	83	3626	7	70	128	3351	1	10	152	2418

Примечание. * — длительных безледных периодов (> 150 суток) не было.

длительном и среднем безледном периоде. В любом случае планирование работ должно базироваться на прогнозе даты окончательного очищения ото льда, при учете прогнозируемой продолжительности безледного периода. Имеется принципиальная возможность определения длительного сезона в начале мая, в тех случаях, когда сумма градусо-дней мороза по данным гидрометеорологических станций будет достаточно низкой. Неблагоприятный дрейф в течение лета не сможет существенно изменить дату окончательного очищения, так как из-за относительно малого объема льда процессы таяния будут преобладать над процессами дрейфа льда.

В случае короткого безледного периода (<100 суток) возможно строительство одной поисково-разведочной скважины, включая мобилизацию, непосредственно бурение и цементирование скважины, минимальный перечень геофизических и гидродинамических испытаний. В случае длительного безледного периода (>150 суток) появляется возможность строительства двух скважин за сезон. Данный выбор обусловлен ранним открытием структур ото льда и поздним их закрытием, что позволяет произвести работы на второй структуре. Бурение должно быть начато со структуры, для которой прогноз ледовых фаз наиболее благоприятный. При средней продолжительности безледного периода возможно планирование бурения как одной, так и двух скважин.

**СЦЕНАРИИ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ
ОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА ДЛЯ ЛЕДОСТОЙКОЙ ПЛАТФОРМЫ
ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ**

При использовании ледостойкой платформы появляется возможность расширения операционного периода за счет начала бурения непосредственно после понижения сплоченности льда до определенной градации в период таяния и окончания бурения после нарастания толщины льда до 30 см, которые были приняты пограничными условиями безопасной эксплуатации ледостойкой платформы. При этом возможны несколько вариантов расширения операционного периода в зависимости от выбранных дат начала и окончания операционного периода.

Для периода 2009–2018 гг. были определены даты наличия последнего сплоченного льда после начала процесса таяния и рассчитаны даты достижения льдом толщины 30 см в новый сезон замерзания. Статистические характеристики таких дат на акваториях геологических структур приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Статистические характеристики последних дат наличия сплоченного льда
и достижения льдом толщины 30 см**

Геологические структуры	Даты наблюдения наличия последнего сплоченного льда за период 2009–2018 гг.			СКО, дни	Даты достижения льдом толщины 30 см за период 2009–2018 гг.			СКО, дни
	ранняя	средняя	поздняя		ранняя	средняя	поздняя*	
Рогозинская	08.06.15	05.07	25.07.18	17	17.11.13	09.12	19.01.12	21
Нансена	10.06.12	05.07	01.08.17	17	17.11.14	13.12	08.01.12	17
Университетская	05.06.12	04.07	01.08.17	17	21.11.13	17.12	20.01.12	20
Викуловская	08.06.11	01.07	25.07.17	16	21.11.14	21.12	20.01.12	21
Татариновская	23.05.11	30.06	23.07.10	20	21.11.14	22.12	20.01.12	20
Матусевича	05.06.12	30.06	26.07.17	16	18.11.13	15.12	16.01.12	20
Анабарская	18.05.15	14.06	16.07.18	20	17.11.13	01.12	21.12.12	11

Примечание. * — нарастание толщины льда до 30 см в холодный сезон 2011–2012 гг. в районе большинства геологических структур произошло не в конце 2011 г., а в начале 2012 г.

При среднесезонных условиях в юго-западной части Карского моря преобладание сплоченного льда прекращается в период с середины июня до первых чисел июля. В следующем ледовом сезоне лед достигает толщины 30 см, в среднем, в течение декабря.

Сведения, приведенные в табл. 5, показывают, что раннее исчезновение сплоченного льда отмечалось в 2011, 2012 и 2015 гг., когда ледовые условия были аномально легкими. Позднее исчезновение сплоченного льда имело место в районе большинства геологических структур в 2017 и 2018 гг.

За последнее десятилетие самое раннее нарастание льда до 30 см на геологических структурах отмечалось в 2013 и 2014 гг., самое позднее на шести из семи рассмотренных геологических структур в ледовый сезон 2011–2012 гг., который характеризовался положительными аномалиями температуры воздуха. На станции Анабарская самое позднее появление льда с толщиной 30 см произошло тоже в 2012 г., но уже в сезон 2012–2013 гг., лед достиг толщины 30 см в декабре 2012 г.

В табл. 6 приведены характеристики операционного периода для ледостойкой платформы трех групп продолжительности, от последней даты сплоченного льда до

**Повторяемость, средняя продолжительность трех типов операционного периода
для ледостойкой платформы и средняя сумма градусо-дней мороза (ГДМ)
на геологических структурах для каждого типа за период 2009–2018 гг.**

Характеристики	Периоды											
	короткий (<140 дней)				средний (140–200 дней)				длительный (>200 дней)			
	Количество лет	%	Средняя продолжит., дни	Средняя ГДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит., дни	Средняя ГДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит., дни	Средняя ГДМ
Рогозинская	5	50	130	3477	3	30	168	3400	2	20	210	2771
Нансена	2	20	125	3511	6	60	158	3482	2	20	206	2606
Университетская	2	20	133	3626	5	50	158	3508	3	30	210	2779
Викуловская	1	10	129	3717	6	60	157	3512	3	30	220	2779
Татариновская	2	20	136	3826	5	50	160	3428	3	30	226	2779
Матусевича	3	30	134	3519	5	50	169	3406	2	20	215	2771
Анабарская	2	20	135	3431	7	70	176	3306	1	10	201	3124

даты достижения льдом толщины 30 см. Критерии разделения на 3 типа приведены в шапке таблицы.

При таких критериях выбора продолжительности операционного периода больше половины случаев за последние 10 лет приходятся на средний период. Средняя продолжительность такого типа составляет около 160 дней. Короткий операционный период имел место в одном-двух случаях из десяти, исключение составили структуры Рогозинская и Матусевича, где короткий тип составил пять и три случая соответственно. Продолжительность такого типа операционного периода составила около 130 дней. Длительный тип операционного периода имел место лишь в 10–30 % случаев, продолжительность его составляла в среднем около 210 суток.

С учетом вышеизложенного, применение ледостойкой буровой платформы позволяет расширить сезон бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков и практически гарантировать бурение двух скважин за сезон. При этом около трети времени работы будут производиться в ледовых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В межгодовой изменчивости продолжительности безледного периода выделяются 20-летний (1989–2008 гг.) и 10-летний (2009–2018 гг.) интервалы. В последнее десятилетие продолжительность и амплитуда безледного периода существенно увеличились по сравнению с предыдущим 20-летним периодом, в среднем более чем на месяц и составили 122–146 дней при СКО 14–26 дней в зависимости от положения геологической структуры.

Сроки очищения акватории ото льда и начала льдообразования на значительной площади акватории юго-западной части Карского моря во многом определяются одним и тем же фактором — суровостью предшествующего холодного сезона, который оценивается по сумме градусо-дней мороза.

Продолжительность безледного периода определяется гидрометеорологическими факторами за предшествующий зимний период (показатель — интегральная

отрицательная температура воздуха) и в летний период (показатели — дата очищения акватории ото льдов, температура воздуха, теплозапас моря). Для каждой из структур может быть построена линейная регрессионная зависимость между числом градусо-дней мороза и продолжительностью операционного периода.

Бурение с использованием неледостойкой буровой платформы ограничено наличием чистой воды на акватории, где производятся работы. Анализ продолжительности безледного периода позволил выделить три типа: короткий, средний и длительный периоды. При планировании поисково-разведочного бурения неледостойкой платформой основными параметрами являются: дата мобилизации буровой к проливу Карские Ворота и продолжительность безледного периода в районе геологических структур.

Бурение с использованием ледостойкой буровой платформы позволяет расширить операционный период, так как бурение можно начинать после исчезновения сплоченного льда, а завершать после нарастания толщины льда до 30 см. Анализ продолжительности операционного периода позволил выделить также три типа: короткий, средний и длительный периоды. Применение ледостойкой буровой платформы позволяет расширить сезон бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков и практически гарантировать бурение двух скважин за сезон, при этом около трети времени работы будут производиться в ледовых условиях.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках инновационной программы ПАО «НК «Роснефть»».

Acknowledgements. The investigations were performed as a part of the innovative activity of Public joint-stock company “NK “Rosneft”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Изд. ГУНИО МО, 1980. 185 с.
2. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей / Под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб.: ААНИИ, 2004. 320 с.
3. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики: обобщение фондовых материалов и результаты экспедиционных исследований ООО «АНПЦ» в 2012–2014 гг. / Под ред. В.А. Павлова, О.А. Вербицкой, Е.У. Миронова, П.А. Тарасова, К.А. Корнишина. М.: «Нефтяное хозяйство», 2015. 128 с.
4. Егоров А.Г., Спичкин В.А. Метод локально-генетической типизации ледовых условий // Труды ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 146–163.
5. Спичкин В.А. Основные природные факторы, определяющие аномалии сроков начала ледообразования в морях сибирского шельфа // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 81–92.
6. Егоров А.Г. Долгосрочный прогноз количества и распределения сплоченных льдов в море Лаптевых в летний период // Информационный сборник ГМЦ РФ «Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов». 2002. № 29. С. 120–136.
7. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
8. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа // Научные исследования в Арктике. Т. 2. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
9. Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В. Оценка перспектив навигации по Северному морскому пути на основе комбинированного прогностического сценария // Труды ГОИН. 2018. Вып. 219. С. 249–268.

REFERENCES

1. *Atlas okeanov. Severniy Ledovitiy ocean*. Atlas of the oceans. Arctic Ocean. Moscow: Naval Administration, Ministry of Defence Publ., 1980: 185 p. [In Russian].
2. *Izmenchivost prirodnykh usloviy v shelfovoy zone Barentseva i Karskogo morey*. Variability of the natural conditions in the shelf zone of the Barents and Kara Seas. Ed. A.I. Danilov, E.U. Mironov, V.A. Spichkin. St. Petersburg: AARI, 2004: 320 p. [In Russian].
3. *Atlas gidrometeorologicheskikh i ledoviykh usloviy morey rossiyskoy Arctiki: obobshchenie fondoviykh materialov i rezultati ekspeditsionnykh issledovaniy OOO "ANPC" v 2012–2014 gg.* Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic: generalization of stock materials and the results of the expeditionary research of Ltd "ANPC" in 2012–2014. Ed. V.A. Pavlov, O.A. Verbitskaya, E.U. Mironov, P.A. Tarasov, K.A. Kornishin. Moscow: "Neftianoe Hoziaystvo" pub., 2015: 128 p. [In Russian].
4. *Egorov A.G., Spichkin V.A.* The method of local genetic typification of ice conditions. *Trudy Arkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1994, 432: 146–163. [In Russian].
5. *Spichkin V.A.* The main natural factors that determine the anomalies of the timing of the beginning of ice formation in the seas of the Siberian shelf. *Trudy Arkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI, 1987, 402: 81–92. [In Russian].
6. *Egorov A.G.* Long-term forecast of the quantity and distribution of cohesive ice in the Laptev Sea in the summer. *Informatsionniy sbornik GMTS RF. "Rezultati ispitaniy noviy i usovershenstvovaniykh metodov gidrometeorologicheskikh prognozov"*. Information collection of the RF GMC "Results of testing new and improved methods of hydrometeorological forecasts". 2002, 29: 120–136. [In Russian].
7. *Monin A.C.* *Prognoz pogodi kak zadacha fiziki*. Weather forecast as a physics problem. Moscow: Nauka, 1969: 184 p. [In Russian].
8. *Frolov I.E., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E., Smolyanitsky V.* *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskie izmeneniya ledjanogo pokrova morey Evraziyskogo shel'fa*. Scientific research in the Arctic. V. 2. Climate Change of ice cover extent in Eurasian Arctic Shelf Seas. St. Petersburg: Nauka, 2007: 136 p. [In Russian].
9. *Dianskiy N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V.* Evaluation of the prospects for navigating the Northern Sea Route based on a combined prognostic scenario. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. Proc. SOI. 2018, 219: 249–268 p. [In Russian].

УДК 551.465

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274

TRANSARKTIKA-2019: WINTER EXPEDITION IN THE ARCTIC OCEAN ON THE R/V “АКАДЕМИК ТРЫОШНИКОВ”

I.E. FROLOV¹, V.V. IVANOV^{1,2}, K.V. FILCHUK¹, A.P. MAKSHITAS¹, V.YU. KUSTOV¹,
I.A. MAHOTINA¹, B.V. IVANOV^{1,3}, A.V. URAZGILDEEVA³, V.L. SYOEMIN⁴, O.L. ZIMINA⁵,
A.A. KRYLOV^{3,6}, V.A. BOGIN⁶, V.Yu. ZAKHAROV⁶, S.A. MALYSHEV⁶, E.A. GUSEV⁶,
P.E. BARYSHEV¹, S.V. PILGAEV⁷, S.M. KOVALEV¹, A.B. TURyakov¹*

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ — St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁴ — Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

⁵ — Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

⁶ — VNIIOkeangeologiya, St. Petersburg, Russia

⁷ — Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

*vladimir.ivanov@aari.ru

ТРАНСАРКТИКА-2019: ЗИМНЯЯ ЭКСПЕДИЦИЯ В СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН НА НЭС «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ»

И.Е. ФРОЛОВ¹, В.В. ИВАНОВ^{1,2}, К.В. ФИЛЬЧУК¹, А.П. МАКШТАС¹, В.Ю. КУСТОВ¹,
И.А. МАХОТИНА¹, Б.В. ИВАНОВ^{1,3}, А.В. УРАЗГИЛЬДЕЕВА³, В.Л. СЁМИН⁴, О.Л. ЗИМИНА⁵,
А.А. КРЫЛОВ^{3,6}, В.А. БОГИН⁶, В.Ю. ЗАХАРОВ⁶, С.А. МАЛЫШЕВ⁶, Е.А. ГУСЕВ⁶,
П.Е. БАРЫШЕВ¹, С.В. ПИЛЬГАЕВ⁷, С.М. КОВАЛЕВ¹, А.Б. ТЮРЯКОВ¹*

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ — Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

⁵ — Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск, Россия

⁶ — ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

⁷ — Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*vladimir.ivanov@aari.ru

Citation: Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 255–274. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274.

Keywords: Arctic Ocean, Barents Sea, field observations, geology, geophysics, hydrobiology, meteorology, oceanography, sea ice.

Summary

Preliminary results of the Transarktika-2019 winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov” are presented. The expedition program included studies on meteorology, hydrology, hydrochemistry, hydrobiology, geology, geophysics and an extensive complex of ice measurements in the Northern Barents Sea from the drifting ice and from the ship. During the expedition, it was possible to complete a wide range of tasks. The data obtained comprise a unique material for a comprehensive study of the current state of the environmental conditions in the Barents Sea. This paper highlights the most significant preliminary results of multidisciplinary observations in various environments, which will be further comprehensively analyzed and published in separate thematic articles.

Поступила 7 августа 2019 г.

Принята к печати 23 сентября 2019 г.

Ключевые слова: Баренцево море, геология, геофизика, гидробиология, метеорология, морской лед, океанография, полевые наблюдения, Северный Ледовитый океан.

Представлены предварительные результаты зимней экспедиции «Трансарктика-2019» в Северном Ледовитом океане на НЭС «Академик Трёшников». Программа экспедиции включала в себя исследования по метеорологии, гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, геологии, геофизике и обширному комплексу измерений ледяного покрова в северной части Баренцева моря с дрейфующего льда и с борта судна. Во время экспедиции удалось выполнить широкий круг задач. Полученные данные представляют собой уникальный материал для всестороннего изучения текущего состояния условий окружающей среды в Баренцевом море. В статье обозначены наиболее значимые предварительные результаты междисциплинарных наблюдений в различных средах, которые в дальнейшем будут всесторонне проанализированы и опубликованы в отдельных тематических статьях.

1. INTRODUCTION

On May 20, 2018, with the arrival of the research vessel “Akademik Tryoshnikov” in Murmansk, the first stage of the “Transarktika-2019” multidisciplinary expeditionary program of the Roshydromet of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation (<http://www.aari.ru/transarctica2019/transarctica2019.html>) was completed. In total, under the program in 2019, four marine expeditions to the Russian Arctic seas and the adjacent deep-water part of the Arctic basin are planned. A distinctive feature of the first stage was conducting field research at the end of the winter season, when the Arctic ice cover reaches seasonal maximum. Despite the obvious navigational difficulties, the value of scientific information obtained during this period of a year is very high. This is due to the fact that key physical processes, which shape the water mass structure, exhibit pronounced annual variability. Thence, the measurements made in this season, allows better understanding of the driving forces and verification of the validity of the existing theoretical concepts. An important task of the expedition was the online transfer of the obtained information on land, thus providing Russian contribution to the international PPP (Polar Prediction Project) program of WMO. Three-hour meteorological and 12-hour aerologic observations, continuous geophysical measurements, as well as information on ice drift and meteorological parameters from 6 buoys installed at spaced points were permanently transmitted on land. The scientific staff of the expedition included 52 specialists, representing fifteen research organizations in Russia and Germany. A significant number of participants were students,

graduate students and young scientists. The expedition also involved two helicopters KA-32, which were served by 12 people of flight personnel. Detailed information about the expedition was regularly transmitted from board by two correspondents of the television company St. Petersburg, and a documentary about the expedition was shot by two employees of the RT news agency (<https://youtu.be/BCCvtg2a-Go>). The present paper highlights the most significant preliminary results of multidisciplinary observations in various environments, which will be further comprehensively analyzed and published in separate thematic articles.

2. THE CRUISE ROUTE AND THE SCOPE OF WORK

The ice-strengthened research vessel “Akademik Tryoshnikov” set sails to the operational area from Murmansk on March 21, 2019, after transit from St. Petersburg, with

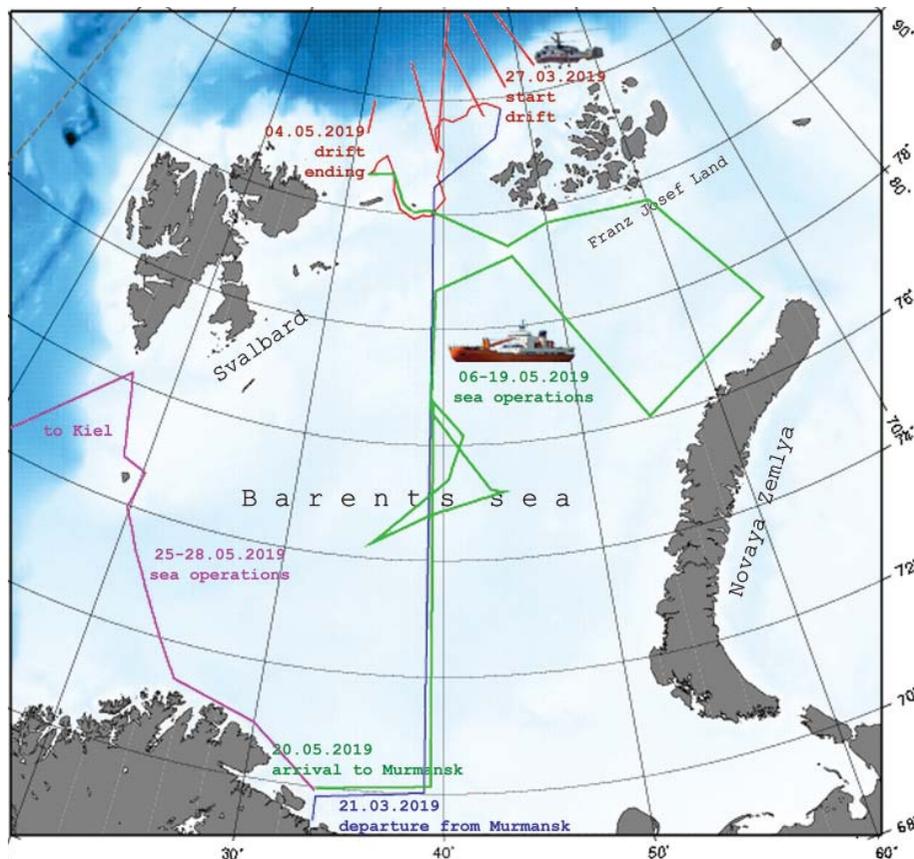


Fig. 1. The expedition route of the R/V “Akademik Tryoshnikov” from March 21 to May 28, 2019.

The blue color shows the way from Murmansk to the point of the beginning of the drift with hydrological sections; the red color shows the drift pathway and the transects, done with the helicopter; the green color shows the way back to Murmansk with hydrological transects; the magenta color shows the return way to Kiel with hydrological transect

Рис. 1. Маршрут экспедиции на НЭС «Академик Трёшников» с 21.03 по 28.05 2019 г.

Синим цветом показан переход из п. Мурманск в точку начала дрейфа с гидрологическими разрезами; красным цветом показана траектория дрейфа и разрезы, выполненные с помощью вертолета; зеленым цветом показан обратный переход в п. Мурманск с гидрологическими разрезами; фиолетовым цветом показан обратный переход в Киль с гидрологическим разрезом

ship call at Kiel for receiving equipment of German expedition members. From March 21 to March 27, the ship moved northward with a hydrological transect along the meridian of 39° E. After choosing a suitable ice field and anchoring the vessel to it, an ice camp was deployed over three days. Planned studies on meteorology, hydrology, hydrochemistry, hydrobiology, geology, geophysics and an extensive complex of ice measurements began on March, 30 from the ice. At the same time, regular hydrological profiling was carried out from the ship with sampling for chemical analyzes, geological stations (using a direct-flow soil tube and box corer), sampling for contamination with radionuclides, ozonometric measurements, and monitoring of ice pressure on the ship hull. During the drift, in addition to the 194 hydrological profiles from the ship and from the drifting ice, 59 hydrological profiles were carried out at remote oceanographic sections oriented perpendicular to the continental slope, within a radius of 300 km with the delivery of people and equipment by Ka-32 helicopter. On May, 4 after the completion of work on ice, the ship headed to north-eastern part of the Barents Sea, where six hydrological sections were occupied, and some of these sections repeated standard historical transects (e.g. from Salm Island, Franz Joseph Land to cape Zhelaniya, Novaya Zemlya archipelago). The main stage of the expedition was completed on May 20 with a ship call to Murmansk, where most of the expedition participants disembarked. After leaving Murmansk on May 24, at the way to Kiel (Germany), a hydrological transect between cape Nordkap and cape Zuidkap was done. The expedition route is shown in Figure 1.

3. RESEARCH HIGHLIGHTS

3.1. Turbulent sensible heat flux controls the heat balance at the snow-ice surface in spring

The main goal of studying the processes of energy-mass exchange of the atmosphere with the sea ice cover was to obtain estimates of the spatiotemporal variability of the main parameters of the boundary layers of the atmosphere and ocean along the drift route of the R/V “Akademik Tryoshnikov” by performing complex synchronous observations in the boundary layer of the atmosphere, snow-ice cover and in the upper ocean. The tasks of the work included: (i) the study of the structure and dynamics of the atmospheric boundary layer and the features of its dynamic-thermodynamic interaction with the ice cover at the end of the polar night (dark) season; (ii) the study of thermodynamic processes that determine seasonal evolution of the snow-ice cover to identify the features of diffusive, convective and radiative heat transfer; (iii) obtaining new data on the physical mechanisms responsible for the formation of the structure of the upper layer of the ocean under the ice cover, including the processes of heat transfer from the Atlantic-origin waters to the lower surface of the sea ice cover.

Calculation of the components of the heat balance at the snow-ice surface is based on the results of measurements made using the Campbell Scientific gradient meteorological complex installed in the ice camp. This complex provides continuous every minute registration of atmospheric pressure (P), temperature (T_a) and relative humidity (RH) of air at a 2 meter height, wind speed (V) at 10 m height and components of the radiation balance at the underlying surface (incoming Q_{dn} and reflected short-wave Q_{up} solar radiation, long-wave radiation of the atmosphere R_{dn} and underlying surface R_{up}). To calculate the components of the heat balance at the snow-ice surface, the approach described in [1] was used. To estimate the turbulent fluxes of sensible (H) and latent heat (LE), a calculation scheme was used based on the Obukhov similarity theory [2, 3]. In the calculations of

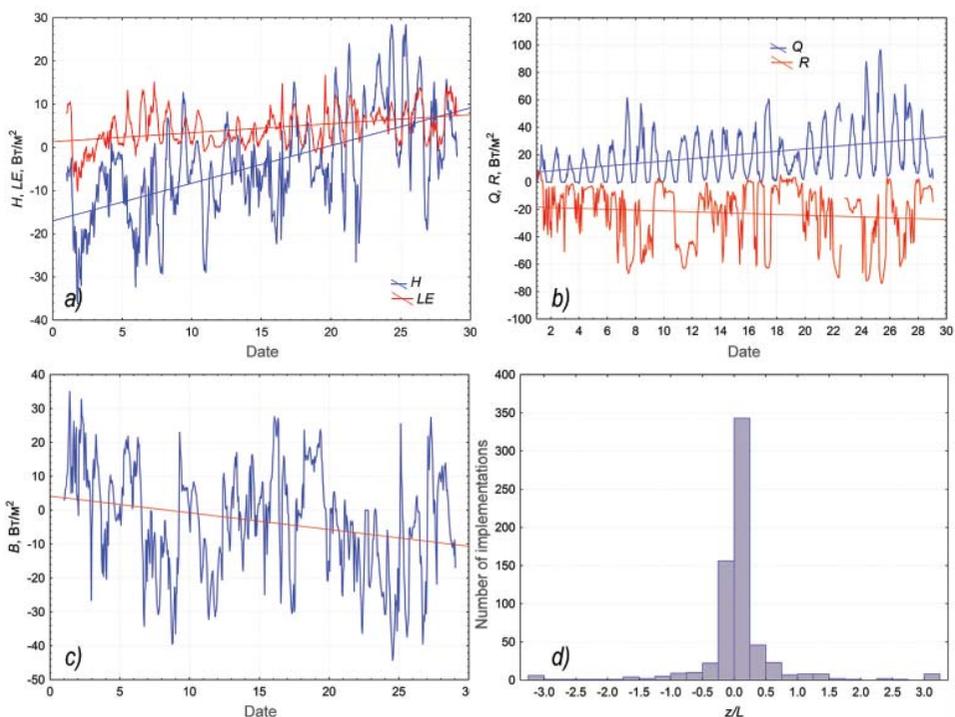


Fig. 2. Characteristics of energy exchange processes in the “ice – atmosphere” system in April 2019: (a) turbulent sensible and latent heat fluxes; (b) short-wave and long-wave balances at the underlying surface; (c) the total heat flux from the atmosphere to the ice-snow surface; (d) a histogram of the recurrence of the stratification parameter at the near-to-ice air layer during the drift

Рис. 2. Характеристики процессов энергообмена в системе приледный слой атмосферы – поверхность снежно-ледяного покрова в апреле 2019 г.: (a) турбулентные потоки явного и скрытого тепла; (b) коротковолновый и длинноволновый балансы подстилающей поверхности; (c) суммарный поток тепла от атмосферы к снежной поверхности; (d) гистограмма повторяемости параметра стратификации приледного слоя атмосферы в период дрейфа

H and LE , the fluxes are considered positive if they are directed from the underlying surface to the atmosphere. The direction of the total heat flux to the underlying surface (B), calculated by the formula $B = Q + R - H - LE$ (where $Q = Q_{dn} - Q_{up}$ and $R = R_{dn} - R_{up}$) is considered positive from the atmosphere to the underlying surface.

Figure 2 shows the spatiotemporal variability of heat fluxes in the “ice-atmosphere” system in April 2019 along the drift route. Despite the increase in the incoming short-wave radiation, and, accordingly, the increase in the short-wave radiation balance (Q) due to the increase in the duration of daylight and the height of the sun, the total heat flux from the atmosphere to surface B decreases from 4 to -8 W/m^2 from the beginning to the end of April. This is due to the large albedo of the snow cover (0.82), a slight increase in heat consumption for evaporation (LE), a slight increase in cooling due to long-wave radiation (R), and a significant, up to a change in sign, decrease in the turbulent sensible heat flux directed to the surface (H). The latter is confirmed by temporal variability of the temperature contrast between 2 meter height and the surface ($T_a - T_s$), and by the histogram

of the recurrence of stratification in the near-to-ice air layer, which shows a significant number of unstable stratification cases (see Fig. 2 *d*).

Obtaining correct estimates of the turbulent flux of sensible heat, based on various parameterizations [4], still poses a challenge. Correct estimates are especially important when modeling sea ice cover in spring, when a slight increase in heat influx leads to a sharp decrease in albedo and the onset of intense melting. A significant contribution to the solution of this problem is expected after careful processing and analysis of complex observations carried out during the expedition.

3.2. Inhomogeneous ice cover activates processes at the ocean – air interface in winter

Sea ice cover is one of the key indicators of the state of polar climate systems. At present, the most detailed information on the state of sea ice is provided by satellite measurements. However, the accuracy of measuring sea ice thickness from processed satellite data is still insufficient. With this in mind, contact measurements of ice thickness at spaced points provide valuable information for validating satellite measurements and improving the quality of sea ice volume calculations. Due to the organization of remote observations using a helicopter, the expedition collected a unique array of contact measurements of sea ice thickness at the helicopter landing points during hydrological profiling. This data array covers an area of about 50 thousand km² along the continental

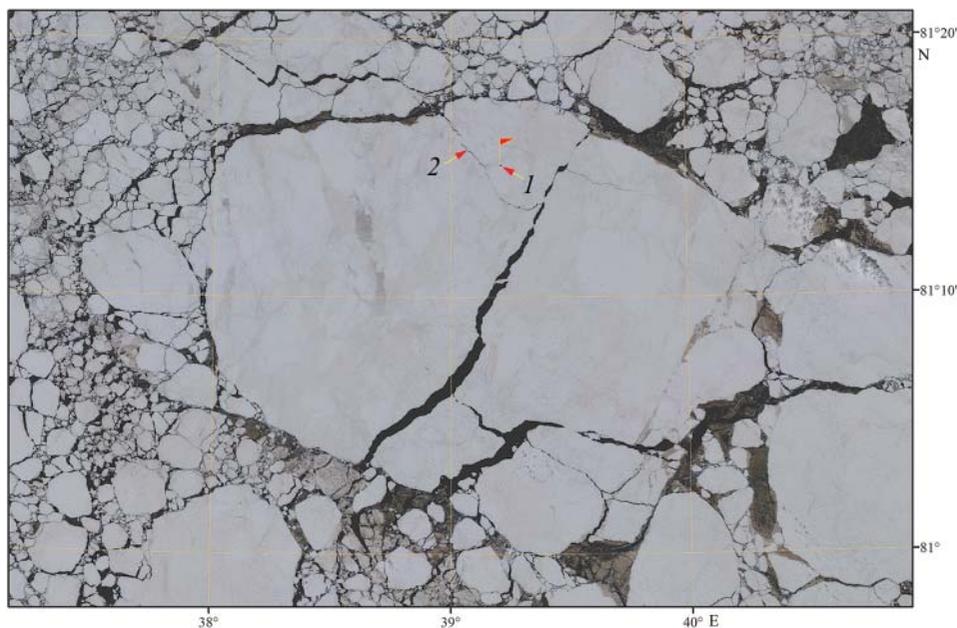


Fig. 3. Ice conditions around the drift area of the R/V “Akademik Tryoshnikov” according to multichannel surveys from the Sentinel-2a satellite at 11:56:51 UTC on 04.17.2019 with a spatial resolution of 10 m. (1) denotes the position of R/V “Akademik Tryoshnikov”, (2) denotes developing crack in the ice field

Рис. 3. Ледовая обстановка в районе дрейфа НЭС «Академик Трёшников» по данным многоканальной съемки с ИСЗ Sentinel-2a на 11:56:51 UTC 17.04.2019 с разрешением 10 м. Цифрами обозначены: (1) положение НЭС «Академик Трёшников», (2) развивающаяся трещина в ледяном поле

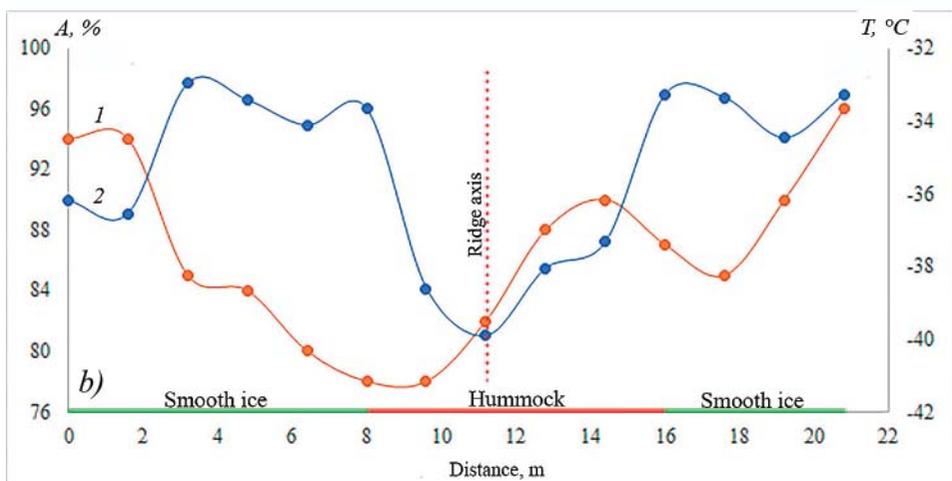


Fig. 4. (a) Photograph of the hummock and UAC flight route. (1) denotes the axis of the ridge, (2) denotes the UAC flight route on April, 11, 2019 at 15 m height; (b) Spatial distribution of surface temperature (1) and albedo (2) over flat ice and hummock

Рис. 4. (a) Фотография тороса и маршрут полета БПЛА. Цифрами обозначены: (1) ось тороса, (2) траектория полета БПЛА 11 апреля 2019 г. на высоте 15 м; (b) пространственное распределение температуры поверхности (1) и альbedo (2) ровного и восторшенного льда

slope and will be used together with the data on ice concentration for calculation of the volume of sea ice in the study area at the end of the 2019 winter season.

Studies of the features of energy and mass transfer processes in the polar regions are primarily related to taking into account the areas occupied by young ice and open water (cracks, leads, polynyas), which are the main sources of intense heat transfer to the atmosphere in winter and the areas of solar energy absorption in summer. During the entire drift of the R/V "Akademik Tryoshnikov", the surface of the ice cover was constantly changing (Fig. 3). Under the influence of dynamic factors in the vicinity of the ice camp there was a constant formation of cracks that transformed into leads and polynyas, and, on the contrary, closing polynyas led to fast building of ridges, sometimes reaching 2-meter height.

Such competitive processes can probably be considered as quite typical for the conditions of the present-day warming in the Arctic, not only in the drift region, but also in other areas. This is due to the increasing fraction of thinner seasonal ice in the total balance. Taking this into account, the expedition program included experimental studies of understudied processes of energy exchange over hummocks. A few experimental and theoretical studies show that the nature and intensity of energy transfer processes in the presence of hummocks noticeably differ from the conditions observed on flat ice [5, 6, 7, 8, 9, 10]. There are practically no technical and methodological tools for the correct assessment of energy exchange near hummocks [11]. To study the features of the spatial distribution of albedo and surface temperature over flat ice and hummocks, an Explorer Quad (unmanned aerial copter, UAC) was used. The UAC housed the original measuring unit designed in AARI, which consists of a LI-190SA photometer manufactured by LICOR LTD (USA), an infra-red thermometer (Russia), a camera, and a control unit [12]. To conduct ground-based verification measurements in parallel with UAC flights over a flat ice, a rack with pyranometers similar in design and spectral range to the UAC sensor was installed close to the studied hummocks. For continuous recording of incoming and reflected radiation at the sea ice surface were used pyranometers: LI-192SA and ADC (programmable data-logger LI-1000), manufactured by LICOR LTD.

On the basis of accomplished measurements it was found that the reflectivity of a flat surface is higher than that of hummocks. In some cases, the difference between the albedo of flat ice and the albedo of hummocks exceeded 10 per cent, with the maximum differences up to 30 per cent. This means that the recorded differences are significant, since the relative error of a single albedo measurement in real conditions does not exceed $\pm 5\%$ [13].

A snapshot of the hummock shown in Figure 4 *a* made it possible to perform a detailed analysis of the data obtained during UAC flights. For example, it was possible to reveal that shaded areas at slopes of hummocks have the minimum albedo (points No. 8 and 10 in Figure 4 *a*). Small, in comparison with flat ice, albedo values cause large absorption of solar radiation. The latter was revealed experimentally during the expedition and partially confirmed theoretically [8, 9]. However, the surface temperature near the hummock ridge is noticeably lower than that at the neighboring flat ice. This can lead either to an increase in the influx of heat from the atmosphere (at a constant air temperature) or to the formation of stable stratification in the near-to-ice air layer (inversion), which impedes vertical turbulent exchange. Thus, a preliminary analysis of collected data suggests that the energy exchange near hummocks significantly differs from that over flat ice. These features should be taken into account in mathematical models as well as the differences in ocean-air energy exchange between a consolidated ice cover and an open water surface.

3.3. Two branches of Atlantic water shape hydrological and ice regime of the Barents Sea

The main external factor controlling the hydrological regime of the Barents Sea is the inflow of warm and salty Atlantic origin waters from adjacent basins. Across the western border, a wide strait between the Scandinavian Peninsula and the Bear Island, Atlantic water enters from the Norwegian Sea to the central and southern parts of the Barents Sea. Atlantic water from the Nansen Basin flows in through deep-water trenches at the northern border of the sea. In modern literature, these water masses are commonly referred to as the Barents Sea Atlantic Water (BAW) and the Fram Strait Atlantic Water (FAW), respectively. We will adhere to this terminology in the further presentation. To assess the state of both branches of the Atlantic waters at the end of the winter season, a hydrological section was performed along 39° – 40° E. from 70° to 84° N (see Fig. 1). During the transition, hydrological profiling was carried out by a regular CTD (Conductivity Temperature Depth) device Seabird SBE911plus (www.seabird.com). During the drift measurements in the northern part of the section were performed by a SeaCAT Profiler CTD SBE 19plus (www.seabird.com) with the delivery of equipment to the transect points by helicopter. The consistency of the data obtained using both devices was checked by inter calibration at several stations, and after the expedition was completed, the sensors passed standard verification in a certified company.

The characteristic features of the hydrological structure in the central part of the Barents Sea and on the continental slope of the Nansen Basin are well distinguished by the meridional temperature distribution (Fig. 5).

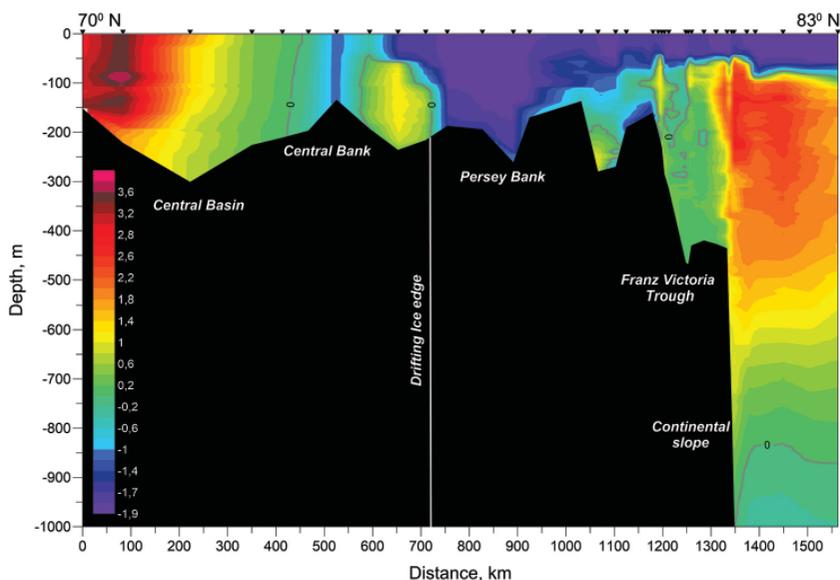


Fig. 5. Temperature distribution (°C, color) at the meridional transect along the meridian 39–40° E. during the time interval May, 21 – April, 4, 2019. Black triangles at the top show position of CTD casts

Рис. 5. Распределение температуры (°C, показано цветом) на меридиональном разрезе вдоль меридиана 39–40° в.д. 21.03 – 05.04. 2019. Положение точек CTD-зондирования показано черными треугольниками в верхней части рисунка

The main warm core of BAW with a maximum temperature of 3.8°C at a depth of 100 m is revealed at the southern border of the transect in the Central Depression. At the periphery of the warm core, a quasi-homogeneous vertical temperature distribution from surface to bottom is observed, indicating an intensive winter convective mixing. The secondary core of BAW with a maximum temperature of 1.1°C is located in the trench between the Central Bank and the Perseus Bank from a depth of 50 m to the bottom. Two warm cores are separated by a frontal section with a minimum temperature of -1.1°C above the Central Bank. The Central Bank is an important element of the bottom topography of the Barents Sea, affecting its hydrological regime through the formation of cold dense waters in the winter season [14]. These waters flow down along the slopes of the bank into the adjacent deep-water basins, which leads to the separation of the initially single stream of BAW into two jets. A fundamentally new result obtained during the expedition is the establishment of the fact that winter convection over the Central Bank can be purely thermal, i.e. the formation of a homogeneous “column” of dense water above the bank does not necessarily require salinization during ice formation, which was previously assumed as a necessary condition [15]. The obtained new knowledge is confirmed by the fact that at the end of March 2019, the boundary of consolidated one-year ice was located 80–100 miles northward off the Central Bank (Fig. 5), while the appearance of drifting ice in the Central Bank region dates by the second half of April. The polar front separating BAW (in the south) from the surface Arctic water mass with a surface temperature close to the freezing point is located above the southern spur of the Perseus Bank. Further to the north, to the northern peaks of the Perseus Bank, as well as in the southern part of the transect, there is a high uniformity of temperature along the vertical, which indicates intense convective mixing. However, convection in this region is obviously of haline origin. The densification of surface water in this case occurs as a result of salinization during ice formation. To the north of the Perseus Bank, the deep and bottom layers of water are characterized by a positive temperature, which is associated with the influence of the heat of FAW, which main core with a temperature of 2.6°C is in the depth range of 100–200 m on the Nansen Basin continental slope. The lowering of the bottom topography along the transect begins well before the continental slope, in the Franz Victoria Trough, where the maximum depth reaches 450 m. However, within the trough, the water temperature does not exceed $0.1\text{--}0.3^{\circ}\text{C}$, which is associated with the intense formation of cold dense waters along the trough perimeter and their runoff down the trough slopes.

3.4. Intensive formation of dense waters on shelves and their cascading into the adjacent water basins is the main mechanism of water masses transformation in winter

Observations on a series of successive hydrological transects in the north-eastern Barents Sea (see Fig. 1) cast doubt on the existing concept that the transformation of BAW is largely due to the open sea winter convection. A preliminary analysis of the collected data suggests that the role of cascading (descent of dense cold water forming on shallow shelves) is more significant. To illustrate this statement, Figure 6 shows a chart of potential density at 250 m depth in the Franz Victoria Trough, where a large number of CTD profiles made it possible to generate horizontal distribution of hydrological parameters. The Franz Victoria Trough is the main water exchange channel with the deep Nansen Basin in the northern part of the Barents Sea. The average depth of the trough is about 300 m, facilitates

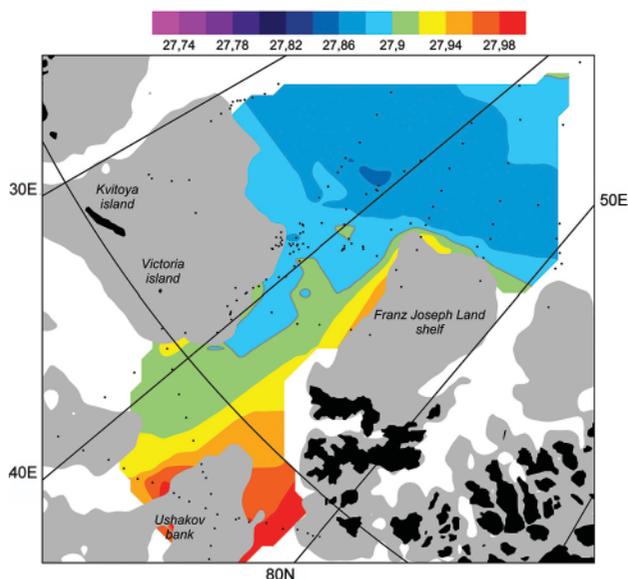


Fig. 6. Distribution of potential density (kg/m^3 , color) in the Franz Victoria Trough at 250 m depth in April – May 2019. Black dots show position of CTD casts

Рис. 6. Распределение потенциальной плотности (кг/м^3 , показано цветом) в желобе Франц-Виктория на глубине 250 м в апреле–мае 2019 г. Положение точек CTD-зондирований показано черными точками

free penetration of the warm FAW from the north. As showed a preliminary analysis of observations, the nature of water exchange through the trough is fundamentally different from the patterns established earlier on the basis of summer and fall surveys [16].

As a result of mixing with cold and slightly fresher dense waters formed on the island shelves surrounding the trough and flowing downslope, the FAW entering from the Nansen Basin rapidly cools down and freshens throughout the entire thickness. Through the southern channels, colder (with temperature less than zero) and slightly saltier water, which formed on the southern island shelf of Franz Joseph Land and Ushakov Bank, enter the trough. As a result, at depths below 200 m a density front forms between cooled (but still keeping positive temperature and increased salinity) FAW, which tongue is stretched southward along the western flank and the denser water with a negative temperature and slightly lower salinity moving northward along the eastern flank of the trough. At the mouth of the trough dense water flow turns eastward along the continental slope under the influence of the Coriolis force and mixes with FAW, leading to cooling and freshening of the latter [17].

3.5. Zoobenthos in the Franz Victoria Trough

The bed and slopes of the Franz Victoria Trough are interesting not only in terms of oceanographic characteristics, but in terms of zoogeographic features of the fauna inhabiting it as well. FAW penetrates into the trough from the north, forming specific environmental conditions for the bottom fauna [18]. In addition, the northernmost deep-water segments of the trough bed are affected by the Arctic waters, which also affect the composition of the fauna. The main goal of the work was to study the communities of

bottom biotopes at the northern edge of the Arctic shelf and the Franz Victoria Trough, the vertical distribution of animals in the bottom sediments' profile and their interaction with the environment. Preliminary results of the primary processing of the collected biological material show that polychaetes, mainly *Spiochaetopterus typicus* (M. Sars, 1856) and Maldanidae gen. spp., dominated qualitatively and quantitatively at all stations. At depths of 150–200 m, the biomass and abundance of bivalves (families Astartidae, Thyasiridae) also increased significantly. In addition, a high diversity of crustaceans was noted in the deep part of the Franz Victoria Trough. In soft sediments of the bed of the trough the number of echinoderms sharply increased, in particular starfish *Ctenodiscus crispatus* (Bruzelius, 1805).

Study of the vertical distribution of benthic organisms in the bottom sediments helps to better understand the biology of certain species, the ways of organic matter utilization in the community, and the influence of biota on the structure of sediments. A preliminary analysis of the vertical distribution of higher taxa in the sediments' profile showed that, with the exception of organisms living only on the sediment surface, the number of higher taxa of infauna (16) in the sediments didn't change to a depth of 5–6 cm. This horizon approximately corresponds to the maximum thickness of the upper water-saturated sediment layer, sometimes with an adjacent intermediate layer with a less degree of water saturation. Deeper than 5–6 cm, the number of taxa began to decline, and only Polychaeta were present from 22 to 31 cm.

Figure 7 shows the result of a DistLM analysis of the connection between the vertical distribution of higher taxa in the sediments' profile and the environmental factors: depth, near-bottom temperature, type of sediments. The values of near-bottom salinity practically did not change between the stations. Expectedly, the influence of this factor was not reliable and it was excluded from the final analysis. Other factors had a high degree of significance ($P = 0.001$), however, the share of the explained total variation was relatively low (11 % for the temperature, 16 % for the sediment type, 10 % for the depth). This may be due to the use of rather "rough" data, both biological (only higher taxa) and lithological (few grades of sediments' fractions). However, this preliminary analysis provides already some results to be checked and developed when a detailed processing of the samples is carried out and quantitative data are obtained. At the Figure 7, two groups of stations are seen, matching biotopes characterized by different abiotic characters and different higher taxa composition and vertical distribution:

1 (marked by circles) – shallow-water (depth less than 300 m) biotopes of the trough slope, with negative near-bottom temperature and high sand content in bottom sediments. As a rule, a large number of stones or pebbles were present. The depth of penetration of invertebrates into the sediments was on average 1.5 less than in the biotopes of the second type, but the distribution along the profile was even, showing gradual decline of number of taxa with the depth under the sediments' surface.

2 (marked by squares) – stations with depths below 300 m, close to zero or slightly positive bottom temperatures (due to the inflow of FAW) and clay bottom sediments. The deepest penetration into the sediments of the mass polychaetes *S. typicus* and Maldanidae gen. spp. was recorded; but the other groups mostly occurred not deeper than the upper water-saturated layer.

The values of near-bottom salinity practically did not change between the stations. Therefore, the influence of this factor was not reliable and salinity was excluded from the

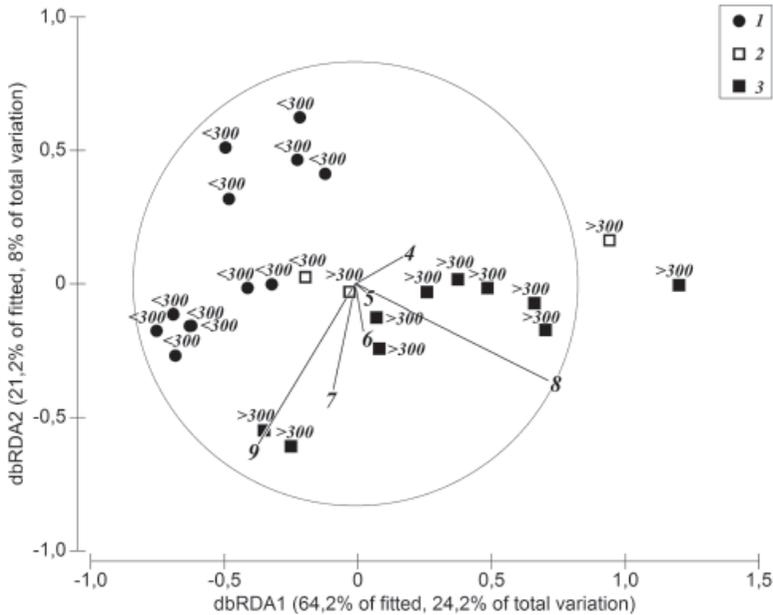


Fig. 7. Results of the DistLM-analyses of the environmental predictors' influence on the vertical distribution of the number of higher taxa in the bottom sediments' profile (1–3) near-bottom temperature: (1) negative (–0.7...–1.8 °C), (2) slightly negative (–0.2... 0 °C), (3) slightly positive (0... 0.7 °C); (4–9) predictors: (4) clay sediments, (5) fine sandy sediments, (6) sandy sediments, (7) pebbles and stones, (8) depth, (9) near-bottom temperature; numbers at the stations' symbols mark depths over and below 300 m

Рис. 7. Результат DistLM-анализа зависимости вертикального распределения числа крупных таксонов в толще осадков от факторов среды. (1–3) придонная температура: (1) отрицательная (–0,7... –1,8 °C), (2) слабо отрицательная (–0,2... 0 °C), (3) слабо положительная (0... 0,7 °C); (4–9) предикторы: (4) глинистые осадки, (5) мелкопесчанистые осадки, (6) песчанистые осадки, (7) галька и камни, (8) глубина, (9) придонная температура; цифрами у значков станций обозначены глубины более и менее 300 м

final analysis. Other factors had a high degree of significance ($P = 0.001$), however, the share of the explained total variation was relatively low (temperature is 11 %, sediment type — 16 %, depth — 10 %). This may be due to the use of rather “rough” preliminary data, both in fauna (only large taxa) and in types of sediments. Nevertheless, the graph in Figure 7 allows distinguishing two types of biotopes:

(1) Shallow-water (depth less than 300 m), with negative near-bottom temperature and high sand content in bottom sediments. As a rule, a large number of stones or pebbles were present; the total depth of penetration of invertebrates into the sediments was on average 1.5 less, but the distribution along the profile was more even than in the second type.

(2) With a depth below 300 m, close to zero or slightly positive bottom temperature (due to the inflow of FAW) and clay bottom sediments. The deepest penetration into the sediments of the mass polychaete taxa – *S. typicus* and *Maldanidae* g. spp., however, other groups mostly did not penetrate deeper than the upper water-saturated layer.

3.6. Icebergs rafting in the late Pleistocene deglaciation period is a probable source of large-sized rock fragments

The Barents Sea continental margin is a unique region due to its variable geological structure, complex tectonics, diversity of sediment source areas, dissected relief and high hydrocarbon potential. Franz Victoria Trough, one of the most important morphological and structural elements of the shelf, is the largest channel connecting the Barents Sea with the Arctic Ocean. Here, FAW enters the Barents Sea, and sediment material is transported in the opposite direction, to the deep Nansen Basin. These background processes setup prerequisite conditions for massive redistribution of terrigenous material around the Arctic Ocean. Similar processes were acting in the geological past and therefore they can be reconstructed by a comprehensive study of bottom sediments. Paleo-oceanographic studies in the northern part of the Barents Sea are extremely significant for understanding the general evolution of climate during the Quaternary. In accordance with the direction of the ship's drift, geological profiles were taken through the northern part of the Franz Victoria Trench, along its western side, and in a shallow area north of Kvitoya Island. Sediment samples were obtained at 48 geological stations with the help of a small box-corer and a gravity corer.

The results of the initial analysis of the sampled material allow figuring out preliminary considerations on the features of sedimentation in the northern part of the Barents Sea in the Late Quaternary. The Upper Quaternary section of bottom sediments in the region was formed under the conditions of two radically different sedimentation regimes. Their change is associated with the transition from cold late Pleistocene climate to warm Holocene. Sediments accumulated during the Holocene is represented by brown, gray-brown, and brown-gray silty clay (sometimes with a noticeable sand admixture), including rare psephitic material of gravel-pebble dimension. Their thickness, as a rule, is not large (10–50 cm). Below lay gray sandy silty clay saturated with gravel-pebble (up to boulder size, more than 10 cm) material. The majority of psephytes are represented by non-rounded acute-angled samples, or sub-angular and ribbed ones with noticeable frayed edges. They correspond to 0 and 1 rounded points (the lowest) in accordance with the Khabakov scale, or vary from 0.15 to 0.35 according to the Wadell roundness scale (Fig. 8). Theoretically, the sources of coarse fragments can be local outcrops [19, 20], gravitational slope flows, or rafting by sea ice and icebergs. Most likely, the first two of the listed sources did not have leading significance in the studied region. If they prevailed, coarse



Fig. 8. Geological station AT19-09GC. The erosion boundary is clearly visible between the Holocene brown silty clay (left) and the Late Pleistocene dense gray sandy silty clay with gravel-pebble sized material (right). The cavernous surface of the gray sediment is associated with a large amount of fine gravel

Рис. 8. Геологическая станция AT19-09GC. Хорошо видна эрозионная граница между голоценовыми коричневыми алевропелитами (слева) и позднеплейстоценовыми плотными серыми песчаными алевропелитами с материалом древесно-щебневой размерности (справа). Кавернозная поверхность серого осадка связана с большим количеством мелкой дресвы

clastic material would be distributed more or less evenly along the section. However, the increased content of psephytes is recorded only in its deeper part, which suggests higher probability of delivery by icebergs. The intensity of iceberg calving culminated during deglaciation stage. After relative stabilization of climate in the Holocene, the icebergs rafting ceased to play a noticeable role, which led to significant decrease in the number of psephytes in the shallower part of the section.

Preliminary estimates show that the petrographic composition of large-sized rock fragment material (psephytes) varies greatly within the studied area. Basalts and dolerites, which are a kind of marker of the Franz Joseph Land, are extremely rare among the studied psephytes. Quartz sandstones, quartzites and carbonates (mainly dolomites, less often limestones) prevail. Such variability indicates the diversity of iceberg sources and the complex circulation of the latter during the deglaciation period. Further research will be aimed at reconstruction of the general direction of the movement of paleo-icebergs, and at identification of their sources. This will significantly improve the general understanding of the evolution of the Late Quaternary processes within the northern margin of the Barents Sea shelf.

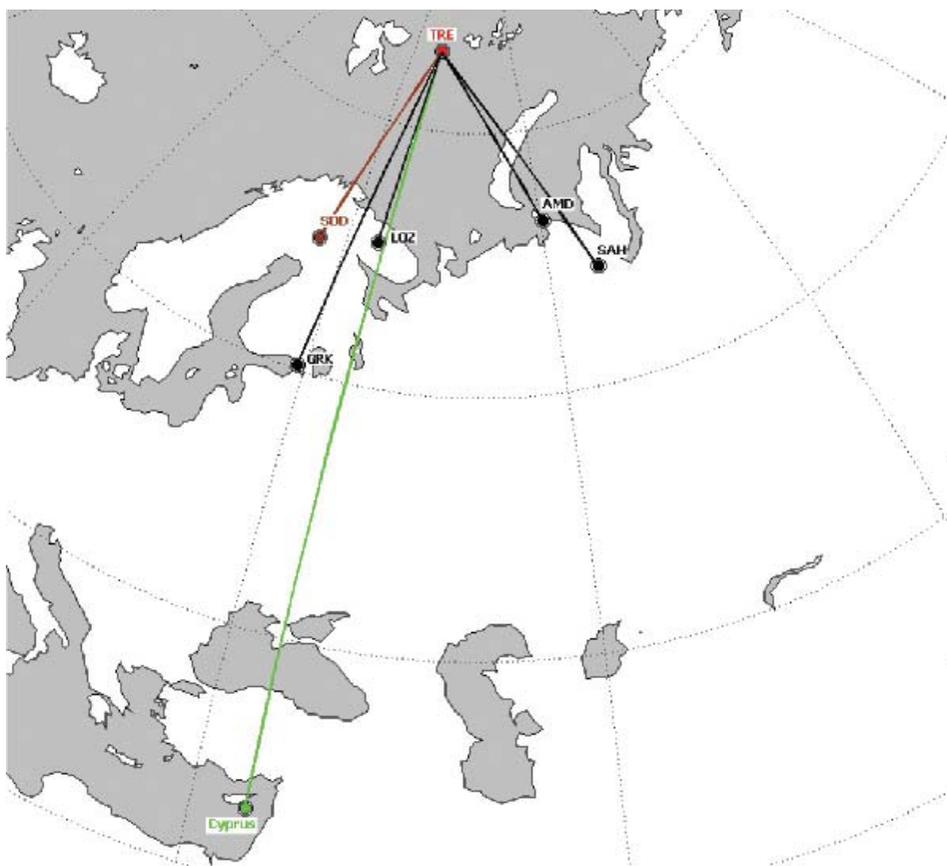


Fig. 9. Oblique sounding paths of the ionosphere March 25, 2019

Рис. 9. Трассы наклонного зондирования ионосферы 25 марта 2019 г.

3.7. Geophysical monitoring in the Arctic zone of the Russian Federation

Thermonuclear reactions occurring in the core of the Sun are the source of continuous emission of solar plasma and electromagnetic radiation into the outer space. The complex of phenomena and processes in outer space due to these emissions is called space weather. The main agents of space weather effects include: continuous outflow of magnetized low-energy solar plasma (solar wind); coronal mass ejection (CME) associated with solar flares and including high-intensity magnetic fields (“magnetic clouds”); solar ultraviolet (UV) radiation; fluxes of high-energy solar protons and electrons (“solar proton events”, SPE) that invade the Earth polar caps. Taking this into account, the actual tasks of geophysical monitoring in the Arctic zone of the Russian Federation include: (i) the nowcast of the influence of space weather on the state of the magnetosphere and the polar ionosphere (assessment of the probability of development and intensity of auroral substorms and world magnetic storms according to operational data on the PC index; (ii) operational diagnosis of magnetic-ionospheric disturbances in various regions of the Arctic; (iii) operational diagnosis of sudden frequency deviations (SFD) in order to prevent disturbances in the operation of systems of radiolocation, navigation and GPS (based on multichannel Doppler measurements); (iv) monitoring the propagation conditions of decameter radio waves in the Arctic region (on the basis of ionospheric oblique sounding); (v) developing methods and means for monitoring the effects of artificial high frequency radio waves in the high-latitude ionosphere; (vi) monitoring the effect of space weather on human health.

A necessary condition for solving these problems is the permanent ionospheric measurements (vertical and oblique sounding of the ionosphere) in the polar cap area with the immediate transfer of information to receiving centers on land. During the expedition novel technical approaches were developed to solve a number of the listed above tasks. The measurements were conducted from the nonmagnetic pavilion in the ice camp in combination with continuous measurements from board. A similar approach is planned to be used when organizing geophysical observations from an ice-resistant platform (LSP). During the expedition, a large amount of data was collected and immediately transmitted to the AARI Polar Geophysical Center. The significance of the additional point for oblique sounding of the ionosphere in the polar cap region is illustrated in Figure 9, which shows the radio signal paths that can significantly expand the field of operational monitoring of the high-latitude ionosphere.

4. CONCLUSIONS

The most important outcome of the expedition was the practical implementation of multidisciplinary observations from the ice with the immediate transfer of the received information to the ship and to reception centers on land. During the expedition, specific procedures were developed for the efficient organization of observations at a new type of ship-ice drift station, which will be taken into account during the construction, equipment and operation of the North Pole ice-resistant self-propelled platform (LSP). The field studies carried out in March-May 2019 made a significant contribution to the study of the transformation of Atlantic waters in the Barents Sea, including the continental slope of the adjacent Nansen Basin under changing climatic conditions, as well as to the study of the mechanisms of formation of dense shelf waters in the Barents Sea. Comprehensive information was obtained on the state of the Barents Sea environment.

During the expedition, it was possible to complete a wide range of tasks. The data obtained comprise a unique material for a comprehensive study of the current state of

the environmental conditions in the Barents Sea. The data collected make it possible to obtain more reliable estimates of the spatiotemporal variability of the main elements of hydrometeorological regime, to better understand the mechanisms of water masses formation, their influence on climate changes at high latitudes, and to contribute to solving the tasks of sustainable development of the Arctic region.

The first stage of the Transarktika-2019 expedition was a logical continuation of the expeditions at the North Pole drifting stations under the current conditions of declining ice cover. The implementation of the expedition program made it possible to test new technologies for organizing and conducting modern integrated scientific research in terms of ensuring the safety of work, internal, interdepartmental and international cooperation, which is necessary for the forthcoming operation of the LSP.

Acknowledgments. The authors would like to thank Roshydromet for financing the entire expeditionary logistics. The authors are deeply grateful to the captain of the R/V “Akademik Tryoshnikov” D.A. Karpenko and the ship crew for comprehensive assistance in providing scientific research during the expedition. Scientific research in specific research areas was also supported by RFBR grants No. 17-05-0055817, 17-05-4119717, 18-05-60048, 18-05-60083 and 18-05-00471.

REFERENCES

1. *Makshtas A.P., Makhotina I.A., Timachev V.F.* Characteristics of atmosphere — sea ice energy exchange in the Central Arctic. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019, 231: 012034. doi: 10.1088 / 1755-1315 / 231/1/012034.
2. *Monin A.S., Obukhov A.M.* The main laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Trudy Geofizicheskogo instituta RAN.* Transactions of the Geophysical Institute of the Academy of Sciences of the USSR. 1954, 24 (151): 163–187. [In Russian].
3. *Makshtas A.P., Timachev V.F., Sokolov V.T., Kustov V.Yu., Govorina I.A.* Turbulent energy exchange processes at the sea ice boundary – atmosphere according to historical data and data from the “North Pole 35” and “North Pole-39”. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of the Arctic and Antarctic. 2014, 1 (99): 53–64. [In Russian].
4. *Makshtas A.P., Ivanov B.V., Timachev V.F.* Comparison of parametrizations of turbulent energy-mass transfer in a stably stratified surface layer of the atmosphere. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of the Arctic and Antarctic. 2012, 3 (93): 5–18. [In Russian].
5. *Murzin A.I.* To the question of determining the balance of radiation according to the profile of shaken ice. *Trudy ANIO.* Transactions of ANIO. 1960, 230: 41–44. [In Russian].
6. *Volkov Yu.A., Repina I.A.* The influence of the underlying surface structure in the polar regions on the energy exchange of the atmosphere and the ocean. *Poverkhnostnye i vnutrennie volny v arkticheskikh moriakh.* Surface and Inner Waves in the Arctic Seas / Eds. I.V. Lavrenova and E.G. Morozova. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002: 189–206. [In Russian].
7. *Marchenko A.V.* The effect of hummock consolidation on heat fluxes from the ocean to the atmosphere. *Trudy AANII.* Transactions AANII. 2003, 446: 150–164. [In Russian].
8. *Andreev O.M., Ivanov B.V., Bezgreshnov A.M.* Features of the redistribution of solar radiation in the hummocks of the Arctic basin. *Meteorologia i gidrologia.* Meteorology and Hydrology. 2011, 1: 58–63. [In Russian].
9. *Polyakov S.P., Andreev O.M., Ivanov B.V., Bezgreshnov A.M.* The effect of hummock formations on the radiation characteristics of the sea ice cover. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2011, 4 (116): 80–84. [In Russian].
10. *Ivanov B.V., Polyakov S.P.* Some results of the study of the reflectivity of slopes of hummocks in the central part of the Arctic basin. *Trudy GGO.* Transactions of GGO. 2013, 569: 239–248.

11. Ivanov B.V., Andreev O.M. On the issue of determining the albedo of hummock formation. *Meteorologia i gidrologia*. Meteorology and Hydrology. 2011, 6: 78–83. [In Russian].
12. Zhuravsky D.M., Ivanov B.V., Kashin S.V., Kuprikov N.M. A method for remote assessment of albedo using photo-recording equipment. *Issledovaniye Zemli iz Kosmosa*. Earth exploration from space. 2018, 1: 52–59. [In Russian].
13. Radionov V.F., Bryazgin N.N., Alexandrov E.I. *Snezhnyj pokrov v Arkticheskom bassejne*. Snow cover in the Arctic basin. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996: 124 p.
14. Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.M., Golovin P.N. Cascades of dense water around the World Ocean. *Progress in Oceanography*. 2004, 60: 47–98.
15. Quadfasel D., Rudels B., Selchow S. The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation. *ICES Marine Science Symposium*. 1992, 195: 40–51.
16. Ivanov V.V. Atlantic waters in the Western Arctic. *Kompleksnyye okeanograficheskie issledovaniia v Severnom Ledovitom okeane: Sbornik nauchnykh trudov*. Integrated Oceanographic Studies in the Arctic Ocean. Eds. A.P. Lisitsyn, M.E. Vinogradov and E.A. Romankevich. Moscow: *Nauchnyy Mir*, 2002: 76–91. [In Russian].
17. Rudels B. The 8-S relations in the northern seas: Implications for the deep circulation. *Polar Research*. 1986, 4: 133–159.
18. Lind S., Ingvaldsen R. B. Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2012, 62: 70–88.
19. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1:1000000 (novaya seriya). List U-37-40 – Zemlya Franca-Iosifa (severnnye ostrova). Ob"yasnitel'naya zapiska*. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (new series). Sheet U-37-40 – Franz Josef Land (northern islands). Explanatory note. St. Petersburg: Publishing house of the St. Petersburg card factory VSEGEI, 2006: 272 p.
20. Dibner V.D., Basov V.A., Gerke A.A., Solovieva M.F., Sosipatova G.P., Shulgina N.I. The age of pre-Quaternary sediments of the sedimentary cover of the bottom of the Barents Sea. *Okeanologia*. Oceanology. 1970, 10, 4: 670–680. [In Russian].

**Трансарктика-2019:
зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан
на НЭС «Академик Трешников»
(расширенный реферат)**

Двадцатого мая 2018 г. с прибытием НЭС «Академик Трешников» в п. Мурманск завершился первый этап комплексной экспедиционной программы «Трансарктика-2019» Росгидромета Минприроды РФ. Всего в рамках указанной программы в 2019 г. запланировано четыре морских экспедиции в российские арктические моря и прилегающую глубоководную часть Арктического бассейна. Отличительной особенностью первого этапа было проведение полевых исследований в конце зимнего сезона, когда арктический ледяной покров достигает пика сезонного максимума. Несмотря на очевидные навигационные трудности, ценность научной информации, полученной в этот период года, оказывается весьма высокой. Это связано с тем, что ряд ключевых структурообразующих гидрофизических процессов проявляет ярко выраженную сезонную изменчивость и измерения, выполненные в наиболее подходящий сезон, позволяют лучше понять механизмы процессов и проверить справедливость существующих теоретических концепций.

После выхода в район работ на севере Баренцева моря и выбора подходящего ледяного поля в течение трех дней на льдине был развернут лагерь, с которого были начаты плановые исследования по метеорологии, гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, геологии и геофизике, а также выполнялся обширный комплекс ледовых измерений. Одновременно с борта судна проводились регулярные гидрологические зондирования с пробоотбором на гидрохимические анализы, отбор проб на загрязнение радионуклидами, озонметрические измерения, проводился мониторинг ледовых нагрузок на корпус судна.

В дополнение к 194 гидрологическим зондированиям с борта судна и с дрейфующего льда за время дрейфа было выполнено 59 гидрологических зондирований на выносных океанографических разрезах, ориентированных перпендикулярно континентальному склону, в радиусе до 300 км с доставкой людей и оборудования вертолетом Ка-32. После окончательного завершения работ на льду 4 мая судно направилось в северо-восточную часть Баренцева моря, где было выполнено шесть гидрологических разрезов, часть из которых в точках повторяющихся исторических разрезов.

Важнейшим результатом экспедиции стала практическая реализация мультидисциплинарных наблюдений со льда с оперативной передачей получаемой информации на судно и в приемные центры на берегу. Во время экспедиции были отработаны конкретные процедуры по эффективной организации наблюдений на дрейфующей станции нового типа «судно – лед», которые будут учтены при строительстве, оборудовании и эксплуатации ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) «Северный полюс».

Экспедиционные исследования, осуществленные в марте–мае 2019 г., внесли значительный вклад в изучение роли трансформации атлантических вод на материковом склоне и примыкающей глубоководной части Арктического бассейна в изменившихся климатических условиях, а также в исследование механизмов формирования уплотненных шельфовых вод в Баренцевом море и их вклада в процессы обновления водных масс. Была получена комплексная информация о состоянии природной системы в Баренцевом море, включая континентальный склон на северной границе моря и Арктического бассейна СЛО.

В ходе экспедиции удалось выполнить широкий круг задач. Полученные данные представляют собой уникальный материал для всестороннего исследования текущего состояния природных условий арктических морей СЛО. Собранные данные позволяют получить более надежные оценки пространственно-временной изменчивости основных элементов гидрометеорологического режима, более глубоко изучить механизмы формирования водных масс, их влияние на изменения климата высоких широт и способствовать решению задач комплексного освоения Арктики.

Первый этап экспедиции «Трансарктика-2019» явился логическим продолжением экспедиций на дрейфующих станциях «Северный полюс» в современных условиях сокращающегося ледяного покрова. Выполнение программы экспедиции позволило опробовать новые технологии организации и проведения современных комплексных научных исследований, в том числе в аспекте обеспечения безопасности проведения работ, внутри-, межведомственного и международного взаимодействия,

необходимые для подготовки и начала эксплуатации ЛСП. В предлагаемой статье обозначены наиболее значимые предварительные результаты выполненных наблюдений в различных средах, которые в дальнейшем будут всесторонне проанализированы и опубликованы в отдельных тематических статьях.

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 550.388

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-275-299

PC INDEX AS A PROXY OF THE SOLAR WIND ENERGY THAT ENTERED INTO THE MAGNETOSPHERE (SUMMARY)

O.A. TROSHICHEV*, D.A. SORMAKOV

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

*olegtr@aari.ru

РС ИНДЕКС КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, ПОСТУПАЮЩЕЙ В МАГНИТОСФЕРУ (ИТОГИ)

O.A. ТРОШИЧЕВ*, Д.А. СОРМАКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

*olegtr@aari.ru

Received July, 3, 2019

Accepted September, 4, 2019

Keywords: dynamic pressure impulses, energy indicator, field-aligned currents, interplanetary electric field, magnetosphere, ionosphere, magnetic storms, monitoring and nowcastin, polar cap magnetic activity, Solar wind, substorms.

Summary

The paper includes a short review of advantages of the *PC* index which is a characteristic of the magnetic activity in the polar caps in the northern (*PCN*) and southern (*PCS*) hemispheres. It is demonstrated that the *PC* index properly responds to variations of the geoeffective interplanetary electric field E_{KL} coupling with the magnetosphere, on the one side, and predetermined the development of magnetospheric disturbances (magnetic storms and substorms), on the other side. These experimental results formed the physical backgrounds for concept that the ground-based *PC* index characterizes the solar wind energy input into the magnetosphere. It is shown that problem of random discordances in behavior and value of the *PCN* and *PCS* indices during the summer/winter seasons is easily solved by choosing the *PC* index in the winter polar cap (*PCwinter*) as the best characteristic of the polar cap magnetic activity. At present the *PC* index is successfully applied to

Citation: Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere (summary). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 275–299. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-275-299.

validate the utility of SW data presented at OMNI website (i.e. to verify whether or not the solar wind, measured in the Lagrange point, encountered the magnetosphere in reality). A special procedure agreed by the Arctic and Antarctic Research Institute (responsible for production of *PCS* index) and DTU Space (responsible for production of *PCN* index) ensures the calculation of the 1-min *PC* indices in quasi-real time based on data of magnetic observations at the polar cap stations Vostok (Antarctic) and Qaanaaq (Greenland).

Поступила 3 июля 2019 г.

Принята к печати 4 сентября 2019 г.

Ключевые слова: импульсы динамического давления, индекс магнитной активности, ионосфера, солнечный ветер, магнитосфера, магнитные бури и суббури, межпланетное электрическое поле, мониторинг и наукастинг, показатель энергии, полярные шапки, продольные электрические токи.

Дается краткий обзор достижений, полученных при использовании индексов магнитной активности в северной (*PCN*) и южной (*PCS*) полярных шапках. Показано, что *PC* индекс четко отвечает на вариации геоэффективного межпланетного электрического поля E_{KL} , взаимодействующего с магнитосферой, с одной стороны, и является предвестником магнитосферных возмущений (магнитных бурь и суббурь), с другой стороны. Эти экспериментальные факты послужили основой представления о *PC* индексе как характеристике энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу. Показано, что проблема случайных расхождений в поведении и величине *PCN* и *PCS* индексов в сезоны зима/лето решается выбором *PC* индекса в зимней шапке (*PCwinter*) как наиболее адекватной характеристики магнитной активности. В настоящее время *PC* индекс успешно применяется при оценке пригодности данных сайта OMNI о параметрах солнечного ветра (т.е. для проверки реальности контакта с магнитосферой солнечного ветра, измеренного в точке либрации). Специальная процедура, согласованная Арктическим и антарктическим НИИ (который ответствен за производство *PCS* индекса) и Датским техническим университетом (который ответствен за производство *PCN* индекса), обеспечивает расчет в реальном времени 1-мин *PC* индекса по данным магнитных наблюдений на полярных станциях Восток (Антарктика) и Туле (Гренландия).

1. INTRODUCTION

At all times the Sun radiates in space a fully ionized, electrically neutral plasma, which was named as solar wind (SW). The solar wind carries a magnetic field B of solar origin named as Interplanetary Magnetic Field (IMF). Under action of solar wind and IMF the Earth's magnetic field is confined to "magnetosphere", the limited region in space, where the plasma processes are guided by geomagnetic field. The state of magnetosphere is strongly controlled by the solar wind energy incoming into the magnetosphere in course of the solar wind — magnetosphere coupling. Different combinations of the solar wind parameters, mainly the solar wind velocity (V_{sw}) and the vertical (B_{zs}) or tangential (B_T) IMF components, were repeatedly examined to reveal the "coupling function" — the optimal combination providing the best correlation between the solar wind changes and the magnetosphere disturbances development. The comprehensive analyses [1, 2] revealed that (1) different coupling functions demonstrate the best correlation with different variables characterizing the magnetosphere state, and (2) the unique coupling function, if it exists, must involve the solar wind velocity V_{sw} to the first (or a little higher) power, transverse IMF component B_T to the first (or a little lower) power, and $\sin \theta_c$ to the second (or more) power (θ_c is clock angle between B_T and the geomagnetic dipole).

The solar wind parameters determining the coupling functions are fixed on board ACE spacecraft in the point of Lagrange L1, at distance of 1.5 million km far upstream of the Earth. This circumstance defines the most serious imperfection of all coupling functions

because the “estimated” characteristics of solar wind can be quite distinguished from characteristics of real solar wind coming into contact with the magnetosphere. Knowledge of the real solar wind impacting magnetosphere is necessary to monitor the magnetosphere state and to forecast the magnetospheric disturbances, which strongly affect many aspect of human activity. The *PC* index is intended to estimate the solar wind energy input into the Earth’s magnetosphere in actuality.

The *PC* index has been introduced [3, 4] to characterize the polar cap DP2 disturbances [5] produced in polar caps by southward IMF [6–9]. As results [9] showed, DP2 disturbances are generated by the magnetospheric field-aligned currents (FAC) in Region 1. As measurements at satellites demonstrated [10–13], the R1 FAC system with currents strongly dependent on IMF, which flow into ionosphere in the dawn sector and flow out of the ionosphere in the dusk sector, is permanently presented on poleward boundary of the auroral oval, the R2 FAC system with opposite directed currents is located on the equatorward boundary of the oval.

Statistical analysis of the relationships between the DP2 disturbances and various coupling functions showed [3] that the polar cap magnetic activity correlates the best with interplanetary electric field E_{KL} determined according to formula of Kan and Lee [14]

$$E_{KL} = V_{sw} \cdot (By^2 + Bz^2)^{1/2} \sin^2\theta/2 \quad (1)$$

where By and Bz are the azimuthal and vertical IMF components and θ is clock angle between the geomagnetic dipole and the IMF tangential component $B_T = (By^2 + Bz^2)^{1/2}$. Based on this result, the *PC* index, characterizing the polar cap magnetic activity generated by the EKL field, has been elaborated in the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI, St. Petersburg) [3] and put into the practical use in cooperation with, first, the Danish Meteorological Institute (DMI, Copenhagen) [4] and now the National Space Institute, Technical University of Denmark (DTU Space, Copenhagen). The 1-min *PC* index is calculated independently by magnetic data from near-pole stations Qaanaaq (Thule) in the Northern hemisphere (*PCN*) and Vostok in the Southern hemisphere (*PCS*) beginning in 1998. The unified method for derivation of the *PC* index was formulated in [15].

This paper summarizes the results of long-standing researches of relationships between the *PC* index and such solar wind characteristics as interplanetary electric field and dynamic pressure impulses, on the one side, and between the *PC* index and magnetospheric disturbances (magnetic storms and substorms), on the other side. The aim of the paper is to demonstrate that the *PC* index can serve as reliable indicator of the solar wind energy, incoming into the Earth’s magnetosphere, and can be used in this charge to monitor the current state of magnetosphere and to verify whether or not the solar wind, whose parameters were measured in the Lagrange point, encounters the magnetosphere in reality.

2. *PC* INDEX: METHOD OF DERIVATION

The unified technique for derivation of the *PCN* and *PCS* indices [15] consists of two separate procedures. In course of the first procedure the statistically justified regression coefficients α (slope), β (intersection) and angle φ , defining relationship between the interplanetary electric field E_{KL} and the DP2 magnetic disturbance vector δF , have been determined for each UT moment of each day of the year, basing on 1-min data of geomagnetic measurements at stations Thule and Vostok and E_{KL} data. Analysis carried out separately for epoch of the maximum solar activity (1998–2001), epoch of the minimum activity (1997, 2007–2009) and for the complete solar cycle (1998–2009)

has demonstrated [16] a close consistency of parameters α , β and φ for these different epochs of solar activity, if the proper choice of the quiet daily variation (QDC), as a level of reference for estimation of the polar cap magnetic activity, is made. The statistically justified coefficients α , β and φ , ensuring allowance for the diurnal and seasonal changes of δF response to E_{KL} variations, are used in everyday practice for calculation of PC_{inst} index for any instant moment UT

$$PC_{inst} = \xi (\delta F_{inst} - \beta) / \alpha \quad (2)$$

where δF_{inst} is value of the DP2 magnetic disturbance in this moment, ξ is the scale coefficient taken equal to 1 for convenience of comparison of the PC index with E_{KL} field (mV/m). Being calibrated for interplanetary electric field E_{KL} the PCN and PCS indices vary in conformity with E_{KL} and consistent, in general, one with another in their value and behavior irrespective of UT time and point of observation. Thorough description of method of the PC index derivation is given in [15, 16].

3. RELATIONSHIP BETWEEN PC INDEX AND MAGNETIC SUBSTORMS

3.1. PC index and substorm development

The name “magnetic substorm” was given to magnetic disturbances occurring in the auroral zone [17]. Their distinctive feature is formation of the westward and eastward ionospheric currents (electrojets) and development of corresponding strong negative and positive magnetic disturbances, which intensity is described by the 1-min AL and AU indices [18]. The “substorm” includes a lot of accompanying phenomena in the auroral zone, such as sudden auroral brightening (produced by the auroral particle precipitation), its poleward expansion, simultaneous sudden increase of westward electrojet intensity and others.

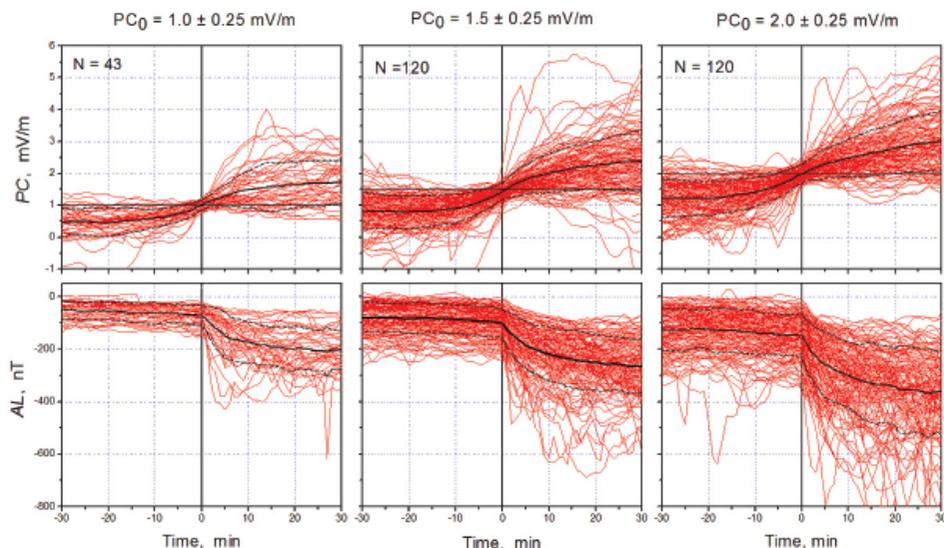


Fig. 1. Time evolution of PC and AL indices in course of magnetic substorms divided into groups according to value of PC at moment of the substorm sudden onset [19]

Рис. 1. Временной ход PC и AL индексов во время развития магнитной суббури. Суббури разделены на три группы в соответствии с величиной PC в момент внезапного начала суббури [19]

Relationship between the *PC* behavior and magnetic disturbances was examined in detail for different types of substorms in [16, 19]. Figure 1 shows, as example, time evolution of *PC* and *AL* indices in course of isolated substorms observed in epoch of the solar maximum (1998–2001), the value of *PC* in the winter hemisphere (*PCN* or *PCS*) being chosen for the analysis [19]. Substorms were divided into groups according to value of *PC* at moment of substorm sudden onset (SO) taken as a reference date ($T = 0$). Thin red lines represent a run of *PC* and *AL* in course of individual events. Thick black line represents variation of mean *PC* and *AL* values for each group. The following consequences were made:

- Development of magnetospheric substorms is always preceded by growth of the *PC* index.
- The substorm sudden onset (SO) is associated, as a rule, with the distinct *PC* value growth occurring in range of 0–10 min ahead of SO.
- If *PC* remains unchanged, the substorm does not begin till moment of the *PC* sharp growth.
- Occurrence of substorms SO reaches maximum (> 75 %) under values of $PC = 1\text{--}2$ mV/m, irrespective of the substorm growth phase duration and type of substorm.
- The *PC* growth rate is not affected by the substorm sudden onset.

The summarizing conclusion was that development and intensity of magnetic disturbances in the auroral zone is controlled by the *PC* index level [19].

3.2. Relation of *PC* index to magnetospheric field-aligned currents

Relationship between the field-aligned currents and the *PC* index was examined [20] basing on data of SWARM satellites. The Swarm mission includes three satellites, two of them, Swarm A and Swarm C, being flown side by side separated by 1.4° in longitude, at an altitude of about 460 km. Owing to orbital configurations three Swarm satellites covered all sectors of the auroral zone through 2014 year and provided information on field-aligned currents features in different FAC patterns. Method of estimation of the FAC density by data of Swarm measurements is described in [21, 22]. The R1 and R2 currents observed by SWARM satellites in dawn (06 MLT \pm 4h), dusk (18 MLT \pm 4h), noon (12 MLT \pm 2h) and midnight (00 MLT \pm 2h) sectors of the auroral zone were examined. The downwards currents (flowing into ionosphere) and upwards currents (flowing out of the ionosphere) were regarded, as positive and negative currents, correspondingly.

With aim to reveal a regular relationship between the R1 and R2 FAC intensities and the *PC* index in course of substorm development, the examination was restricted to growth phase of isolated substorms started against the background of magnetic quiescence. The data of Swarm satellites showed that the field-aligned currents in the morning sector of the auroral zone are always downwards (flowing into the ionosphere) in Region 1 and always upwards (flowing out of the ionosphere) in Region 2. The field-aligned currents in the evening sector of the zone are always upwards in Region 1 and downwards in Region 2. The field-aligned currents in the noon and midnight sectors in both R1 and R2 FAC systems can be positive as well as negative, the downwards currents in Region 2 being related to upward currents in Region 1, and vice versa.

Results of the analysis showed (Figure 2) that intensity of the field-aligned currents in Region 1 and Region 2 are well correlated ($R \sim 0.75$), the R1 FAC intensity being nearly

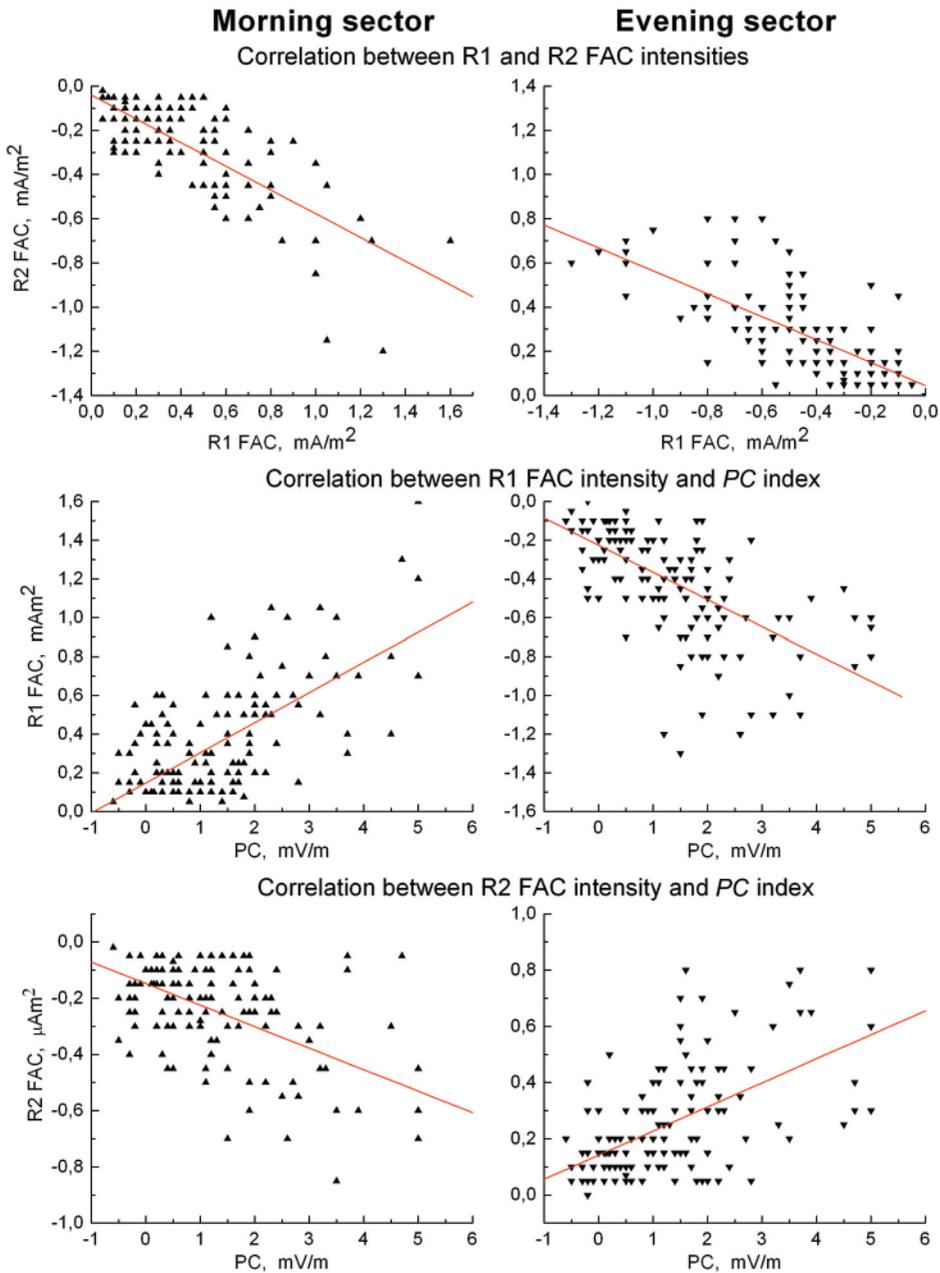


Fig. 2. Relationships between the R1 and R2 FAC intensities (upper panel), between the *PC* index and the R1 FAC intensity (middle panel) and between the *PC* index and R2 FAC intensity (lower panel) in the morning (06 MLT ± 4h) and evening (18 MLT ± 4h) sectors [20]

Рис. 2. Соотношение между интенсивностями продольных магнитосферных токов в системах R1 и R2 (верхний ряд), соотношение между величиной *PC* и интенсивностью продольных токов в системе R1 (средний ряд) и в системе R2 (нижний ряд) [20]

twice as large as R2 FAC intensity. Correlation between the PC index and FAC intensity in the morning and evening sectors of Region 1 ($R = -0.66$ and $R = 0.62$, correspondingly) is regularly greater than that in Region 2 ($R = 0.56$ and $R = -0.51$). Correlation between the PC index and R1 and R2 FAC intensities in the noon and midnight sectors of the auroral zone is negligible ($|R| < 0.22$).

Thus, analysis of relationship between the PC index and field-aligned currents measured by Swarm satellites has demonstrated that increase of R1 FAC intensity in dawn and dusk sectors of the oval in course of substorm development is evidently accompanied by the PC growth. The currents in the R2 FAC layer seem to be secondary in relation to R1 currents. Correlation between PC and field-aligned currents in the midnight as well as in the noon sectors was not found during the substorm growth phase. The results are indicative of the R1 field-aligned currents as a driver of the polar cap magnetic activity.

3.3. Seasonal dependence of correlation between AL and PCN/PCS indices

The method of the PC derivation [15] has been elaborated for on-line evaluation of the polar cap magnetic activity related to the E_{KL} field impact on the magnetosphere. The method determines effects of the R1 FAC system, generated by E_{KL} field, with allowance for regular daily and seasonal variations of ionosphere conductivity in the northern and southern polar caps. Nevertheless, the occasional discrepancies between PCN and PCS indices sometimes take place in summer/winter seasons [16]. To reveal regularity in appearance of these discrepancies, the following analysis has been fulfilled.

Correlation between PC and AL indices was examined in course of isolated substorms observed in period from 1998 to 2017. To exclude from consideration all implications of the preceding magnetic disturbances, the following strong restrictions have been imposed on magnetic disturbances included in the analysis ($N = 1470$): (1) the substorm sudden onset (SO) was identified as a moment when AL value dropped by 20 nT in the first minute and by no less than 50 nT in the subsequent 5 minutes, and (2) the magnetic substorms with SO occurring against the background of the quiet geomagnetic field were only examined. Correlation was estimated independently for PCN and PCS indices and for their mean value, $PC_{mean} = (PCN + PCS)/2$. The index (either PCN or PCS) supplied the higher correlation with substorm development, was identified as “ PC_{best} ” index for each substorm. Correlation between the appropriate PC and AL indices was calculated at the time interval from $T_0 - 30$ min to $T_0 + 15$ min (where T_0 is SO moment) with different time shifts of AL relative to PC ; the value of displacement providing the higher correlation was identified as a delay time (ΔT) in AL response to PC changes. Figure 3 shows distribution of substorms number over the correlation coefficients R (upper panel) and delay times ΔT (lower panel) for two PC index options: PC_{best} and PC_{mean} .

In case of PC_{best} the good correlation $R > 0.5$ was observed in 1302 cases (89 %) of 1470 examined substorm events, in case of PC_{mean} the good correlation was observed in 1144 events (~78 %). Delay times ΔT of response of AL index to the PC index changes were in range from zero to ten minutes with maximum at $\Delta T = 0-1$ minutes for both PC_{best} and PC_{mean} . Examination of the storm events with poor correlation ($R < 0.5$) between PC and AL indices showed that these events started under conditions of strongly undulating PC index; these storm events, demonstrating effect of spontaneous processes developing in auroral magnetosphere in course of growth phase, were also excluded from further examination.

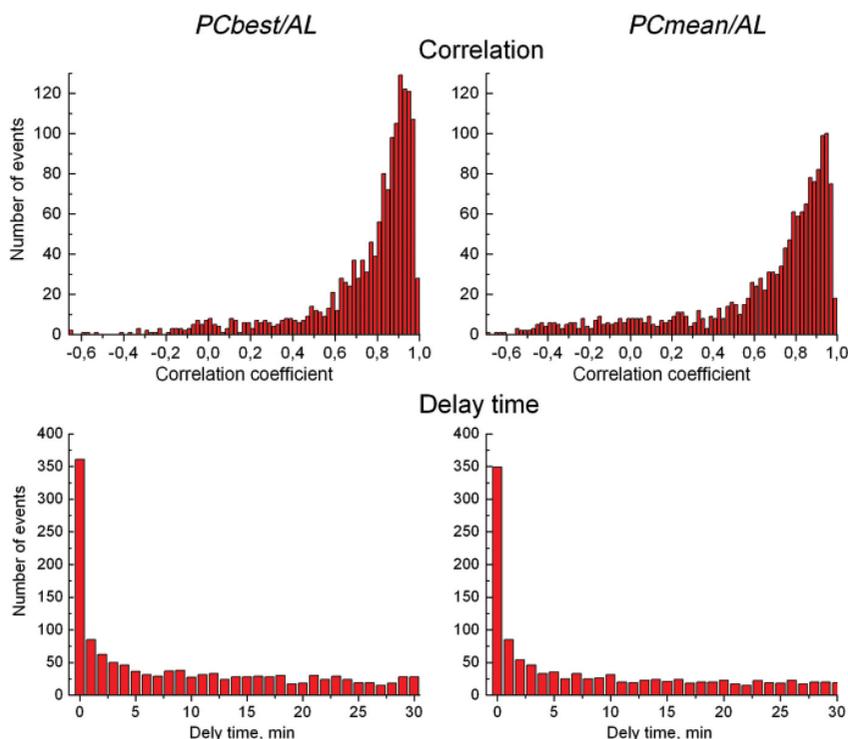


Fig. 3. Correlation between the *PC* and *AL* indices in course of substorm development
 Рис. 3. Корреляция между *PC* и *AL* индексами в ходе развития магнитной суббури

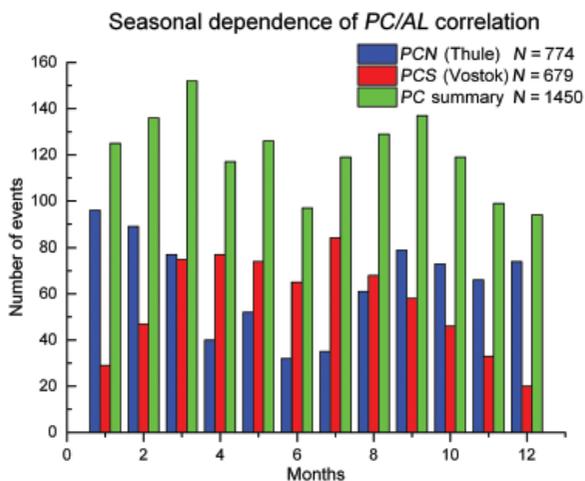


Fig. 4. Seasonal dependence of correlation between the *PCbest* and *AL* indices
 Рис. 4. Сезонные изменения величины корреляции между индексами *PCbest* и *AL*

Figure 4 shows the number of the *PCNbest* and *PCSbest* occurrences and their total number over the year. The distinct seasonal dependence in occurrence of the *PCNbest* and *PCSbest* indices in correlation with *AL* is seen: the *PCNbest* index input is about twice

as much as the PCS_{best} index input during November–February (winter in the Northern hemisphere), whereas the PCS_{best} index input is about twice as much as the PCN_{best} index input during April–July (winter in the Southern hemisphere), the input of both indices being nearly equal in March and August–September (equinox in both hemispheres). It means that magnetic substorm development correlates with magnetic activity in the winter polar cap (PC_{winter}) better than with magnetic activity in the summer polar cap (PC_{summer}).

Discordance between the PC_{winter} and PC_{summer} indices is explained [15] by effects of the specific field-aligned currents (BY FACs), which are generated in the magnetosphere under influence of the IMF azimuthal component. Whereas the R1 FAC system, responsible for DP2 disturbances, always generates the dawn-dusk electric field in the near-pole ionosphere of both, winter and summer, polar caps, the polarity of currents in the BY FAC system, being opposite in the northern and southern hemispheres, is determined by sign of the IMF B_y component [23–25]. Since the B_y dependent field-aligned currents are closed in the day-time cusp region, their intensity is very sensitive to the polar ionosphere conductivity: they are maximal in the sun-lighting summer polar cap and are practically unnoticed in the dark winter polar cap. As consequence, magnetic disturbances related to BY FAC system, can essentially affect the summer polar cap magnetic activity controlled by E_{KL} field [16] resulting in overestimation of the PC_{summer} index value since the method of the PC derivation [15] can not make on-line allowance for unpredictable variations of currents in the BY FAC system.

Results of the present study convincingly show that occasional discordances between PCN and PCS indices, typical of summer/winter seasons, are not related to quality of PCN or PCS indices, as such, but defined by different status of the PC indices in the winter and summer polar caps. The PC_{winter} index ensures the better correlation with E_{KL} field and, therefore, provides the more precise information on the geoeffective solar wind coupling with the magnetosphere. Therefore, the problem of choosing between the PCN and PCS indices as a reliable indicator of the E_{KL} field is easily resolved by use of the PC_{winter} index irrespective of hemisphere, the IMF amplitude and orientation and the magnetic activity level.

3.4. PC index and intensity of magnetic substorms.

Intensity of magnetic disturbances in the auroral zone (AL index) is linearly related to the PC value before and after the substorm onset T_0 (Figure 5). Slope coefficient characterizing

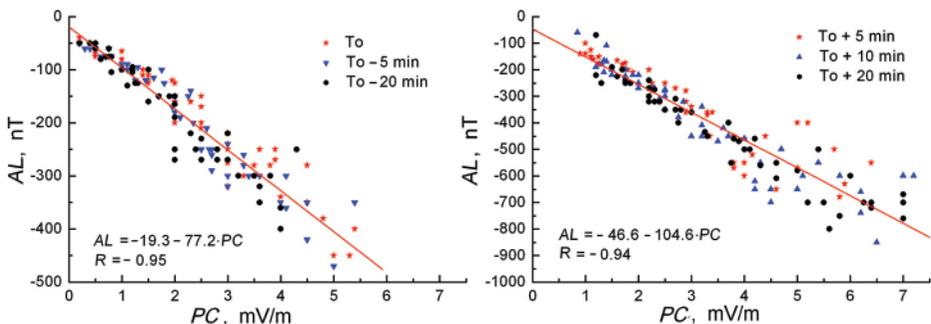


Fig. 5. Linear relationship between the PC index value and intensity of magnetic disturbances (AL index) before and after the substorm sudden onset T_0 [19]

Рис. 5. Линейная зависимость между величинами PC и AL индексов перед началом магнитной суббури и после внезапного начала суббури (момент T_0) [19]

linear linkage between *PC* and *AL* indices strongly increases after the substorm onset as an evident consequence of the auroral particle precipitation giving rise to ionospheric conductivity and powerful westward auroral electrojet in course of the substorm expansive phase.

4. RELATIONSHIP BETWEEN *PC* INDEX AND MAGNETIC STORMS

4.1. *PC* index and magnetic storms development

The name “magnetic storm” was given to the strong negative geomagnetic disturbance (geomagnetic depression), which is produced over the entire planet by ring (*DR*) currents flowing in the inner magnetosphere [26]. The geomagnetic field depression in the equatorial region is usually estimated by 1-hour *Dst* index or by 1-min *SymH* index, the maximal depression being regarded as a storm intensity.

Relationship between the *PC* index behavior and magnetic storms was examined with use of *Dst* index [16, 27] and with use of *SymH* index [19]. Analyses demonstrated the similar results in total, however use of the 1-min *SymH* index reveals more particularities in the storm development. The following criteria have been used in study [19] for separation of storm events for analysis: (1) depression of magnetic field during storm should be larger than $Dst = -30$ nT, the depression advent being regarded as a beginning of the storm main phase, and (2) duration of magnetic storm should be longer than 12 hours, the maximum of depression (*Dstmin*) being regarded as a magnetic storm intensity. Magnetic storms were separated onto 5 categories according to their intensity. Basing on these criteria, 429 magnetic

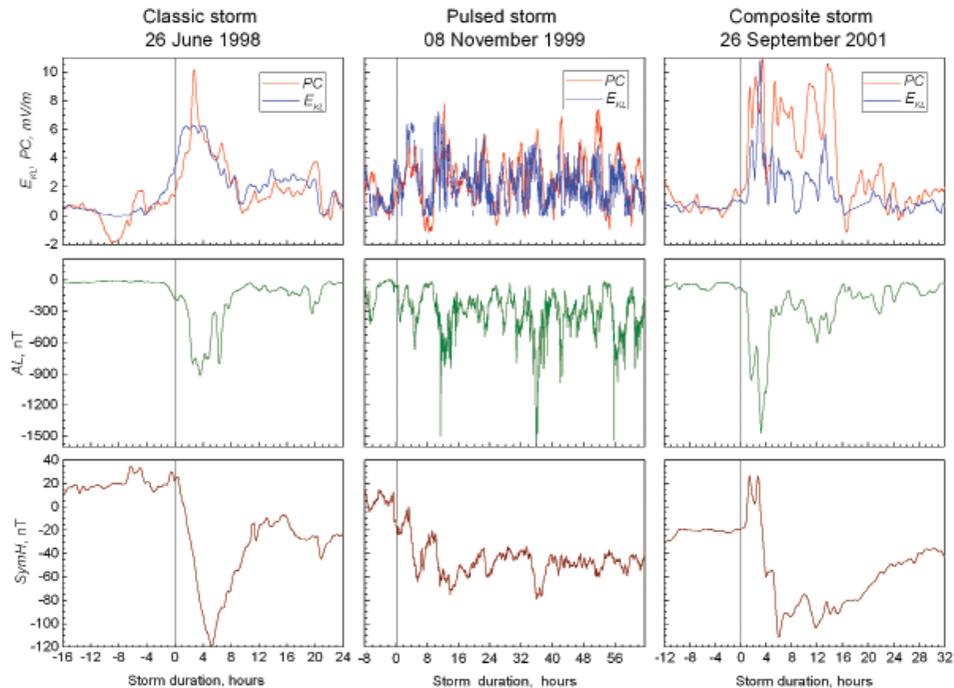


Fig. 6. Examples of three basic types of the magnetic storm development determined by peculiarities of the *PC* index behavior [19]

Рис. 6. Три основных типа развития магнитных бурь, определенных по характерным особенностям временного хода *PC* индекса [19]

storms were separated for the epoch of 1998–2015 with a maximal storm intensity varying in the range from $Dst = -30$ nT to $Dst = -400$ nT. The 1-min PC , AL and $SymH$ indices were smoothed with use of the running window of 30-min width to make allowance for different time scale of disturbance processes, typical of the polar cap and auroral zone (~ 1 min) and for the ring currents in the inner magnetosphere (\sim tens minutes).

Taking particularities of the PC index behavior in course of storm as a principle, the three types of magnetic storms have been recognized (Figure 6), such as “classic”, “pulsed” and “composite” ones. **Classic storms** (~ 42 % of total storm number) demonstrate the main phase with one clearly expressed maximum of depression. **Pulsed storms** (~ 27 %) contain a series of periodically repeating depressions, which can last for many hours. **Composite storms** (31 %) are superposition of classical and pulsed storms. Comparison of these types of storms with the storm events presented in catalogues [28, 29] showed that classic storms are related mainly to Interplanetary Coronal Mass Ejections (59 %), the powerful magnetic storms ($Dst < -120$ nT) being generated exclusively by ICME. The pulsed storms are associated with Stream Interaction Regions (SIRs) or Corotating Interaction Regions (CIRs) (64 %), the intensity of pulsed storms being weak ($Dst > -90$ nT). The composite storms are related either to ICME (32 %) or to SIR (44 %), or to their joint action, the weak storms ($Dst > -60$ nT) being related mainly to SIR.

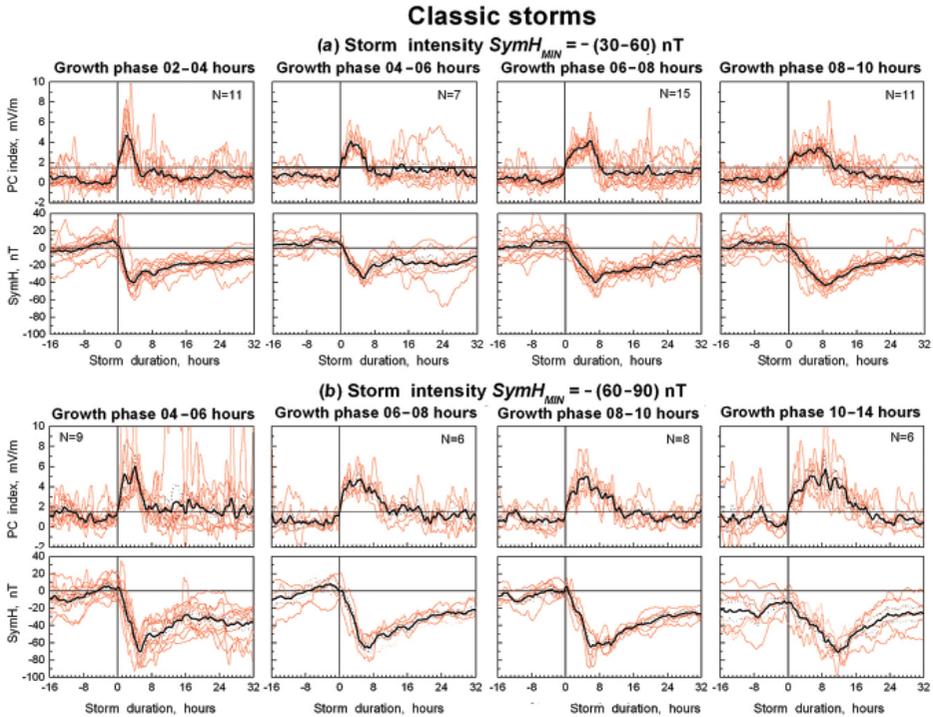


Fig. 7. Relationships between the PC time evolution (upper panel) and the storm progression of $SymH$ (lower panel) in case of classic storms with different PC growth durations for 2 categories of classic storms: (a) $Dst = -(30-60)$ nT, (b) $Dst = -(60-90)$ nT [19]

Рис. 7. Соотношение между временным ходом PC индекса (верхний ряд) и развитием магнитной бури по данным $SymH$ индекса (нижний ряд) для двух категорий классических бурь: (a) $Dst = -(30-60)$ nT и (b) $Dst = -(60-90)$ nT при разной длительностью фазы роста PC [19]

Figure 7 shows, as example, statistical relationships between the PC time evolution (upper panel) and the storm progression of $SymH$ (lower panel) in case of classic storms with different PC growth durations for categories of classic storms with $Dst = -(30-60nT)$ (a) and $Dst = -(60-90nT)$ (b). Thin red lines show run of the PC and $SymH$ indices in course of individual events, thick black solid lines show behavior of the PC and $SymH$ values averaged for each storm category and group. Vertical solid lines indicate the key moment T_0 , when the PC value steadily exceeded the threshold level $PC = 1.5$ mV/m, the horizontal lines on PC panels denote the threshold level.

The conclusion was made that progression of a magnetic storm is always predetermined by time evolution of the PC index:

- Magnetic storms start to develop when the PC index steadily (during time interval more than 1 hour) exceeds the threshold ~ 1.5 mV/m.
- Maximal depression (the magnetic storm intensity) is reached with time delay $\Delta T > 30$ min after the moment of the PC index maximum.
- Storm progression lasts as long as PC exceeds the threshold level and begins to decay as soon as the PC value displays decline; as a result, the storm growth phase duration is determined by time period with $PC > 1.5$ mV/m.

4.2. Statistical relationships between PC_{MAX} and $SymH_{MIN}$ values

The storm intensity is determined by the preceding PC index value. Figure 8 shows relationship between the maximal depression of geomagnetic field ($SymH_{MIN}$) and the

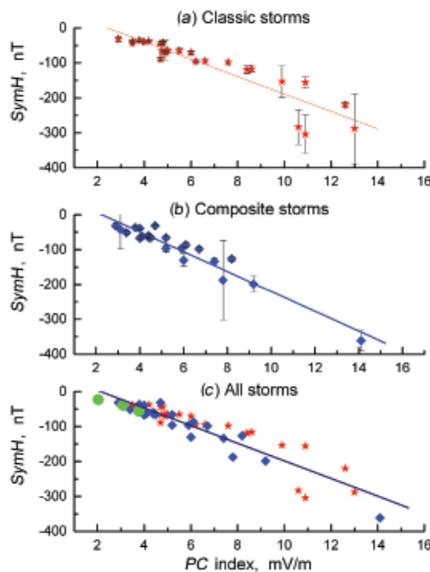


Fig. 8. Relationship between the associated mean values of $SymH_{MIN}$ and PC_{MAX} for classic (a) and composite (b) storms, the standard deviation for each point being marked by vertical bars. Panel (c) presents integrated dependence of $SymH_{MIN}$ on PC_{MAX} , with inclusion of data for pulsed storms (green circles) [19]

Рис. 8. Линейная связь между соответствующими средними величинами $SymH_{MIN}$ и PC_{MAX} для магнитных бурь классического (a) и смешанного (b) типов; интегральная зависимость (c) включает пульсационный тип магнитной бури (зеленые ромбики) [19]

30-min smoothed PC value maximum (PC_{MAX}) preceding the maximal depression for classic (a), composite (b) and all types (c) of magnetic storms. The integral dependence of $SymH_{MIN}$ on PC_{MAX} , including the mean values of $SymH$ and PC for pulsed storms, can be described by linear relationship, with coefficient of correlation $R = -0.93$, as follows:

$$SymH_{MIN} = (54.4 \pm 9.7) - (25.6 \pm 1.5) \cdot PC_{MAX}$$

Delay times ΔT in response of $SymH_{MIN}$ to the PC_{MAX} occurrence lie in the range from 30 to 180 minutes, being dependent on peculiarities of the PC index growth. The shortest delay time ($\Delta T \sim 30-45$ min) is observed in case of uniform and strong PC increase; the longer the PC growth period, the larger is delay time (see Figure 7). Correlation between the PC and AL indices in course of magnetic storm is always better than $R = 0.5$, in 72 % of storms the correlation coefficients being higher than 0.75 [19].

5. RELATIONSHIP BETWEEN THE PC INDEX AND INTERPLANETARY ELECTRIC FIELD E_{KL}

5.1. Correlation between E_{KL} field and PC index

The value and time evolution of interplanetary electric field E_{KL} and, correspondingly, extent of the solar wind impact on magnetosphere is determined by of the solar wind parameters. Agreement between E_{KL} and PC is the most typical of conditions of the quiet solar wind, when both quantities are at low level [3]. However correlation between E_{KL} and PC in this case may be quite different, from high to zero, depending on noisy level, which can be higher than low steady useful signal. Examination of disturbed events may be more fruitful, especially for disturbances starting against the quiet background, when the useful signal can be easily recognized. Under disturbed events we shall examine disturbances in solar wind (sharp increase of E_{KL} field) as well as magnetospheric disturbances (crucial growth of PC index or/and development of substorms).

Typical examples of variations of E_{KL} field, and PC , AL indices during disturbed events are given in Figures 9 and 10, where the upper panel shows the behavior of E_{KL} field (green) and PC_{mean} index (violet), the middle panel is for PCN and PCS indices (blue and red lines), and low panel is for AL and AU indices, characterizing the magnetic activity in the auroral zone. Figure 9 shows coordinated changes of E_{KL} , PC and AL in course of isolated magnetic substorms, the moment of substorm onset being marked by vertical dotted line. Usually PC index strongly follows to changes in the interplanetary electric field E_{KL} (Figure 9 a, b, c): the magnetic substorm starts in association with increase of the PC growth rate, which responds, in its turn, to sharp increase of the E_{KL} field. The substorm on October 21–22, 1999 (Figure 9c) displayed two successive sudden onsets (in 23:40UT and 00:55UT), associated with the corresponding jumps in the PC growth rate.

Figure 9d demonstrates the specific event when jump in PC index was registered ~ 10 min ahead of the appropriate E_{KL} field increase. Since E_{KL} field is estimated by data on the solar wind parameters measured in the Lagrange point (far upstream of the magnetosphere), it is logically suggest that in case of substorm on August 27, 2001 the actual solar wind, measured in Lagrange point, traveled in space with acceleration, as a result the real contact of E_{KL} field with magnetosphere occurred ahead of the “estimated” contact.

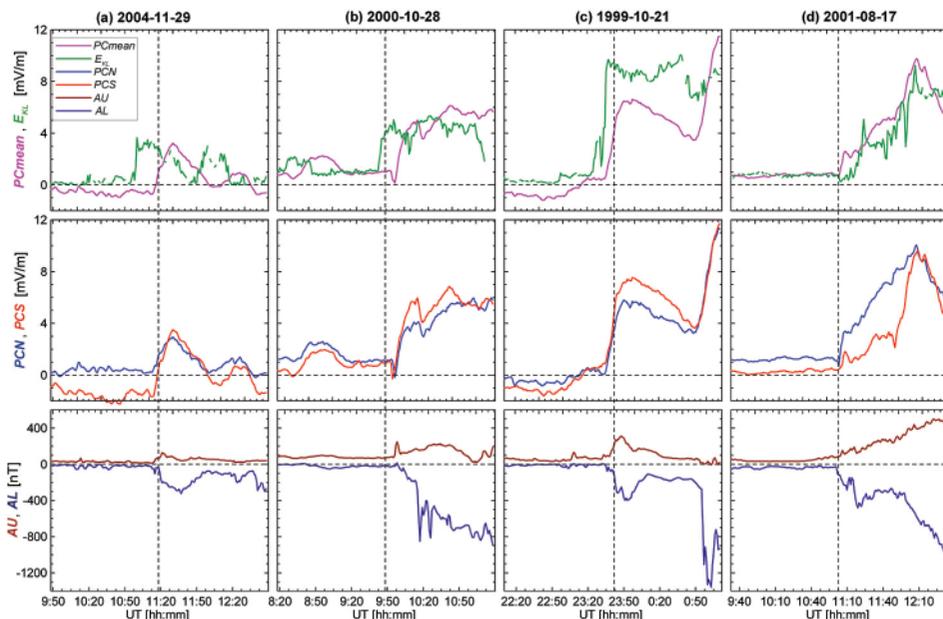


Fig. 9. Coordinated changes of E_{KL} field and PC_{mean} index (upper panel), PCN and PCS indices (middle panel), AU and AL indices (lower panel) in course of isolated magnetic substorm

Рис. 9. Согласованные изменения поля E_{KL} и индекса PC_{mean} (верхний ряд), PCN и PCS индексов (средний ряд), AU и AL индексов (нижний ряд) в ходе изолированной магнитной суббури

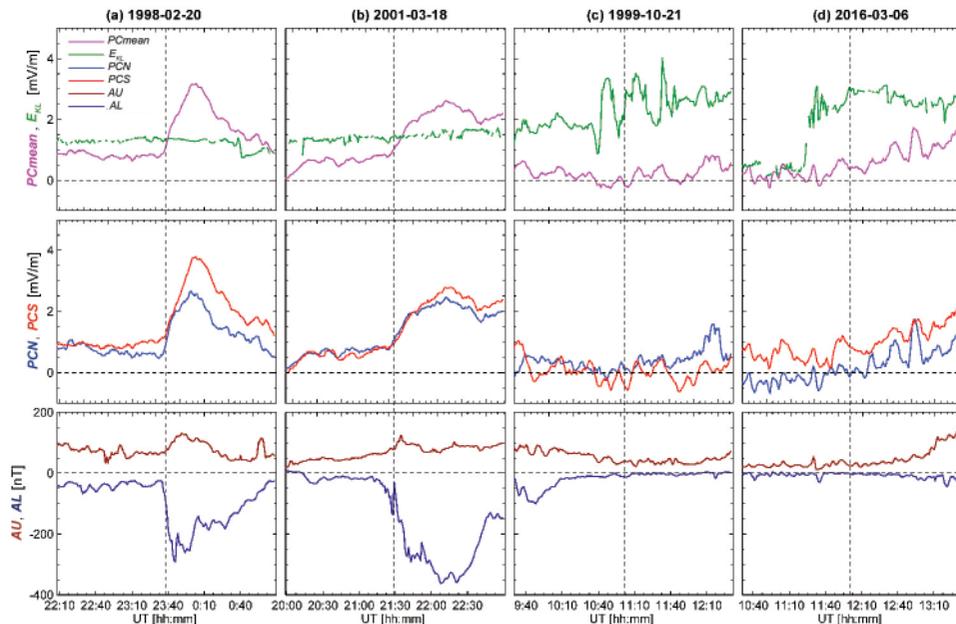


Fig. 10. Examples of inconsistency in behavior of E_{KL} field and PC , AU/AL indices

Рис. 10. Примеры несоответствия в поведении поля E_{KL} и PC , AU/AL индексов

Figure 10 gives examples of events when the time evolution of the E_{KL} field and behavior of the PC and AU/AL indices were different in principle. In case of events on February 20, 1998 and March 18, 2001 (Figure 10 *a, b*) the jump of PCN and PCS indices above level ~ 2 mV/m was accompanied by onset of substorm (with intensity $AL \sim -400$ nT), as this took place, the interplanetary electric field was unchanged and quiet ($E_{KL} \sim 1$ mV/m). Thus, behavior of the PC and AL indices testifies with confidence that magnetosphere was subjected to action of the geoeffective solar wind, whereas the “estimated” E_{KL} field turned out to be inefficient. By contrast, in case of events on 12 January 2003 and 06 March 2016 (Figure 10 *c, d*) the “estimated” E_{KL} field (derived from OMNI data) demonstrated sharp increase above level of 2 mV/m for long, but this increase was not followed by the PC index growth and substorm development. It implies that actual E_{KL} field coupling with magnetosphere was ineffective contrary to “estimated” E_{KL} field.

The substorm development is evidence of the magnetosphere coupling with the disturbed solar wind (i.e. with geoeffective E_{KL} field). Indeed, Figures 9, 10 demonstrate (in full agreement with results [19] presented in section 2.1) that magnetic activity in the auroral zone is strongly related to PC index behavior: if the PC index value is below threshold level, the activity (AL index) is small, when the PC index sharply grows, the substorm starts. Therefore, the high correlation between changes of PC and AL indices in case of substorm should be considered as decisive evidence of the magnetosphere coupling with the high-effective E_{KL} field, which determines the appropriate PC value and behavior. Just this factor was taken into account when relationship between the PC index

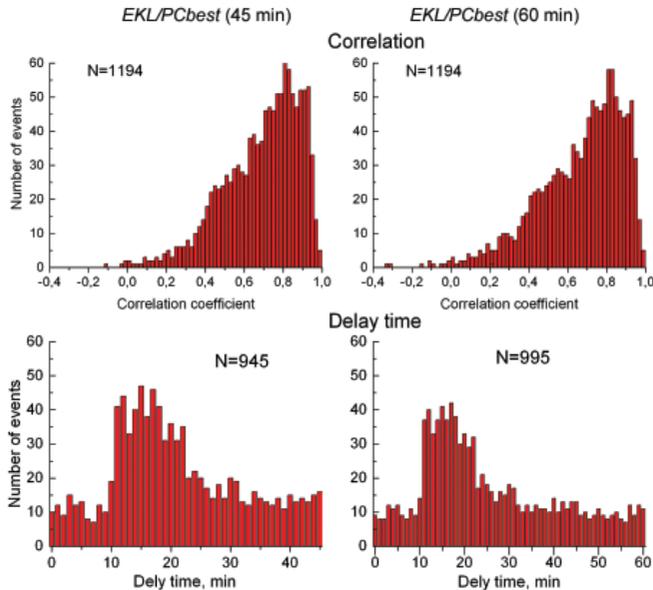


Fig. 11. Distribution of coefficients of correlation between the E_{KL} field and $PCbest$ index and delay times in $PCbest$ response to E_{KL} variations in case of isolated substorms

Рис. 11. Распределение коэффициентов корреляции между вариациями поля E_{KL} и $PCbest$ индексом и величины временной задержки отклика $PCbest$ на изменения поля E_{KL} в случае изолированных суббурь

and interplanetary electric field E_{KL} was studied in course of isolated magnetic substorms, only substorms demonstrating a good correlation ($R > 0.5$) between the PC_{best} and AL indices (see section 2.3) being included into the analysis.

Figure 11 shows distribution of number of events over the values of coefficient of correlation between E_{KL} field and PC_{best} index (upper panel) and over the values of delay time in response of PC to E_{KL} changes for two lengths (45-min and 60-min) of the time intervals preceding the substorm onset. The results of the analysis showed that well correlation ($R > 0.6$) between variations of E_{KL} field and PC_{best} index is observed in about 80 % of substorm. Usually the E_{KL} increase was followed by the PC_{best} growth with delay time $\Delta T \sim 12\text{--}22$ min, in few cases the high correlation between E_{KL} and PC variations was observed with negative ΔT values (the moment of actual contact was registered ahead of moment of “estimated” contact). Other 20 % of events are indicative of loss of correlation between the “estimated” E_{KL} field and PC index, in spite of fact that development of these substorms was associated with preceding PC growth. It implies that the “estimated” E_{KL} field in course of these events did not contact with magnetosphere and, consequently, the solar wind fixed in the Lagrange point was not consistent with real solar wind impacting on the magnetosphere. These results are in agreement with results of analogous analysis [19] obtained for substorms observed in epoch of solar maximum (1998–2001): correlation $R > 0.5$ was observed in ~ 80 % of examined substorms with delay time $\Delta T \sim 10\text{--}24$ min.

5.2. Factors controlling response of PC index to E_{KL} field variations

To reveal the factors controlling the time delay ΔT value, the events with the obviously conforming behavior of PC and E_{KL} on the 2-hour interval preceding SO (“coordinated events”) were examined [19]. The 1-min values of V_x , B_z , E_{KL} and PC fixed in course of coordinated events were smoothed with use of the boxcar average of the 15-min width, and then they were divided into different groups according to delay value ΔT , the moment of the sudden jump of the 15-min smoothed E_{KL} being taken as a zero time T_0 . The behavior of the smoothed values of V_x , B_z , E_{KL} and PC in course of coordinated events is shown in Figure 12 for the statistically justified groups with $\Delta T=10\text{--}12$ min ($N=33$), $\Delta T=13\text{--}15$ min ($N=53$), $\Delta T=16\text{--}18$ min ($N=60$) and $\Delta T=19\text{--}21$ min ($N=38$). Thin red lines represent the time evolution of V_x , B_z , E_{KL} and PC in course of individual events. Solid black lines show the behavior of the mean V_x , B_z , E_{KL} and PC quantities for each ΔT group. Vertical lines mark the delay time interval boundaries T_0 and $T_0 + \Delta T$, the latter corresponds to the moment when the PC index starts to increase.

As Figure 12 (1st panel) shows, the delay time tends to increase while the mean value of $|V_x|$ decreases. Nevertheless, the solar wind speeds V_x , as large as -800 km/s and as small as -300 km/s, are common for any ΔT group. Besides, the time evolution of V_x is not responsive to the moment T_0 . The IMF vertical B_z component (2nd panel) starts to turn down (southward) just at the moment T_0 , the regularity being evident for individual events, as well as for mean B_z in each ΔT group: the higher the B_z alteration magnitude (ΔB_z) is, the shorter the delay time ΔT is. However, the larger ΔB_z values are built up at the expense of positive (northward) B_z preceding the moment T_0 , whereas the base level of negative (southward) B_z after the T_0 moment is ~ -3.5 nT for all ΔT groups. At the same time, the correlation between ΔT and the E_{KL} field (3rd panel) turns out to be quite explicit: the higher the E_{KL} raise (ΔE_{KL}) during the ΔT interval, the shorter is the delay time ΔT in response of PC to the E_{KL} raise.

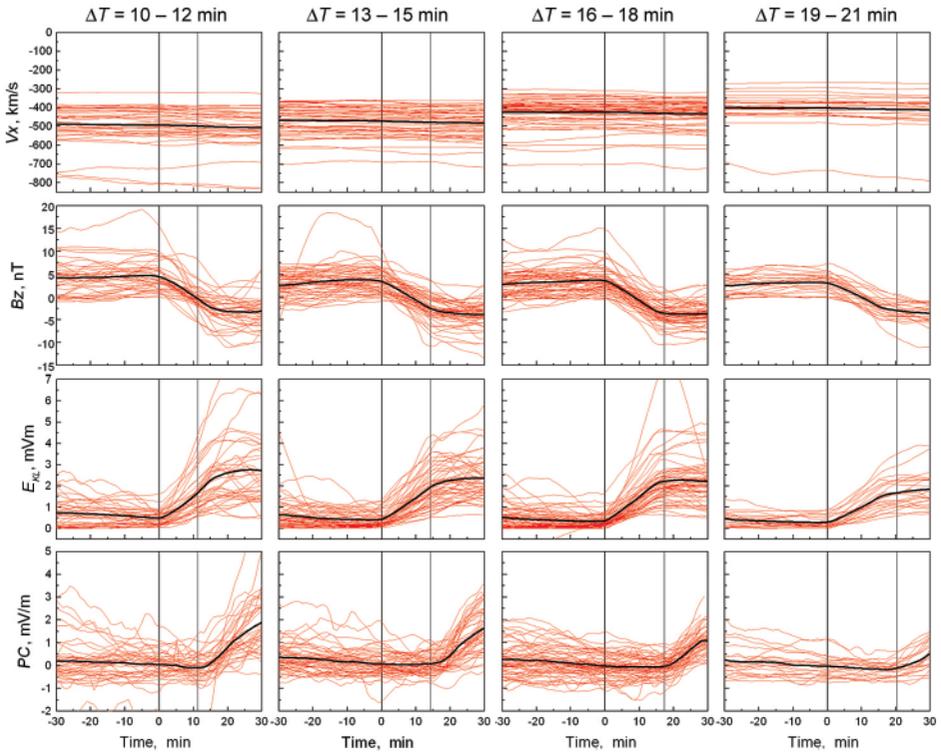


Fig. 12. Time evolution of the 15-min smoothed values V_x , B_z , E_{KL} and PC observed in case of coordinated substorm events with delay times $\Delta T = 10-12, 13-15, 16-18$ and $19-21$ min [19]

Рис. 12. Временной ход 15-минутных сглаженных величин V_x , B_z , E_{KL} и PC в случае координированных изменений E_{KL} и PC при разных задержках в отклике PC на изменения E_{KL} ($\Delta T = 10-12, 13-15, 16-18$ и $19-21$ мин) [19]

6. RELATION OF PC INDEX TO THE SOLAR WIND DYNAMIC PRESSURE IMPULSES P_{sw}

Interplanetary shocks denote sudden and strong enhancements of the solar wind dynamic pressure occurring when the high-speed solar plasma flows are propagated through space with low-speed plasma. Impact of interplanetary shock on the Earth's magnetosphere initiates the magnetosphere compression which display as the geomagnetic field sudden impulse (SI). Effects of the compression waves propagated in the magnetosphere were detected in oscillations of the magnetic field and the energetic particle flux at geosynchronous orbit. Evidences on influence of the solar wind pressure impulses on substorms and magnetic storms development are ambiguous. On the one hand, it has long been known that power of magnetospheric disturbances (auroral particle precipitation, intensity of auroral electrojets, ring current injection rate and others) increases in connection with the solar wind dynamic pressure. On the other hand, all these effects may be associated with the southward IMF fluctuations which are typical of the interplanetary shocks.

Relation of PC index to interplanetary shocks was examined [33] for the magnetic storm events with distinctive initial phase selected by data on the solar wind dynamic pressure (P_{sw}) [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. The event with sudden dynamic pressure impulse (SI) was identified as a P_{sw} increase by value more than 10 nP within 5 minutes. The 1-min solar wind parameters, such as radial solar wind speed (V_x), vertical IMF component (B_z) and interplanetary electric field (E_{KL}), fixed in the point of libration and reduced to the magnetopause, were regarded as indicators of the solar wind geoefficiency.

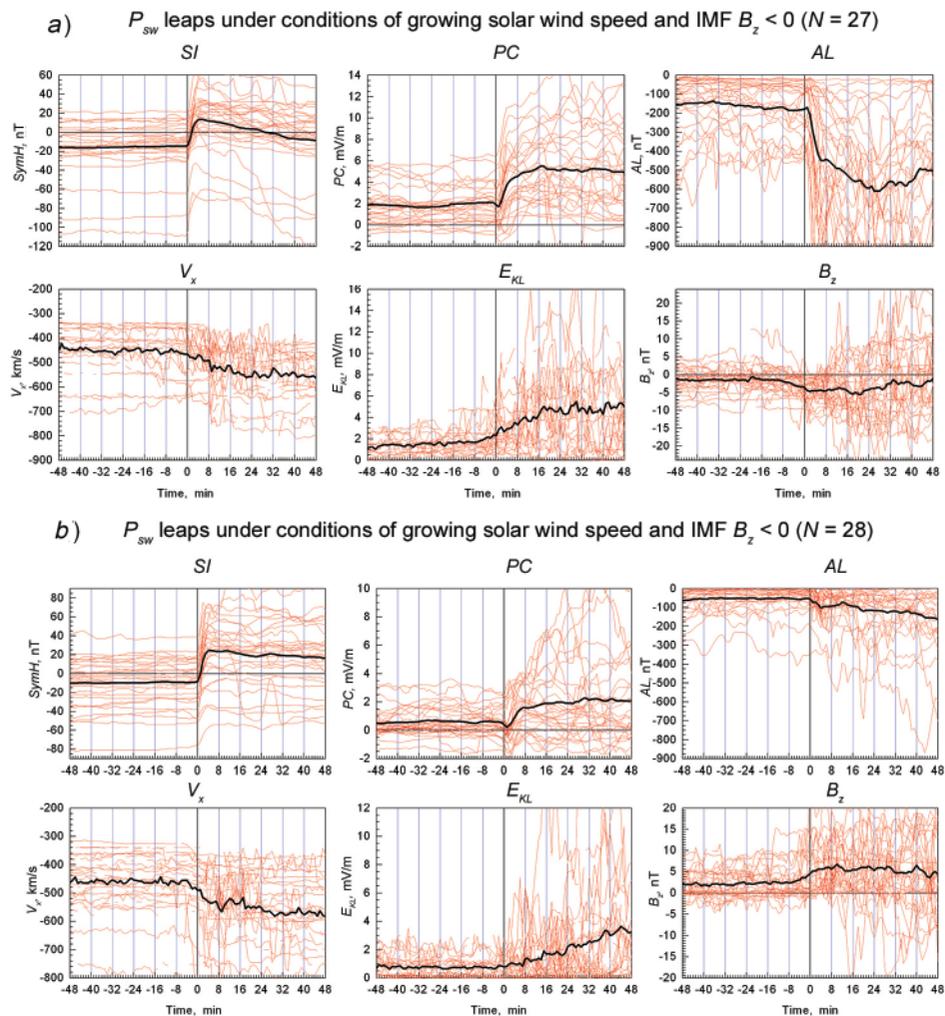


Fig. 13. Time evolution of the actual ground-based SI events (identified with the P_{sw} leaps), solar wind parameters V_{sw} , B_z , E_{KL} and indices PC , AL under conditions of growing solar wind speed and negative (a) and positive (b) IMF B_z values [33]

Рис. 13. Временной ход внезапных импульсов геомагнитного поля SI (отождествляемых со скачками динамического давления солнечного ветра P_{sw}), параметров солнечного ветра V_{sw} , B_z , E_{KL} и индексов PC , AL при растущей скорости солнечного ветра и отрицательных (a) и положительных (b) значениях B_z компоненты ММП [33]

The 1-min *PC* index used in the analysis presents the mean value of magnetic activity in the northern (*PCN*) and southern (*PCS*) polar caps. The value of magnetic disturbances in the auroral zone (*AL* index) was examined as an indicator of the magnetospheric activity.

The actual moment of contact of the SI impulse with magnetosphere was determined by sharp jump in the ground-based *SymH* index, the impulses power being expressed in the geomagnetic field units (nT). To minimize influence of the preceding disturbances on behavior of SI events the following criteria were used while separating the events for analysis: (1) SI jump should start against the background of steady quiet geomagnetic field lasting over 45 min, (2) magnitude of SI jump should raise more than 8 nT over the 8 minutes after the jump beginning. The SC events ($N = 108$) matching these requirements were subjected for the analysis. Results of the analysis were presented as graphs summing up the time evolution of the ground-based SI events and indices *PC*, *AL*, on the one hand, and such solar wind parameters, as the solar wind speed V_{sw} , interplanetary electric field E_{KL} and IMF B_z component, on the other hand, for the following solar wind conditions:

- Pd leaps under conditions of growing solar wind speed with $B_z < 0$ and with $B_z > 0$,
- Pd leaps under conditions of steady solar wind speed with $B_z < 0$ and with $B_z > 0$,
- Pd leaps under conditions of steady solar wind speed and $B_z = 0$,
- Pd leaps under conditions of fluctuating B_z and fluctuating solar wind speed.

Character of relationships between the SI magnitude and *PC/AL* indices is demonstrated by Figure 13 for conditions of growing solar wind speed with $B_z < 0$ (a) and $B_z > 0$ (b), and by Figure 14 for conditions of steady solar wind speed and $B_z = 0$.

The results of the analysis are summarized in Table 1, showing the mean values of *PC* and *AL* indices in course of the SI impulses under different solar wind conditions. The SI magnitude was evaluated as a maximal value of the *SymH* leap in course of SI event counted from the preceding quiet level. The values of V_{sw} , B_z and E_{KL} averaged over the first 8 minutes after the SI beginning were examined as the mean solar wind characteristics in course of P_{sw} impulse

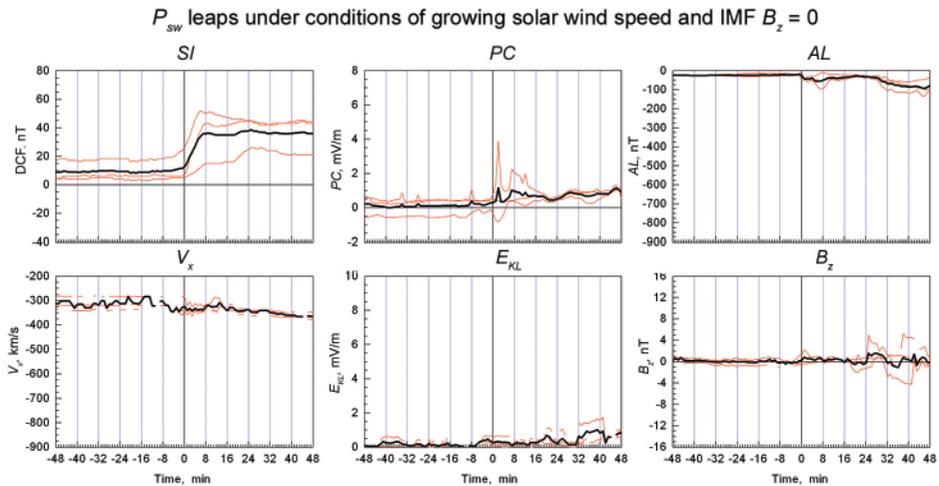


Fig. 14. Time evolution of the actual ground-based SI events, solar wind parameters V_{sw} , B_z , E_{KL} and *PC*, *AL* indices under conditions of steady solar wind speed and $B_z = 0$ [33]

Рис. 14. Временной ход внезапных импульсов геомагнитного поля SI, параметров солнечного ветра V_{sw} , B_z , E_{KL} и индексов *PC*, *AL* при стабильной скорости солнечного ветра и $B_z = 0$ [33]

Relationships between mean values of SI, *SymH*, *PC* and *AL* during pressure impulses

Таблица 1

Соотношения между средними величинами SI, *SymH*, *PC* и *AL*

Parameters	Growing V_{sw}		Steady V_{sw}	
	$B_z < 0$	$B_z > 0$	$B_z < 0$	$B_z > 0$
SI (nPa)	~10	~10	~10	~10
<i>SymH</i> (nT)	30	30	18	20
<i>PC</i> (mV/m)	2.5	1.8	1.5	0.5
<i>AL</i> (nT)	300	50	75	0

Analysis of relationship between the solar wind dynamic pressure impulses (SI) and magnetic activity (*PC* and *AL* indices) [33] showed that under the same SI magnitude the magnetic disturbances intensity is maximal under conditions of southward IMF and growing solar wind velocity V_{sw} and falls to minimum under northward IMF and steady V_{sw} . When the pressure impulses are accompanied by the corresponding jump in E_{KL} field, the *PC* index correlates well with the pressure changes. Inconsistency between the pressure impulses and *PC* behavior becomes evident as soon as the E_{KL} variation starts to diverge from SI course. It means that pressure impulses themselves are not promote (or very insignificantly promote) the intensity of magnetic disturbances, which is controlled by the E_{KL} field and the appropriate *PC* index.

7. *PC* INDEX AS A PROXY OF THE SOLAR WIND ENERGY INCOMING INTO THE MAGNETOSPHERE

The above-outlined results demonstrate that *PC* index unambiguously responds to variations of the interplanetary electric field E_{KL} coupling with the magnetosphere, on the one hand, and predetermines progression and intensity of disturbances in the magnetosphere (substorms and magnetic storms), on the other hand.

The results convincingly indicate that *PC* index can be regarded as a proxy of the solar wind energy entering into the magnetosphere. Therein lies the principal distinction of the *PC* index from various coupling functions (which are characteristic of the solar wind arriving to the Lagrange point L1) and from D_{st} or *AL* indices (which are characteristics of the energy realized in the magnetosphere in form of magnetic storms and substorm). Taking into account this distinctive feature of the *PC* index, the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) approved the following resolution:

Resolution No. 3 of XXII Scientific Assembly of International Geomagnetism and Aeronomy Association (Mexico, August 2013):

IAGA, noting that polar cap magnetic activity is not yet described by existing IAGA geomagnetic indices,

considering that the Polar Cap (PC) index constitutes a quantitative estimate of geomagnetic activity at polar latitudes and serves as a proxy for energy that enters into the magnetosphere during solar wind-magnetosphere coupling,

emphasising that the usefulness of such an index is dependent on having a continuous data series,

recognising that the PC index is derived in partnership between the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI, Russian Federation) and the National Space Institute, Technical University of Denmark (DTU, Denmark),

recommends use of the *PC* index by the international scientific community in its near-real time and definitive forms, and

urges that all possible efforts be made to maintain continuous operation of all geomagnetic observatories contributing to the *PC* index.

8. *PC* INDEX AS A VERIFIER OF UTILITY OF SW PARAMETERS PRESENTED AT OMNI WEBSITE

During the two last decades, information on the solar wind parameters was provided by measurements on board ACE spacecraft in the Lagrange point L1, located ~1.5 million km upstream of the Earth. Just data of these measurements, presented in OMNI database (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), ensured a basis for estimation of the E_{KL} field reduced to magnetopause. In this connection it should be noted that solar wind parameters, measured in the Lagrange point, can be essentially modified in course of the solar plasma propagation through the heliosphere. As a result, the “estimated” solar wind fixed in the Lagrange point may even not encounter the magnetosphere at all, or, alternatively, its characteristics may be essentially changed.

Comparison of the solar wind parameters obtained in the Lagrange point and in vicinity of the magnetosphere was made by Vokhmyanin et al. [30] with use of measurements on board Geotail during 2-hr intervals when the spacecraft occurred to be, irrespective of the space weather conditions, in the front of magnetosphere. Results of the analysis have demonstrated that in ~ 25 % of examined intervals the relevant solar wind parameters fixed in the Lagrange point and in vicinity of magnetosphere were distinct. Authors note that E_{KL} values derived for two points turned out to be in good agreement ($R > 0.6$), when the E_{KL} field (derived from the OMNI data) correlated well with the *PC* index. Results of our analysis (see section 4.1) testify to inconsistency ($R < 0.5$) between the estimated E_{KL} field and *PC* index in ~ 20 % of examined substorm events, if the *PC* index in the winter hemisphere (*PCwinter*) is taken as a characteristic of the polar cap magnetic activity.

Thus, the *PC* index usage makes it possible to validate the actual interplanetary electric field coupling with the magnetosphere, and verify, in such manner, whether or not the solar wind, whose parameters are given in OMNI dataset, correspond to real solar wind in vicinity of the Earth’s magnetopause. The *PC* index can serve as a filter of the OMNI data applicability for analyses of the solar-terrestrial relationship. As an example, we can refer to “the extraordinary magnetic disturbances”, described in [31, 32] as developing under conditions of northward IMF. Analysis [16] has demonstrated that “extraordinary magnetic disturbances” took place when the *PC* index was in excess of threshold level ~1.5 mV/m., which is necessary and sufficient condition for magnetic disturbances development. Thus, “the extraordinary disturbances” turned into category of ordinary substorm events, as soon as the *PC* index was taken for estimation of space weather conditions.

9. AVAILABILITY OF THE *PC* INDEX

A great advantage of the *PC* index application over other methods based on the ground-based or satellite data is a permanent on-line availability of information on the magnetic activity in both northern and southern polar caps and, correspondingly, awareness of information on the solar wind energy input into the magnetosphere. A special procedure

agreed by the Arctic and Antarctic Research Institute (responsible for production of *PCS* index) and DTU Space (responsible for production of *PCN* index, beginning in 2010) ensures the calculation of the 1-min *PC* indices in quasi-real time based on data of magnetic observations at the polar cap stations Vostok and Qaanaaq. The *PCN/PCS* indices have three classes for operational use. The quick-look *PCN* and *PCS* indices, derived in near real time, are available at www.pcindex.org. It is routinely updated as new data are available in the 90 day window, as it requires future information to completely determine the index. The provisional *PC* index is determined using complete information in the 90 day window. The provisional values will eventually be superseded by the definitive *PC* value. The definitive *PCS* and *PCN* indices are published after quality control of the input data; the definitive *PCS* is available at the same website as the archive *PCS* data for 1997–2018 (with exception for 2003, because of the Vostok station ceased to operate that year). The definitive *PCN* is available from 1975–2017 at WDC for Geomagnetism, Copenhagen (www.space.dtu.dk/wdc/pcn-index/). The *PC* indices are also presented at the following websites:

https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html

<ftp://ftp.space.dtu.dk/WDC/indices/pcn/>

http://isgi.unistra.fr/indices_pc.php

ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/RELATED_INDICES/PC_INDEX

<https://www.ukssdc.ac.uk/Help/PCI.html>

10. CONCLUSION

The *PC* index was elaborated as a characteristic of magnetic activity produced in the polar caps by regular R1 FAC system related to interplanetary electric field E_{KL} coupling with the magnetosphere. The further investigations have convincingly demonstrated that development of magnetospheric disturbances (magnetic storms and substorms) occurs in evident correspondence with the *PC* index behavior and intensity. Based on these experimental facts the conclusion was made that the *PC* index can be regarded as a proxy of the solar wind energy incoming into the magnetosphere. Usage of the *PC* index in this charge showed its evident advantage over other indicators, like to coupling functions and the AL/AE , D_{st} indices.

High probability of inconsistency (~20%) between the SW parameters, measured in the Lagrange point and parameters of solar wind affecting the magnetosphere, opened one more important aspect of the *PC* index application. Indeed, the *PC* index can be successfully used to validate the utility of SW data presented at OMNI website (i.e. to verify whether or not the solar wind, measured in the L1 point, encountered the magnetosphere in actuality).

Acknowledgements. The work was supported by grant 18-05-80004 from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR). The solar wind and IMF data were obtained from the GSFC/SPDF OMNI/Web interface at <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>. The *AL* indices were provided by WDC-C2 Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/>). The *PC* indices are produced by data from northern (*PCN*) and southern (*PCS*) polar caps. The 1-min *PCS* and *PCN* indices calculated by the unified method in AARI and in the Space Institute of the Danish Technical University (DTU) are published on-line at site: <http://pcindex.org>.

REFERENCES

1. Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.I., Rich F.J. A nearly universal solar wind–magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. *J. Geophys. Res.* 2007, 112: A01206. doi:10.1029/2006JA012015.
2. Newell P.T., Sotirelis T., Liou, Rich F.J. Pairs of solar wind-magnetosphere coupling functions: combining a merging term with a viscous term works best. *J. Geophys. Res.* 2008, 113: A04218. doi:10.1029/2007JA012825.
3. Troshichev O.A., Andrezen V.G. The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap. *Planet Space Sci.* 1985, 33: 415–419.
4. Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerström S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index. *Planet Space Sci.* 1988, 36: 1095–1102.
5. Obayashi T. The interaction of solar plasma with geomagnetic field, disturbed conditions. *Solar terrestrial physics*, eds King J.W. London: Newman W.S. Academic Press, 1967: 107.
6. Nishida A. Geomagnetic DP2 fluctuations and associated magnetospheric phenomena. *J. Geophys. Res.* 1968a, 73: 1795–1803.
7. Nishida A. Coherence of geomagnetic DP2 fluctuations with interplanetary magnetic variations. *J. Geophys. Res.* 1968b, 73: 5549–5559.
8. Nishida A. Interplanetary origin of electric fields in the magnetosphere. *Cosmic Electrodyn.* 1971, 2: 350–374.
9. Troshichev O.A. Polar magnetic disturbances and field-aligned currents. *Space Sci. Rev.* 1982, 32: 275–360.
10. Langel R.A. Relation of variations in total magnetic field at high latitude with parameters of the IMF and with DP2 fluctuations. *J. Geophys. Res.* 1975, 80: 1261–1270.
11. McDiarmid I.B., Burrows J.R., Wilson M.D. Reverse polarity field-aligned currents at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1977, 82: 1513–1518.
12. Iijima T., Potemra T.A. The relationship between interplanetary quantities and Birkeland current densities. *Geophys. Res. Lett.* 1982, 4: 442–445.
13. Bythrow P.F., Potemra T.A. The relationship of total Birkeland currents to the merging electric field. *Geophys. Res. Lett.* 1983, 10: 573–576.
14. Kan J.R., Lee L.C. Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo. *Geophys. Res. Lett.* 1979, 6: 577–580.
15. Troshichev O., Janzhura A., Stauning P. Unified PCN and PCS indices: Method of calculation, physical sense and dependence on the IMF azimuthal and northward components. *J. Geophys. Res.* 2006, 111: A05208. doi:10.1029/2005JA011402.
16. Troshichev O., Janzhura A. Space weather monitoring by ground-based means: PC index. Springer, Berlin: Heidelberg Verlag, 2012: 288 p. doi:10.1007/978-3-642-16803-1.
17. Akasofu S.I. The development of the auroral substorms. *Planet Space Sci.* 1964, 12: 273–282.
18. Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity AE and its universal time variations. *J. Geophys. Res.* 1966, 71: 785–798.
19. Troshichev O.A. Polar cap magnetic activity (PC index) and space weather monitoring. Editions universitaires européennes, 2017: 140 p.
20. Troshichev O., Sormakov D., Behlke R. Relationship between PC index and magnetospheric field-aligned currents measured by Swarm satellites. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, 168: 37–47. doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.020.
21. Ritter P., Lühr H., Rauberg. Determining field-aligned currents with the Swarm constellation mission. *Earth Planets Space.* 2013, 65: 1285–1294. doi:10.5047/eps.2013.09.006.

22. Lühr H., Park J., Gjerloev J.W., et al. Field-aligned currents' scale analysis performed with the Swarm constellation. *Geophys. Res. Lett.* 2015, 42: 1–8, doi:10.1002/2014GL062453.
23. Zmuda A.J., Armstrong J.C. The diurnal flow pattern of field-aligned currents. *J. Geophys. Res.* 1974, 79: 4611–4519.
24. Iijima T., Potemra T.A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. *J. Geophys. Res.* 1976a, 81: 2165–2174.
25. Iijima T., Potemra T.A. Field-aligned currents in the day-side cusp observed by Triad. *J. Geophys. Res.* 1976b, 81: 5971–5979.
26. Chapman S., Ferraro V.C. A new theory of magnetic storms: I. Initial phase. *Terr. Magn. Atmos. Elec.* 1932, 37: 147–156.
27. Stepanova M., Antonova E., Troshichev O. Prediction of Dst variations from Polar Cap indices using time-delay neural network. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005, 67: 1658–1664.
28. Richardson I., Cane H. List of Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections (ICME) for 1997–2015 (Catalogue). 2015.
29. Jian L. List of Stream Interaction Regions (SIR) for 1995–2009 (Catalogue). 2009.
30. Vokhmyanin M.V., Stepanov N.A., Sergeev V.A. On the evaluation of data quality in the OMNI interplanetary magnetic field database. *Space Weather.* 2019, 17: 476–486. doi.org/10.1029/2018SW002113.
31. Du A.M., Tsurutani B.T., Sun W. Anomalous geomagnetic storm of 21–22 January 2005: A storm main phase during northward IMF. *J. Geophys. Res.* 2008, 113: A10214. doi: 10.1029/2006JA013284.
32. Lee D.Y., Choi K.C., Ohtani S., Lee J.H., Kim K.C., Park K.S., Kim K.H. Can intense substorms occur under northward IMF conditions? *J. Geophys. Res.* 2010, 115: A01211. doi: 10.1029/2009JA014480.
33. Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: 4. Relationship between the solar wind dynamic pressure (PSW) impulses and PC, AL indices. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, 182: 200–210. doi.org/10.1016/j.jastp.2018.12.001.

**PC индекс как показатель энергии солнечного ветра,
поступающей в магнитосферу (итоги)
(расширенный реферат)**

Статья обобщает новые сведения о солнечно-земных связях, полученные при использовании *PC* индекса магнитной активности. *PC* индекс, разработанный в ААНИИ, был введен в практику в 1988 г. как показатель интенсивности магнитных возмущений, генерируемых в полярных шапках Земли при взаимодействии земной магнитосферы с «солнечным ветром» — намагниченной плазмой солнечного происхождения. 1-минутный индекс рассчитывается независимо для Северного и Южного полушарий по магнитным данным околополюсных станций Туле в Гренландии (*PCN*) и Восток в Антарктике (*PCS*).

Исследования, выполненные в ААНИИ, показали, что (1) поведение *PC* индекса контролируется вариациями электрического поля солнечного ветра E_K («межпланетного электрического поля»), при этом временная задержка ΔT отклика *PC* индекса на вариации поля E_K определяется скоростью изменения поля dE_{cl}/dt ; (2) рост *PC* индекса всегда предшествует развитию магнитных возмущений в авроральной зоне (магнитных суббурь), интенсивность которых (*AL* индекс) линейно связана с величиной *PC* индекса; (3) поведение *PC* индекса на фазе развития суббури коррелирует с интенсивностью продольных магнитосферных токов в системе R1 FAC; (4) мировые магнитные бури начинаются, когда *PC* индекс стабильно (на протяжении более 1 часа) превышает пороговый уровень $\sim 1,5\text{--}2$ мВ/м, при этом мощность магнитной

бури (D_{stMIN}) определяется максимальной величиной предшествующего PC индекса. На основе этих экспериментальных фактов Международная ассоциация геомагнетизма и аэронавтики (МАГА) в 2013 г. одобрила PC индекс в качестве показателя энергии солнечного ветра, поступающей в земную магнитосферу при ее взаимодействии с солнечным ветром.

Показано, что вопреки общепринятому мнению импульсы динамического давления солнечного ветра (P_{SW}) сами по себе не влияют на поступление энергии в магнитосферу. Если импульсы P_{SW} коррелируют с ростом поля E_{KL} , они сопровождаются увеличением магнитной возмущенности, в противном случае магнитная активность (PC и AL индексы) остается на нулевом уровне даже при большой мощности импульсов динамического давления. Проблема случайных расхождений в поведении и величине PCN и PCS индексов в сезоны зима/лето решается выбором PC индекса в зимней шапке ($PCwinter$) как наиболее адекватной характеристики магнитной активности. Анализ корреляции между вариациями E_{KL} и PC в ходе магнитных суббурь за период с 1998 по 2017 г. продемонстрировал, что реальное поле E_{KL} , действующее (согласно показаниям индекса $PCwinter$) на земную магнитосферу, в 20 % рассмотренных событий не соответствует полю E_{KL} , рассчитанному по данным о параметрах солнечного ветра, публикуемым на сайте OMNI. Очевидно, что в этих случаях солнечный ветер, зафиксированный в точке Лагранжа на расстоянии 1,5 млн км перед земной магнитосферой (данные сайта OMNI) не вступал в контакт с магнитосферой. Таким образом, PC индекс может служить также в качестве фильтра применимости параметров удаленного солнечного ветра (и соответственно, данных сайта OMNI) для анализа солнечно-земных связей. Специальная процедура, согласованная Арктическим и антарктическим НИИ (который ответственен за производство PCS индекса) и Датским техническим университетом (который ответственен за производство PCN индекса), обеспечивает расчет 1-минутных значений PCN и PCS индексов и их публикацию на сайте <http://pcindex.org> в режиме реального времени.

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

УДК 551.31:551.583.2

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-300-314

О РАЗРАБАТЫВАЕМОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА ЛЕДЯНЫХ КЕРНОВ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Д.О. ВЛАДИМИРОВА

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

**vladimirova@aari.ru*

ON THE HIGH-RESOLUTION ICE CORE ANALYSIS METHOD UNDER DEVELOPMENT

D.O. VLADIMIROVA

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia*

**vladimirova@aari.ru*

Received July, 5, 2019

Accepted September, 20, 2019

Keywords: CFA, gas analysis, dust, ice core, methane, old ice, paleoclimate.

Summary

A continuous flow analysis (CFA) is a relatively new ice core analysis method deployed worldwide nowadays. This method allows measuring geochemical and gas concentrations in the ice core samples with ultra-high resolution in depth (age) domain. Different modifications of the CFA experimental setups were built in many research centers dealing with the ice cores and paleoclimate studies. Here we provide a brief history of the method, a description of a typical CFA setup. We analyze the advantages and disadvantages of a setup and propose some ways to solve current technical issues. We show the main principle of the first Russian CFA setup, which is to be built at the Climate and Environmental Research Laboratory, AARI, in order to measure a concentration of atmospheric dust particles and methane in the old atmospheric Vostok ice core.

Поступила 5 июля 2019 г.

Принята к печати 20 сентября 2019 г.

Ключевые слова: атмосферная пыль, газовый анализ, древний лед, ледяной керн, метод CFA, метан, палеоклимат.

В статье приведена краткая история метода анализа непрерывного потока (Continuous Flow Analysis — CFA), дано описание типичной многофункциональной установки CFA, про-

Citation: *Vladimirova D.O. On the high-resolution ice core analysis method under development. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 300–314. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-300-314.*

анализированы ее преимущества и недостатки, а также намечены пути решения существующих технических проблем. Описаны основные параметры первой в России экспериментальной установки CFA, которую планируется создать в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ для измерения концентрации частиц атмосферной пыли и метана в керне древнего льда со станции Восток.

ВВЕДЕНИЕ

Ледяные керны являются уникальным архивом данных о палеоклимате, включающем информацию о газовом составе древней атмосферы, содержании в ней пыли, изотопном составе осадков, химическом составе атмосферного аэрозоля в прошлом и т.д. Воздух, захваченный в пузырьках при льдообразовании, несет информацию о газовом составе атмосферы, в том числе и о концентрации парниковых газов. С начала газовых исследований ледяных кернов в 1980-х гг. [1], измерения проводились только на дискретных образцах, т.е. в отдельно нарезаемых призмах. Это подразумевает низкое временное разрешение: среднее газосодержание льда составляет 10 % по объему, для извлечения необходимого объема газового образца требуется призма весом 40–200 г и длиной 2–10 см. В отдельных пунктах бурения и глубинных горизонтах такой отрезок по глубине может охватывать до 1 тыс. лет в переводе на временную шкалу. Для проведения дискретных газовых анализов необходим керн высокого качества — все участки с трещинами и повреждениями вследствие бурения и извлечения керна исключаются. Это приводит к нерегулярному шагу отбора образцов, с разной дискретностью по глубине, и пропускам в палеоклиматической записи. При изготовлении призм происходит потеря определенного количества газа из воздушных включений, срезаемых поверхностью образца, что увеличивает общий объем ледяного керна, используемого для анализа. Эффективность экстракции газа составляет в среднем 80 % и снижается при измерении образцов, взятых с глубин более 600–700 м, на которых газовые пузырьки начинают трансформироваться в кристаллические включения газовых гидратов.

Газ может извлекаться из льда двумя основными способами — плавлением и повторным замораживанием либо крошением образца ледяного керна. Оказалось, что если применить непрерывное плавление образца вдоль всей длины ледяного керна, то можно избежать большинства проблем, связанных с потерей объема газового образца и временного разрешения. Так родилась идея метода непрерывного потока (Continuous Flow Analysis — CFA) для газовых измерений в образцах ледяных кернов.

Только благодаря непрерывным измерениям концентрации метана методом CFA с ультравысоким разрешением удалось открыть существование естественной вековой изменчивости CH_4 в течение интерстадиалов (кратковременных теплых периодов) и стадиалов (кратковременных холодных периодов) последнего оледенения [2]. В этом исследовании были измерены образцы ледяного керна WAIS Divide (Западная Антарктида) возрастом 9,8–67,2 тыс. лет. Авторами были выявлены периоды циклической изменчивости концентрации метана длительностью 80–500 лет, характеризующиеся средним изменением концентрации метана в среднем на 3 %. Предполагается, что вековая изменчивость CH_4 связанная с вариациями тропического климата, влияет на выбросы метана преимущественно из болот тропических широт.

Другим важным результатом, полученным благодаря использованию метода CFA, стало экспериментальное доказательство наличия послойного захвата воздуха в фирне полярных ледников. Их невозможно было получить ранее только по

результатам дискретных газовых исследований. В ходе измерений образцов ледяного керна возрастом 60 тыс. лет со станции Восток (Центральная Антарктида) методом CFA были получены данные, позволившие детально изучить явление послойного захвата воздуха образующимся льдом и отражение этого процесса в измеренном ряду концентрации метана [3]. С помощью разработанной авторами модели стало возможным распознавать в экспериментальном ряду быстрые вариации концентрации CH_4 с магнитудой порядка 10 %, которые связаны с явлением послойного захвата, и отличать их от аналогичных по форме пиков CH_4 , отражающих быстрые изменения метана в атмосфере.

Временной ряд концентрации метана, полученный с высоким разрешением, показал меньшую степень сглаживания, чем предполагалось ранее на основе расчетов по моделям диффузионного сглаживания атмосферного сигнала. Был сделан вывод о том, что ледяные керны из районов Восточной Антарктиды с низкой скоростью снегонакопления могут обеспечивать лучшее временное разрешение прошлых изменений состава атмосферы, чем ожидалось. Исследование [3] ознаменовало прорыв в понимании процессов захвата и удерживания воздуха ледниковым льдом, а также формирования палеоатмосферного сигнала в ледяных кернах, который стал возможным только благодаря измерению концентрации CH_4 методом CFA с ультра-высоким разрешением.

ИЗ ИСТОРИИ МЕТОДА

Метод непрерывного потока был первоначально предложен для отбора образцов ледяных кернов на определение их химического состава с разрешением 0,7–3,5 см [4]. Образец подвергался очистке путем автоматического удаления талой воды, образовавшейся из внешней части керна, а непрерывное плавление позволяло существенно снизить трудозатраты при подготовке образца.

Впервые пузырьки воздуха из талого потока образца, ранее удаляемые в отход, были использованы для определения в них газов в работе [5]. Авторы совместили установку по непрерывному плавлению образца с линией экстракции газа из потока талой воды и газовым хроматографом, получив таким образом первую установку CFA для непрерывного газового анализа образцов ледяных кернов. Эффективное разрешение по глубине с учетом скорости плавления и дискретности измерений на хроматографе составило порядка 15 см. Так были впервые решены проблемы нерегулярности шага и малого временного разрешения при проведении дискретных анализов газового состава керна, а также проблема потери части газовой пробы при изготовлении дискретных образцов.

В дальнейшем установка CFA для газовых анализов образцов ледяных кернов была усовершенствована [6] путем замены аналитической составляющей. Теперь к линиям непрерывного плавления образца и экстракции газа был присоединен лазерный анализатор, использующий технологию WS-CRDS (wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy — резонансная спектроскопия со сканированной длиной волны), с заявленной аналитической точностью инструмента 2–5 ppbv для измерений концентрации метана, что существенно выше точности газового хроматографа.

Следующим шагом в совершенствовании метода CFA для газовых анализов стало использование двух типов лазерных анализаторов, установленных последовательно, с целью проверки применимости двух разных технологий измерений в условиях малого объема (несколько первых кубических см) и малой скорости потока

газового образца ($0,8 \text{ см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$) [7]. Первый анализатор использовал технологию OF-CEAS (optical-feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy — абсорбционная спектроскопия с оптической обратной связью), а второй — технологию WS-CRDS. Кроме того, авторы [7] вывезли аналитическую газовую установку CFA в поле в лагерь проекта бурения ледяного ядра NEEM (North Greenland Eemian ice core project — см. <https://neem.dk/>), где протестировали возможность проведения газовых анализов ледяных кернов и датирования полученного профиля CH_4 непосредственно в экспедиционных условиях. В рамках этого проекта был впервые получен ряд концентрации метана в атмосфере Северного полушария в эпоху последнего оледенения с ультравысоким разрешением. Впоследствии лазерный анализатор WS-CRDS был модифицирован путем уменьшения объема рабочей камеры, что позволило существенно уменьшить диффузионное сглаживание газового сигнала при измерениях [8].

В настоящее время в мире существуют всего девять установок CFA в лабораториях, занимающихся изучением палеоклимата по данным анализа ледяных кернов. Они базируются в следующих научно-исследовательских учреждениях: 1) Британская Антарктическая служба (British Antarctic Survey — BAS, Кембридж, Великобритания); 2) Институт геонаук об окружающей среде (Institut des Géosciences de l'Environnement — IGE, Гренобль, Франция); 3) Университет Берна (Universität Bern, Берн, Швейцария); 4) Центр льда и климата (Centre for Ice and Climate — CIC, Университет Копенгагена, Копенгаген, Дания); 5) Университет штата Орегон (Oregon State University — OSU, Корваллис, штат Орегон, США); 6) Институт изучения пустынь (Desert research institute — DRI, Рино, штат Невада, США); 7) Центр исследования Антарктики (Antarctic research center, Университет Королевы Виктории, Веллингтон, Новая Зеландия); 8) Национальный институт полярных исследований (National Institute of Polar Research — NIPR, Токио, Япония); также завершается создание установки CFA в Институте Альфреда Вегенера (Alfred Wegener Institute – AWI, Бремерхафен, Германия). Все установки являются самодельными и уникальными, каждая из модификаций существует в единственном экземпляре; в собранном виде в промышленных масштабах они не выпускаются. Плавильные установки изготавливаются по специальному заказу в мастерских исследовательских институтов, газовые баллоны для очистки и обслуживания линий заказываются в специализированных фирмах и требуют транспортировки по классу «опасные грузы».

ОПИСАНИЕ ТИПИЧНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ CFA

В этом разделе мы приводим подробное описание экспериментальной установки, созданной в Центре льда и климата (CIC) Университета Копенгагена, которую можно рассматривать в качестве удачной модели для дальнейшего совершенствования метода анализа непрерывного потока.

Одним из основных элементов экспериментальной установки CFA, показанной на рис. 1, является вертикальная рамка — держатель (4) исследуемого сегмента ядра. Последний представляет собой центральную, незагрязненную буровой жидкостью часть ядра с поперечным сечением $3,5 \times 3,5$ см и длиной 0,55 или 1 м, в зависимости от принятого стандарта разрезки ядра после его извлечения из скважины. Рамка помещена в морозильный шкаф (3), в котором поддерживается температура -20 °C. Сразу под рамкой находится медная плавильная пластина (5), нагреваемая до $+20$ – $+25$ °C, с радиально расходящимися отверстиями и/или желобами по окружности (в зависимости от модификации линии CFA). Скорость потока очищенного талого образца равна 15–20

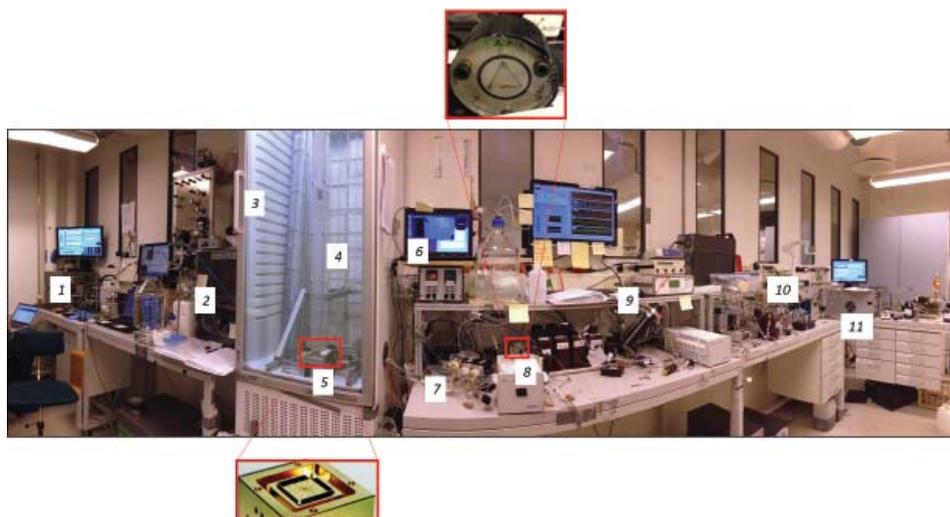


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки CFA в Центре льда и климата (рисунок адаптирован из постерного доклада P. Vallelonga et al., T09 ID133, 10.03.2016, IPICS OSC, Хобарт, Австралия):

1 — лазерный анализатор изотопного состава воды, 2 — газовая линия для измерения концентрации метана, 3 — морозильный шкаф, 4 — рамка-держатель для ледяного керна, 5 — плавильная установка для образца ледяного керна, 6 — регистрация глубины керна по скорости плавления, 7 — система подачи стандартов для химических анализов, 8 — дебабблер, отделяющий пузырьки воздуха из потока талого образца, 9 — счетчик пылевых частиц, 10 — аналитические системы для химических анализов, 11 — счетчик частиц сажи

Fig. 1. A panoramic view on the CFA setup at the Centre for Ice and Climate (a figure is adopted from a poster by P. Vallelonga et al., T09 ID133, 10.03.2016, IPICS OSC, Hobart, Australia):

1 — laser analyzer of the isotopic composition, 2 — gas line for extraction and measurement of the CH_4 concentration, 3 — freezer, 4 — ice core frame, 5 — melthead, 6 — log the melting depth, 7 — chemical standards, 8 — debubbler, 9 — dust particles counter, 10 — chemical compounds, 11 — black carbon particles counter

мл·мин⁻¹. Поток талой воды отводится по подогреваемым линиям из морозильной камеры в теплую лабораторию при помощи перистальтического насоса, проходя на первой стадии процедуру удаления воздуха в специальном приспособлении, которое называется дебабблер (8). Дебабблер имеет внутренний объем 0,8 мл³. В нем поток воды пропускается через узкое отверстие, пузырьки воздуха всплывают и поступают далее в газовую линию. Дегазированная талая вода прокачивается через отверстие, расположенное ниже уровня пузырьков по направлению к аналитическим линиям. Существуют пипеточная и треугольно-призматическая модификации дебабблера.

Поток жидкого образца из нижнего отверстия дебабблера поступает в химические аналитические линии и в счетчик частиц пыли и сажи. Концентрация каждого химического элемента, иона или соединения (железо, кальций, сульфат-ион, аммоний, калий, пероксид водорода, натрий) измеряется спектрометром. Этот вид анализа позволяет проследить изменение во времени концентрации морских аэрозолей, которые являются индикатором площади распространения морского льда, обнаружить вулканические пики, позволяющие датировать керн, получить информацию о загрязнении атмосферы в результате сельскохозяйственных и промышленных антропогенных выбросов, биоактивности в регионе.

Концентрация атмосферной пыли и сажи измеряется с помощью лазерных счетчиков частиц. Концентрация пыли во льду является индикатором крупных событий атмосферного переноса пыли из пустынь, осушенных в результате понижения уровня моря участков материкового шельфа, и из приледниковых зандровых равнин. По фоновой концентрации пыли различают слои льда, отложенные в периоды оледенений и межледниковий. Сажа характеризует поступление продуктов горения природных пожаров и индустриальное атмосферное загрязнение.

Еще один поток талого образца перенаправляется в линию по измерению изотопного состава воды при помощи лазерного анализатора. Изотопный состав используется для восстановления местных температурных условий, а также условий в источнике влаги.

Особое внимание уделим линии экстракции газа и измерению концентрации метана, т.к., во-первых, этот палеоклиматический параметр характеризуется наиболее реактивным откликом на быстрые изменения климата, а во-вторых, измерение концентрации метана методом CFA позволяет выявить кратковременные естественные вариации концентрации парниковых газов, и в частности метана, в атмосфере. Автором был предложен ряд модификаций линии измерения метана, входящей в состав установки CFA в Центре льда и климата. Модификации позволили: 1) увеличить эффективность экстракции газового образца; 2) уменьшить погрешность калибровки, связанную с примесным содержанием атмосферного воздуха в деионизованной воде; 3) существенно ускорить процесс перехода установки из режима ожидания в режим измерений; 4) сократить количество данных измерений ледяного керна, которые приходилось отбраковывать в начале каждой серии измерений по техническим причинам. На сегодняшний день линия экстракции газового образца и измерения CH_4 включает описанные ниже ступени и элементы.

Газовые пузырьки в остаточном потоке талой воды поступают по подогреваемой трубке в теплый бокс лаборатории для измерения концентрации метана. Здесь в гидрофобном мембранном модуле происходит окончательное разделение потока газа и воды. Извлекаемый газовый образец (приблизительно $1,6 \text{ мл}\cdot\text{мин}^{-1}$), первоначально имеющий влажность 100 %, осушается во время прохождения по консоли «нафион». Последняя представляет собой трубку, изготовленную из сульфированного тетрафторэтилена (Nafion©) длиной около 1 м, которая помещена в трубку из нержавеющей стали. Пространство между нафионом и внутренней поверхностью стальной трубки продувается азотом или сухим техническим воздухом со скоростью $20 \text{ мл}\cdot\text{мин}^{-1}$ в направлении, противоположном току образца. Итоговая абсолютная влажность газового образца, фиксируемая лазерным анализатором, равна приблизительно 0,02–0,04 % по объему. Из нафиона образец перенаправляется в камеру лазерного анализатора Picarro, предназначенного для измерения концентрации парниковых газов, где реализуется технология измерения концентрации газа внутри камеры по времени затухания сигнала лазерного луча, многократно отраженного между зеркалами. Распознавание газа происходит по спектру абсорбции (см. подробнее <https://www.picarro.com/company/technology/crds>, Picarro Inc., США). Встроенный в лазерный анализатор диафрагменный насос поддерживает постоянную скорость потока газа и создает перепад давления в линии экстракции газа. Отмечается, что прибор распознает только изотопы углерода-12 и водорода-1 в составе молекул метана, изменения в изотопном составе по углероду-13 и по дейтерию не могут быть

прослежены при измерении абсолютной концентрации метана. Однако, учитывая естественную пренебрежимо малую абсолютную концентрацию упомянутых изотопов в природном метане, итоговая вынужденная ошибка измерений находится за пределом обнаружения.

До и после серии дневных измерений проводится калибровка установки. Суточный наклон калибровочной кривой используется для получения абсолютных значений концентрации CH_4 . В калибровке используется деионизированная вода, очищенная («продуваемая») азотом или гелием за несколько часов до начала калибровки. Сегментированный поток газов-стандартов с известной концентрацией метана циркулирует по линии. При этом фиксируются отклонения от истинных значений за счет растворимости газа в воде и степень сглаживания сигнала при переходе от одного стандарта к другому.

ПРЕИМУЩЕСТВА, СЛАБЫЕ МЕСТА И ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ CFA

Метод CFA обладает существенными преимуществами:

- 1 — высокое временное разрешение палеоклиматического сигнала;
- 2 — малый объем образца для анализа, что вместе со следующим пунктом существенно снижает общую стоимость анализов и приводит к экономии дорогостоящего ледяного керна;
- 3 — возможность повторного использования образца для других анализов, например:
 - а) сбор талой воды для последующего измерения методом IC-PMS (масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой);
 - б) сбор газа из отфильтрованного потока для исследования содержания парниковых газов в древней атмосфере (углекислый газ, оксид азота I);
 - в) повторное использование газовой пробы после ее прохождения через лазерный анализатор; газ собирается в герметичные контейнеры для исследования содержания криптона-81 с целью абсолютного датирования льда в диапазоне возрастов 0,04–1,2 млн лет (Ritterbuch, pers. communication, 2018);
- 4 — относительно большая производительность измерений: в зависимости от режима работы (измерения в несколько смен, только в дневное время или круглые сутки) и скорости плавления (от 2 до 5 см·мин⁻¹) можно измерять от 5 до 25 метров образцов ледяного керна за сутки; это сокращает время, необходимое для получения рядов различных палеоклиматических параметров, с нескольких лет до нескольких месяцев интенсивной измерительной кампании.

К нерешенным в настоящий момент проблемам метода непрерывного потока относятся:

- 1 — подбор оптимальных параметров — условий плавления и транспортировки для измерения различных элементов и совмещения различных методов анализа (газа, изотопов воды, пыли, химических элементов) в одной установке;
- 2 — не универсальность метода — газы или химические ионы с высокой растворимостью не могут быть измерены этим методом в медленном потоке талого образца;
- 3 — сглаживание газового сигнала и потеря части газового объема из-за растворения в потоке талого образца за время его нахождения в линии CFA (2–10 мин), снижающее эффективное разрешение метода;

4 — непостоянные во времени внутреннее давление, соотношение газа и воды и скорость потока образца.

Проблема (1) может быть частично решена выбором оптимального набора измеряемых параметров в зависимости от научной цели по изучению отдельно взятого керна. Кроме того, возможно разделение образцов CFA. Так, при обработке керна по проекту EGRIP (<https://eastgrip.org/>) было принято решение вырезать отдельный образец меньшего сечения с периферийной части керна для измерения изотопного состава воды на специальной версии плавильной установки уменьшенного диаметра. Для проведения химических анализов и измерения концентрации микрочастиц периферийная часть керна слишком загрязнена. Химические анализы довольно проблематично сочетать с газовым анализом, т.к. случайное проникновение пузырька воздуха в химические аналитические линии сбивает калибровки отдельных компонентов и измерения приходится останавливать.

Элементы с высокой растворимостью могут быть измерены только дискретными методами с вовлечением крошения или лазерной абляции льда. Тем не менее с появлением новых более чувствительных аналитических приборов объем образца существенно снижается, что повышает временное разрешение.

Третья проблема решается с помощью математического моделирования. Предварительно проводится калибровка с использованием различных стандартов, определяются время и степень сглаживания сигнала. На основании этих данных выявляются параметры окна фильтрации, являющейся функцией скорости потока образца и объема аналитической линии. К измеренному ряду применяется деконволюция для восстановления первоначального не сглаженного аналитического сигнала.

Последняя проблема разрешима путем последовательной установки на газовую линию CFA датчиков давления потока талого образца ледяного керна, датчика давления газового образца, извлекаемого из потока, датчика скорости тока отфильтрованной талой воды, датчика скорости тока осушенного газового образца в камеру лазерного анализатора. При помощи всего четырех датчиков можно точно отслеживать изменения условий тока образца через линию экстракции газа. С учетом проведенных заранее калибровок по модели мультирегрессии можно откорректировать потерю газа при растворении и диффузии образца. Примером успешного решения этой проблемы являются тесты, проведенные автором на установке CFA в Национальном институте полярных исследований (NIPR, Токио, Япония).

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА CFA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРЕВНЕГО ЛЬДА

Изучение ледяного керна из глубокой скважины 5Г на станции Восток показало, что в интервале глубин 3317–3538 м он сложен древним атмосферным льдом, возраст которого достигает 1,3 млн лет [9]. Всесторонние исследования оставшихся образцов этого керна в настоящее время проводятся в Лаборатории изменений климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ в рамках проекта Российского научного фонда «Исследование причин перестройки климатической системы Земли в середине плейстоцена по данным кернов древнего льда Антарктиды». В задачи проекта входит реконструкция газового состава атмосферы, температуры воздуха и других характеристик окружающей среды в эпоху перехода от 40-тысячелетнего ритма смены ледниковых и межледниковых периодов к 100-тысячелетнему, с более амплитудными климатическими колебаниями. В прошедшем 64-м полевом сезоне

Российской антарктической экспедиции (2018/19 г.) было осуществлено забуривание нового бокового ствола скважины 5Г-1 с целью получения параллельного керна древнего льда с нарушенной стратиграфией. Отклонение от основного ствола скважины 5Г-1 было сделано на глубине 3270 м. К концу сезонных работ глубина нового бокового ствола скважины 5Г-5 достигла отметки 3320 м. Бурение скважины 5Г-5 планируется завершить в течение двух следующих полевых сезонов на глубине 3620 м. Полученный из новой скважины керн позволит провести непрерывные исследования древнего льда с высоким разрешением методом анализа непрерывного потока. В связи с этим ЛИКОС ААНИИ приступает к созданию первой в России установки СФА для анализа нового ледяного керна со станции Восток, а также керна, который в будущем планируется получить в районе Купола В, где, как ожидается, залегает еще более древний лед с ненарушенной стратиграфией ледяных слоев.

Предварительные исследования толщи древнего льда в районе станции Восток (см. обзор в [10]) указывают на нарушение первоначального залегания ледяных слоев в результате образования складок различных масштабов и перемешивания льда в придонной части ледника. Вместе с тем слои льда, образовавшиеся в различных климатических условиях, резко отличаются по своему строению. Лед ледниковых эпох, содержащий большое количество атмосферной пыли, характеризуется мелкозернистой структурой и преобладающей вертикальной (одномаксимумной) ориентировкой главных кристаллографических осей, в то время как для льда межледниковых эпох с пониженным содержанием пылевых частиц типичны крупнозернистая структура и поясная ориентировка осей кристаллов. Структурные особенности льда связаны с концентрацией примесей, поскольку последние тормозят миграцию границ зерен и, следовательно, их рост в ледяной породе. Таким образом, и микроструктура льда, и концентрация в нем микрочастиц атмосферной пыли служат теми относительно стабильными климатически зависимыми свойствами ледяной породы, которые, несмотря на нарушение последовательности залегания слоев, хранят информацию об условиях образования льда.

Иначе обстоит дело с изотопным составом льда и с газовым составом заключенного во льду воздуха. Климатические сигналы, заложенные в этих характеристиках, подвержены диффузионному сглаживанию, эффект которого значительно усиливается при утончении ледяных слоев в базальной части ледника и, особенно, при их перемешивании [11]. Последнее приводит к образованию слоистой толщи, в которой чередуются маломощные (1–102 см) слои льда, образовавшиеся в разные климатические эпохи и поэтому имеющие резко различные первоначальные свойства. Диффузионное сглаживание сигнала в таких слоях идет особенно интенсивно, в результате чего наблюдаемые вариации изотопного состава льда не коррелируют с изменениями по глубине стабильных свойств ледяной породы, отражающих условия льдообразования, — микроструктуры льда и концентрации пыли.

Очевидно, что для изучения изменений свойств ледяной породы, происходящих в результате перемешивания и диффузионного сглаживания, и для разработки методики восстановления палеоклиматических рядов по керну древнего льда с нарушенной стратиграфией необходимо с высоким разрешением измерять как стабильные характеристики ледяной породы, так и те, которые подвержены диффузионному сглаживанию.

Анализ имеющихся данных приводит к выводу о возможности сокращения набора параметров, которые необходимо измерять методом непрерывного потока.

Это позволит оптимизировать конфигурацию будущей установки CFA и частично устранить проблему, связанную с разными скоростями потока при одновременном измерении большого числа различных характеристик керна на многофункциональных установках.

Поскольку структура льда в керне, полученном из нового бокового ствола скважины на станции Восток, может быть искажена в результате деформации льда в пристеночной области основной скважины, более информативным стабильным свойством льда в нашем случае будет концентрация микрочастиц атмосферной пыли. Из подверженных диффузионному сглаживанию характеристик керна для измерений методом непрерывного потока целесообразно выбрать метан, так как он быстрее других парниковых газов реагирует на климатические изменения (время его присутствия в атмосфере с момента выброса и до момента окисления $9,1 \pm 0,9$ лет [12]). Кроме того, методика измерений концентрации метана в непрерывном потоке наиболее хорошо разработана по сравнению с другими парниковыми газами в ледяных кернах. Измерение содержания стабильных изотопов воды методом CFA не всегда дает надежные результаты из-за возможного фракционирования изотопного состава талой воды за время прохождения ее через систему. Поэтому изотопные исследования льда с высоким разрешением планируется проводить в ЛИКОС на лазерных анализаторах изотопного состава по отработанной в лаборатории методике на 1–1,5-сантиметровых пробах керна, которые будут отбираться в полевых условиях из вновь полученного керна.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА БУДУЩЕЙ УСТАНОВКИ CFA В ЛИКОС ААНИИ

При проектировании установки CFA, которая будет создаваться в ЛИКОС ААНИИ для непрерывных исследований керна древнего льда, будем исходить из того, что необходимыми и достаточными для таких исследований являются две аналитические линии: первая будет обеспечивать экстракцию газа и последующее измерение концентрации метана, вторая — измерение концентрации и размера пылевых частиц. Такая упрощенная установка CFA должна включать в себя следующие основные элементы (см. рис. 2).

Установка для плавления ледяного керна, помещенная в морозильную камеру лаборатории для поддержания стабильной отрицательной температуры льда (около -20 °C) в процессе плавления. Плавильная установка представляет собой плексигласовую рамку-держатель и медную нагреваемую часть с радиально расходящимися отверстиями. Для вертикального расположения образцов ледяных кернов на плавильной установке необходим плексигласовый футляр длиной 1 м, шириной и глубиной 3,5–4 см, а также металлические профили, крепящие футляр к стене морозильной камеры. Для непрерывного плавления во время серии измерений необходимо иметь как минимум 10 сменных футляров. Плавильная установка и плексигласовые держатель и футляр изготавливаются в мастерских по индивидуальному заказу. Скорость плавления отслеживается при помощи лазерного датчика расстояния.

Транспортные линии и перистальтические насосы. Транспортные линии представляют собой силиконовые трубки и газонепроницаемые трубки из материала ETFE (модифицированный этилен-тетрафторэтиленовый фторопласт) различного внутреннего диаметра (от 1/16 до 1/4 дюйма). Транспортные линии необходимы для доставки талого образца от плавильной установки до измерительных линий. Силиконовые трубки используются как комплектующие к перистальтическим насосам и требуют частой замены (каждые 20–30 метров керна). Для транспортировки газо-

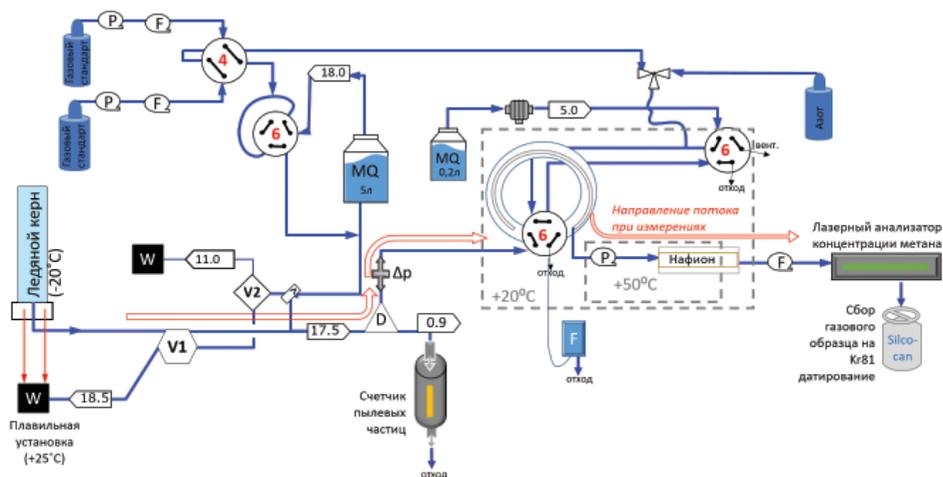


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для непрерывного анализа концентрации CH_4 и минеральных пылевых частиц в ледяных ядрах. В состав установки входит усовершенствованная автором версия линии измерения CH_4 [6, 8]

Fig. 2. A sketch of the continuous flow analysis experimental setup enabled to measure CH_4 and dust concentration. The original version of the CH_4 setup by [6, 8] is modified by the author

вых стандартов и вспомогательных газов из баллонов высокого давления (200 бар) необходимы трубки из нержавеющей стали внутренним диаметром 1/16–1/8 дюйма, а также регуляторы давления и автоматические регуляторы расхода газа. Соединения осуществляются при помощи фиттингов и переходников различного диаметра и конфигурации. Переключения между транспортными линиями осуществляется при помощи ручных клапанов. Газовый образец, извлеченный из потока талой воды, переносится в измерительный прибор по стеклянным капиллярам, также иногда требующим замены по причине хрупкости.

Газовая линия, обеспечивающая трехступенчатую экстракцию газа. На первой ступени происходит концентрация пузырьков воздуха в потоке талого образца, на второй — выделение газового образца из потока, на третьей — осушение газового образца. Концентрирование пузырьков воздуха в потоке талого образца осуществляется при помощи деаэблера (призматического или пипеточного, изготовленного из стекла или химически инертного пластика). Деаэблер проектируется самостоятельно и изготавливается в мастерских. Вторая ступень экстракции — выделение газового образца из потока — осуществляется при помощи гидрофобной мембранной трубки, используемой в медицинских технологиях для отделения крови и случайно попавшего воздуха. Мембранная трубка поставляется в стандартной комплектации длиной 80 см с переходниками и требует замены каждые две-четыре недели измерений. Осушение газового образца от водяного пара (третья ступень экстракции) осуществляется при помощи трубки из специального материала нафлон. Материал взаимодействует с молекулами воды, абсорбируя их из области большего парциального давления в меньшее. Трубка из нафлона с внутренним диаметром 0,3 мм помещается внутрь трубки из нержавеющей стали диаметром 3,2 мм. Пространство между внутренней стенкой стальной трубки и внешней стенкой нафлона обдувается сухим воздухом или азотом в направлении, противоположном направлению тока образца. Для контроля состояния талого потока

и выделенного газового образца необходимо установить датчик давления жидкости и датчик расхода газа. Мембрана и нафион помещаются в терморегулируемые консоли для создания постоянных контролируемых температурных условий экстракции газа. Для мониторинга давления газового образца, а также получения данных для внесения поправки на потери газового образца из-за растворимости в талом потоке между второй и третьей ступенью экстракции необходимо установить автоматический датчик давления газового образца. Подача и остановка потока талого образца и перенаправление потока осуществляется при помощи электрических переключателей и клапанов. Также необходимы газовые стандарты с известной концентрацией метана, по меньшей мере, два стандарта для ежедневной калибровки газовых измерений и определения наклона калибровочной кривой.

При переводе газовой установки в режим ожидания или при нештатных ситуациях во время плавления ледяного керна используется внутренний контур тока талой воды. На него необходимо установить мембранный дегазационный модуль для очистки воды MilliQ от растворенного газа и случайно попавших пузырьков атмосферного воздуха. Для более эффективной работы микромодуль необходимо менять каждые две-четыре недели.

Лазерный анализатор концентрации метана модели Picarro G-2301 или его последующие модификации является самой дорогостоящей частью экспериментальной установки (порядка 8 млн руб. на сегодняшний день). Измерения метана проводятся с точностью (1σ) $< 0,5$ ppb (частей на миллиард) для одной точки данных и $0,22$ ppb для 5-минутного среднего значения. Дрифт прибора в течение дня составляет менее 1 ppb, а в течение месяца — не больше 3 ppb. Гарантированная производителем точность измерений достигается, если концентрация метана в образце находится в диапазоне 1000 – 3000 ppb, при этом максимальный рабочий диапазон прибора для метана составляет от 0 до 20000 ppb. Вместе с тем средняя концентрация метана в пузырьках воздуха, захваченных в ледяных кернах, находится в пределах от 400 до 800 ppb.

Рекомендованные производителем условия эксплуатации позволяют достичь указанной точности измерений при давлении газового образца от 300 до 1000 мм рт. ст. (40 – 133 кПа). Опыт газовых измерений на установке CFA показывает, что рабочее давление газового образца варьирует от 200 до 450 мм рт. ст. в зависимости от газосодержания различных слоев льда. Если уменьшить объем внутренней камеры прибора на несколько кубических сантиметров, то можно достичь той же точности измерений при меньшем давлении газового образца, работая на нижнем пределе чувствительности прибора к концентрации метана в образце. Уменьшение объема камеры достигается путем установки призмы внутри камеры, как это было показано в [8]. Поскольку в камере прибора находятся сверхчистые зеркала, обеспечивающие циркуляцию луча лазера, вскрытие камеры возможно только в чистой комнате на заводе-производителе Picarro в США. Выполнить такую модификацию серийного прибора возможно в рамках сотрудничества ЛИКОС и компании Picarro в научно-технической сфере либо в рамках договора по оказанию услуг по модификации прибора. *Лазерный счетчик частиц пыли для жидкостей с вертикально установленной трубкой.* Через счетчик проходит поток талого образца, очищенный от газовых включений. Счетчик частиц позволяет определять концентрацию полевых частиц в диапазоне 0 – 120 тыс. частиц/мл, разбитых по размерным группам. Лазерный счетчик определяет размер микрочастиц в диапазоне $0,9$ – $139 \cdot 10^{-6}$ м по их тени во время прохождения через экран прибора.

Программное обеспечение LabView Full version, 2019 edition. Регулировка измерительного процесса, управление автоматическими клапанами и другими составляющими установки, мониторинг состояния экспериментальной установки в реальном времени, а также запись всех данных измерений по мере их поступления осуществляются с помощью указанного программного обеспечения. Это инструмент визуального программирования, позволяющий разработать пользовательский интерфейс для всех перечисленных выше операций. Все датчики и клапаны подключаются к компьютеру через специальный многофункциональный модуль ввода-вывода данных, позволяющий также выполнять аналогово-цифровые преобразования.

Опционально к выходу из газового анализатора можно присоединить герметичный контейнер Silcosan для сбора газового образца на изотопный анализ криптона-81 с целью датирования древнего льда. Криптон инертен, что дает возможность его использования для измерений прошедшего через анализатор газового образца. В процессе экстракции и измерения концентрации метана газовый образец ни с чем не реагирует и остается незагрязненным. Изотопный анализ по криптону-81 является относительно новым методом датирования природных льдов в возрастном диапазоне 0,04–1,2 млн лет. Первый опыт использования этого метода для датирования образцов древнего льда со станции Восток дал хорошие результаты [13]. Было показано, что надежные датировки могут быть сделаны по образцам льда массой всего 7 кг, что соответствует 7–9 метрам призматического ледяного образца с поперечным сечением 3,5×3,5 см, который используется в установке CFA. Таким образом, достаточная по объему (примерно 600 см³ STP) газовая проба может быть получена в течение одного-двух дней проведения интенсивной кампании CFA.

Учитывая то, что все комплектующие описанной выше авторской установки CFA производятся исключительно зарубежными фирмами и приобрести их в нашей стране можно только через официальных представителей этих фирм в России, полная стоимость установки будет составлять порядка 10 млн рублей.

Отметим, что используемый в установке лазерный анализатор позволяет одновременно измерять в газовом образце концентрацию метана, углекислого газа и водяного пара. Измерение водяного пара является необходимой частью измерений концентрации метана, т.к. по его содержанию определяется степень осушения газового образца и оценивается потеря газа. Надежные данные по углекислому газу пока невозможно получать с помощью установки CFA, поскольку CO₂ легко растворяется в потоке талого образца. Тем не менее дальнейшие исследования, направленные на совершенствование метода непрерывного потока и применение его для измерений CO₂ с высоким разрешением по глубине (возрасту) ледяного керна, представляются весьма перспективными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены основные этапы развития способа исследования ледяных кернов методом непрерывного потока (CFA). Выполнен анализ преимуществ и недостатков метода. Обоснован минимальный набор характеристик древнего антарктического льда со станции Восток, которые нужно измерять непрерывно и с высоким разрешением, чтобы получить необходимую и достаточную информацию для разработки и применения на практике методики восстановления палеоклиматических рядов по керну древнего льда с нарушенной стратиграфией. Такими характеристиками являются концентрация метана в заключенном во льду воздухе (подвержена

диффузионному сглаживанию) и содержание пылевых микрочастиц — относительно стабильная и в то же время климатически зависимая характеристика ледяной породы. Сокращение числа измеряемых параметров позволило оптимизировать конфигурацию будущей установки CFA и частично устранить проблему, связанную с разными скоростями потока при одновременном измерении большого числа различных характеристик керна на многофункциональных установках. Разработана принципиальная схема и детально описана комплектация новой установки CFA, ориентированной на исследование «восточного» керна, которая при достаточных производительности и точности измерений может иметь минимальную стоимость и быть экономичной в эксплуатации.

Благодарности. Статья написана при финансовой поддержке гранта РФФИ мол_а 1835-00582. Разработка специальной установки CFA для исследования древнего антарктического льда со станции Восток финансируется по гранту РФФИ 18-17-00110.

Acknowledgments. This work is funded by the RFBR grant мол_а 1835-00582. Development of the VOICE (Vostok old ice) CFA setup edition id funded by the RSF grant 18-17-00110.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barnola J.-M., Raynaud D., Neftel A., Oeschger H. Comparison of CO₂ measurements by two laboratories on air from bubbles in polar ice // *Nature*. 1983. V. 303. P. 410–413.
2. Rhodes R.H., Brook E.J., McConnell J.R., Blunier T., Sime L.C., Faïn X., Mulvaney R. Atmospheric methane variability: centennial-scale signals in the Last Glacial Period // *Global Biogeochem. Cycles*. 2017. V. 31. P. 1–16. doi:10.1002/2016GB005570.
3. Fourteau K., Faïn X., Martinerie P., Landais A., Ekaykin A., Lipenkov V.Ya., Chappellaz J. Analytical constraints on layered gas trapping and smoothing of atmospheric variability in ice under low-accumulation conditions // *Clim. Past*. 2017. V. 13. P. 1815–1830. doi.org/10.5194/cp-13-1815-2017.
4. Sigg A., Fuhrer K., Anklin M., Staffelbach T., Zurmühle D. A continuous analysis technique for trace species in ice cores // *Environmental science and technology*. 1994. V. 28. № 2. P. 204–209.
5. Schüpbach S., Federer U., Kaufmann P.R., Hutterli M. A., Buiron D., Blunier T., Fischer H., Stocker T.F. A new method for high-resolution methane measurements on polar ice cores using continuous flow analysis // *Environmental science and technology*. 2009. V. 43. P. 3571–3576.
6. Stowasser C., Buizert C., Gkinis V., Chappellaz J., Schüpbach S., Bigler M., Faïn X., Sperlich P., Baumgartner M., Schilt A., Blunier T. Continuous measurements of methane mixing ratios from ice cores // *Atmos. Meas. Tech*. 2012. V. 5 (5). P. 999–1013. doi: 10.5194/amt-5-999-2012.
7. Chappellaz J., Stowasser C., Blunier T., Baslev-Clausen D., Brook E.J., Dallmayr R., Faïn X., Lee J.E., Mitchell L.E., Pascual O., Romanin D., Rosen J., Schüpbach S. High-resolution glacial and deglacial record of atmospheric methane by continuous-flow and laser spectrometer analysis along the NEEM ice core // *Clim. Past*. 2013. V. 9 (6). P. 2579–2593. doi:10.5194/cp-9-2579-2013.
8. Stowasser C., Farinas A. D., Ware J., Wistisen D.W., Rella C., Wahl E., Crosson E., Blunier T. A low-volume cavity ring-down spectrometer for sample limited applications // *Appl. Phys. B*. 2014. V. 116. P. 255–270. doi: 10.1007/s00340-013-5528-9.
9. Lipenkov В.Я., Екайкин А.А. В поисках древнейшего льда Антарктиды // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58 (2). С. 255–260.
10. Lipenkov V.Ya., Raynaud D. The Mid-Pleistocene Transition and the Vostok Oldest Ice Challenge // *Лед и Снег*. 2015. Т. 55 (4). С. 95–106.

11. Bereiter B., Eggleston S., Schmitt J., Nehrass-Ahles C., Stocker T.F., Fischer H., Kipfstuhl S., Chappellaz J. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 542–549. doi:10.1002/2014GL061957.
12. Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L09803. P. 1–5. doi:10.1029/2012GL051440.
13. Ritterbusch F., Chu Y., Dong X., Gu J., Hu S., Jiang W., Lu Z., Tong A., Yang G., Zhao L. Radiokrypton Dating of groundwater, ocean water and glacier ice // *Geophysical Research Abstracts.* 2018. V. 20. EGU2018-2275-7.

REFERENCES

1. Barnola J.-M., Raynaud D., Neftel A., Oeschger H. Comparison of CO₂ measurements by two laboratories on air from bubbles in polar ice. *Nature.* 1983, 303: 410–413.
2. Rhodes R.H., Brook E.J., McConnell J.R., Blunier T., Sime L.C., Faïn X., Mulvaney R. Atmospheric methane variability: centennial-scale signals in the Last Glacial Period. *Global Biogeochem. Cycles.* 2017, 31: 1–16. doi:10.1002/2016GB005570.
3. Fourteau K., Faïn X., Martinerie P., Landais A., Ekaykin A., Lipenkov V.Ya., Chappellaz J. Analytical constraints on layered gas trapping and smoothing of atmospheric variability in ice under low-accumulation conditions. *Clim. Past.* 2017, 13: 1815–1830. doi.org/10.5194/cp-13-1815-2017.
4. Sigg A., Fuhrer K., Anklin M., Staffelbach T., Zurmühle D. A continuous analysis technique for trace species in ice cores. *Environmental science and technology.* 1994, 28: 204–209.
5. Schüpbach S., Federer U., Kaufmann P.R., Hutterli M. A., Buiron D., Blunier T., Fischer H., Stocker T.F. New method for high-resolution methane measurements on polar ice cores using continuous flow analysis. *Environmental Science and Technology.* 2009, 43: 3571–3576.
6. Stowasser C., Buizert C., Gkinis V., Chappellaz J., Schüpbach S., Bigler M., Faïn X., Sperlich P., Baumgartner M., Schilt A., Blunier T. Continuous measurements of methane mixing ratios from ice cores. *Atmos. Meas. Tech.* 2012, 5 (5): 999–1013. doi: 10.5194/amt-5-999-2012.
7. Chappellaz J., Stowasser C., Blunier T., Baslev-Clausen D., Brook E.J., Dallmayr R., Faïn X., Lee J.E., Mitchell L.E., Pascual O., Romanin D., Rosen J., Schüpbach S. High-resolution glacial and deglacial record of atmospheric methane by continuous-flow and laser spectrometer analysis along the NEEM ice core. *Clim. Past.* 2013, 9 (6): 2579–2593. doi:10.5194/cp-9-2579-2013.
8. Stowasser C., Farinas A.D., Ware J., Wistisen D.W., Rella C., Wahl E., Crosson E., Blunier T. A low-volume cavity ring-down spectrometer for sample limited applications. *Appl. Phys. B.* 2014, 116: 255–270. doi: 10.1007/s00340-013-5528-9.
9. Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A. Hunting for Antarctica's oldest ice. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2018, 58: 255–260. [In Russian].
10. Lipenkov V.Ya., Raynaud D. The Mid-Pleistocene Transition and the Vostok Oldest Ice Challenge. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2015, 55: 95–106.
11. Bereiter B., Eggleston S., Schmitt J., Nehrass-Ahles C., Stocker T.F., Fischer H., Kipfstuhl S., Chappellaz J. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present, *Geophys. Res. Lett.* 2015, 42: 542–549. doi:10.1002/2014GL061957.
12. Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J. Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry. *Geophysical Research Letters.* 2012, 39(L09803): 1–5. doi:10.1029/2012GL051440.
13. Ritterbusch F., Chu Y., Dong X., Gu J., Hu S., Jiang W., Lu Z., Tong A., Yang G., Zhao L. Radiokrypton dating of groundwater, ocean water and glacier ice. *Geophysical Research Abstracts.* 2018, 20: EGU2018-2275-7.

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 550.8

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ НА МОРСКОМ ЛЬДУ В РАЙОНЕ ПОЛЕВОЙ БАЗЫ ОАЗИС БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

А.А. СУХАНОВА¹, С.В. ПОПОВ^{2,1}, С.П. ПОЛЯКОВ³, М.П. КАШКЕВИЧ¹, В.Л. МАРТЬЯНОВ³

¹ — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

² — Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

**suhanova.anastassiya@yandex.ru*

GPR RESEARCH FOR THE ORGANIZATION OF THE RUNWAY ON THE SEA ICE IN THE AREA OF THE BUNGER OASIS FIELD BASE, EAST ANTARCTICA

A.A. SUKHANOVA¹, S.V. POPOV^{2,1}, S.P. POLYAKOV³, M.P. KASHKEVICH¹, V.L. MARTYANOV³

¹ — Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia

² — Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

**suhanova.anastassiya@yandex.ru*

Received June, 22, 2019

Accepted July, 23, 2019

Keywords: airfield, Bunger Oasis, East Antarctica, georadar profiling, logistical support, transport operations.

Summary

When one is carrying out logistic operations at Russian Antarctic stations, organization and safe operation of snow-runways play an important role. Nowadays six of the seven existing stations and field bases of the Russian Antarctic expedition (RAE) are provided with air communication, however, the Bunger Oasis field base is still outside the air transportation structure. The aim of the

Citation: *Sukhanova A.A., Popov S.V., Polyakov S.P., Kashkevich M.P., Martyanov V.L.* GPR research for the organization of the runway on the sea ice in the area of the Bunger Oasis field base, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research.* 2019, 65, 3: 315–327. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327.

investigations described in this paper was to find a safe site for organizing a snow-runway in the area of the Bunger Oasis field base. Taking into account the location of the infrastructure objects of RAE within the Bunger Oasis, the central part of the epishelf Transcription Gulf, situated 7 km away from the base, was chosen as the most appropriate site. During the summer field season of the 64th RAE (2018/2019), a geophysical survey using the GPR (Ground-penetrating radar) method was carried out within the area to obtain data on the thickness of the bay ice. The GPR survey conducted shows that the sea ice thickness varies from 2.9 to 3.1 m. Moreover, no signs of discontinuities in the ice layer were found. The area investigated was identified as a safe site suitable for the landing of light and medium aircraft. However, due to the specificity of the relief of the oasis adjacent to the Bay, the weathering products of the rocks composing the hills migrated to the surface of the ice layer. The effect of solar radiation caused the thawing in the areas of such particles to increase, and this, in turn, led to the formation of cavities on the surface, the dimensions of which do not meet the requirements for runway coatings. As a result, in the area under study, the boundaries of the sites were determined that are suitable for the organization of runways for medium and small aircraft without preliminary rolling of the landing site.

Поступила 22 июня 2019 г.

Принята к печати 23 июля 2019 г.

Ключевые слова: взлетно-посадочная полоса, Восточная Антарктида, георадарное профилирование, логистическое обеспечение, Оазис Бангера, транспортные операции.

В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных в районе полевой базы Оазис Бангера в ходе полевого сезона 64-й РАЭ (2018/19 г.). Целью работ был поиск безопасной площадки для организации посадочной полосы для самолетов средней и малой авиации. Наиболее подходящим местом для возможного аэродрома был выбран покров залива Транскрипция, располагающегося на удалении 7 км от базы. В рамках исследований были выполнены геофизические инженерные изыскания методом георадиолокации для определения мощности льда залива и выявления нарушения целостности ледяного покрова. По результатам работ был найден безопасный участок для приема мало- и среднегабаритных самолетов на лыжных шасси.

ВВЕДЕНИЕ

Авиация играет значительную роль в обеспечении полярных станций и полевых баз. Особенно это важно для Антарктиды, где расстояние между объектами инфраструктуры исчисляется многими сотнями километров. В этом смысле поддержание действующих взлетно-посадочных полос (ВПП) в работоспособном состоянии, а также организация новых является важным аспектом деятельности Российской антарктической экспедиции (РАЭ). Особое внимание при этом уделяется тем посадочным площадкам, которые располагаются в районах развития выводных континентальных и шельфовых ледников [1–4]. Такие участки динамически весьма активны, что приводит к образованию многочисленных трещин [5–8]. В качестве примера можно привести вновь организованную после почти тридцатилетнего перерыва посадочную площадку в районе станции Мирный, где имеется значительное количество таких участков, постоянно изменяющих свою конфигурацию [9]. При этом основная сложность заключается в том, что трещины и полости, представляющие опасность для людей и транспортной техники, зачастую не прослеживаются на поверхности ледника, особенно после обильных снегопадов. Значимую помощь в их выявлении оказывают дистанционные методы: аэрофотосъемка при низком положении Солнца над горизонтом [9] и георадарное профилирование. Последний, как показывает отечественный и зарубежный опыт, весьма эффективен для поиска

скрытых трещин на ледниках [10–15]. Именно результаты георадарных работ позволили в конечном итоге выбрать положение посадочной площадки в районе станции Мирный, на которую в феврале 2016 г. был принят среднемагистральный самолет БТ-67 «Турбобаслер», тем самым было восстановлено авиационное сообщение со станцией, прерванное на четверть века [16].

На настоящий момент в рамках работ РАЭ выполняются комплексные аэрогеофизические исследования на Земле Королевы Мэри в районе отечественной станции Мирный, ввиду чего на действующей ВПП станции во время летних полевых сезонов осуществляется базирование самолета Ан-2. В соответствии с планами Минприроды РФ в дальнейшем предполагается выполнение аэрогеофизических работ и на Земле Уилкса, что подразумевает проведение воздушных операций и над территорией оазиса Бангера. Вследствие этого возникает необходимость в создании посадочной площадки для регулярного базирования авиации в районе полевой базы Оазис Бангера ввиду близости расположения района предстоящих работ.

Еще на ранних этапах геологических исследований на территории оазиса, а именно в период 1-й и 2-й КАЭ (1955–1958 гг.), авиационное обеспечение станции осуществлялось при помощи самолетов Ли-2 и Ан-2. Посадочной площадкой для приема воздушного транспорта в летний период служила ВПП на леднике в 15 км от самой базы, а в зимнее время для транспортных операций в качестве аэродрома использовался ледяной покров озера Фигурное (рис. 1) вблизи базы [17]. После продолжительного перерыва научных работ в районе оазиса исследования были возобновлены в период сезонных работ 32-й САЭ (1986/87 г.), было восстановлено и авиаобеспечение новой полевой базы. В рамках проводимых транспортных операций в этот период были организованы две ВПП: с грунтово-скалистым покрытием в нескольких километрах от станции и ледяным покрытием в пределах залива Транскрипция, находящегося в 7 км от базы Оазис Бангера [18].

Принимая во внимание успешный опыт организации аэродромов ранних экспедиций и необходимость в восстановлении воздушного сообщения района полевой базы Оазис Бангера, в сезон 64-й РАЭ (2018/19 г.) руководством РАЭ перед гляцио-геофизическим отрядом была поставлена задача поиска здесь подходящей и, главное, безопасной площадки для подготовки ВПП для самолетов средней и малой дальности. Необходимость ее создания обусловлена долгосрочными планами геологических работ в этом районе и планами аэрогеофизических исследований.

ВЫБОР МЕСТА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ

Как видно из рис. 1, оазис с юга и запада граничит с выводными ледниками Апфела и Эдисто, а на востоке к нему примыкает краевая часть континентального покровного ледника Берега Нокса. С севера, со стороны океана к оазису примыкает шельфовый ледник Шеклтона, ввиду чего сам оазис и полевая база расположены на удалении около 60 км от побережья [17, 18, 19]. По примеру посадочных площадок, организованных на отечественных станциях Прогресс и Мирный, в районе оазиса Бангера также могла бы осуществляться посадка воздушных судов на одном из ледников. Однако подготовка такой посадочной площадки нежелательна по соображениям транспортной доступности: расстояние до полевой базы значительное, при этом расчлененность рельефа затрудняла бы проезд санно-гусеничной техники. Поэтому, после проведения рекогносцировочных работ, предваряющих инженерные изыскания, наиболее перспективным с позиций логистического обеспечения, под-



Рис. 1. Морфология оазиса Бангера [20].

Красным прямоугольником показан район работ в центральной части залива Транскрипция

Fig. 1. Morphology of the Bunger Oasis (Atlas of Antarctica, 1966).

The red rectangle indicates the area of the investigations in the Transcription Gulf

крепленных опытом советских экспедиций, был выбран центральный район залива Транскрипция, показанный на рис. 1.

Залив Транскрипция представляет собой эпизельфовое озеро, с севера примыкающее к леднику Эдисто (рис. 2, а), а с юга ограниченное скальными породами оазиса (рис. 2, б, в). Согласно исследованиям, проводившимся в период с февраля по март 1989 г. в рамках сезонных работ 35-й РАЭ [21], глубина залива в центральной части достигала 100 м, при этом до глубины 70 м вода практически пресная, с соленостью менее 1 ‰, а в нижней части соленость воды достигает значений 25 ‰. Залив, таким образом, имеет связь с морем, что, помимо значительной солености воды, подтверждается наличием приливной трещины, расположенной вдоль береговой линии (см. рис. 2, б, в). На ледовый режим залива влияет большая протяженность берегов, примыкающих к леднику Эдисто, за счет чего залив Транскрипция постоянно охлаждается и не вскрывается ото льда. Мощность последнего летом составляет около 3 м [21]. В южной части залива располагается полевая база Австралийской антарктической экспедиции Эджворт Дэвид, обеспечение которой осуществляется самолетами Twin Otter. Посадочной площадкой для них служит морской лед залива Транскрипция (рис. 2, г).

ГЕОАДАРНЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

Основные задачи работ заключались в оценке мощности льда залива Транскрипция, а также выявлении нарушений его сплошности, способных привести к аварийным ситуациям на ВПП. Достоверные, не подлежащие сомнению результаты достигаются



Рис. 2. Характер местности, на которой производились инженерные изыскания:

а — торосы ледника Эдисто, *б* — южная оконечность залива, окаймленная сопками, и приливная трещина вдоль береговой линии, *в* — приливная трещина, *з* — самолет Twin Otter Австралийской антарктической экспедиции. Фото А.А. Сухановой

Fig. 2. The character of the area, where engineering surveys were carried out:

a — hummocks of the Edisto glacier, *b* — south side of the gulf, bordered by hills, and a tidal crevasse along the coastline; *v* — the tidal crevasse; *z* — Twin Otter of the Australian Antarctic expedition. Photo by A.A. Sukhanova

бурением. Однако этот метод весьма трудоемок, особенно при необходимости покрытия съемкой значительной территории, поэтому необходимо было найти другой способ определения мощностей ледяного покрова. Недавние исследования авторов [22, 23], а также работы отечественных и зарубежных исследователей [24–27] продемонстрировали эффективность использования георадаров для изучения строения морского льда. Полученный опыт был применен и для работ в оазисе Бангера.

Георадарная съемка осуществлялась пешим порядком. В работах использовался георадар GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., USA) с блоком управления SIR-3000 и антенной с частотой зондирующих импульсов 400 МГц. Выполнение контрольного механического бурения для подтверждения достоверной интерпретации геофизических данных производилось при помощи шнекового ледового бура Kovacs (Kovacs Enterprises, USA) с диаметром скважины 50 мм. Плановая привязка на местности осуществлялась при помощи приемника Garmin GPS map 64st. Разбивка сети профилей для выполнения георадарных работ выполнялась в соответствии с известными азимутами господствующих ветров, так как именно они, по авиационным требованиям, являются одним из главных критериев выбора главной оси ВПП. Согласно метеорологическим данным Австралийской и Российской антарктических экспедиций, основными азимутами для ориентации главной оси ВПП являются 130° и 90°. В процессе инженерных изысканий, кроме того, был найден перспективный по своей длине и ориентации участок по азимуту 80°. Район проведения гляцио-георадарных работ показан на рис. 3.

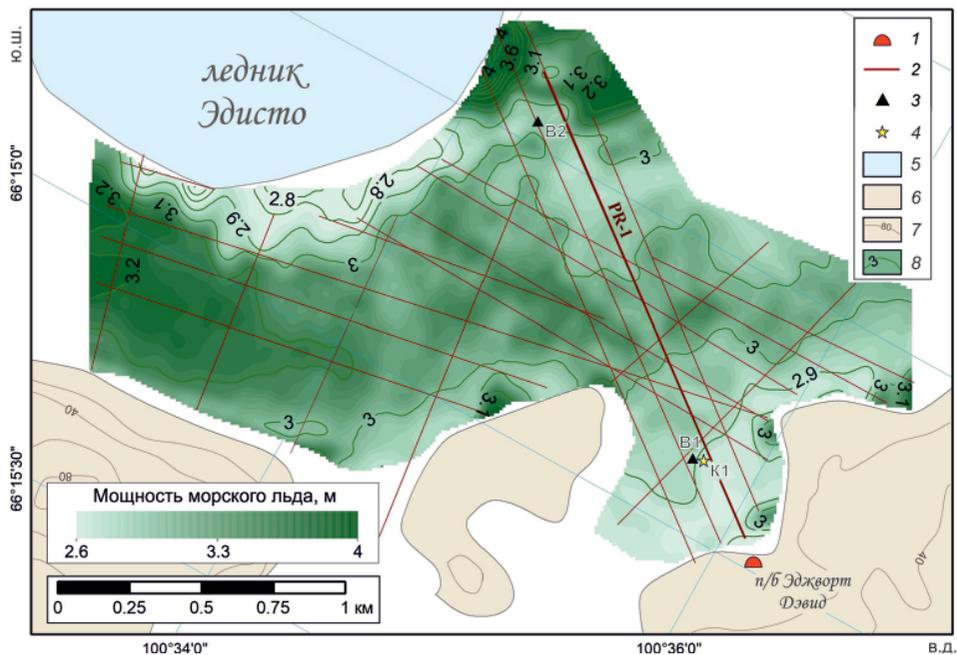


Рис. 3. Район проведения работ и мощность морского льда:

1 — расположение полевых баз в районе работ; 2 — положение георадарных маршрутов; 3 — пункты механического бурения; 4 — пункты кернового бурения; 5 — ледник; 6 — скальные массивы; 7 — изолипсы высот дневной поверхности в метрах; сечение изолиний — 20 м; 8 — изолинии мощности ледового покрова в метрах; сечение изолиний — 0,1 м

Fig. 3. Work area and ice cover thickness in the area of the Transcription Gulf:

1 — field bases in the work area; 2 — GPR lines; 3 — points of mechanical drilling; 4 — points of ice core drilling; 5 — glacier; 6 — rocks; 7 — contours of absolute heights in meters; contour interval is 20 m; 8 — contours of sea ice thickness in meters; contour interval is 0.1 m

В качестве примера на рис. 4 представлен временной георадарный разрез по маршруту PR-1 (см. рис. 3). По всей его длине контрастно выделяется интенсивное отражение 1, связанное с прямой волной. Ниже прослеживается отражение 2, сформированное границей между ледяной толщей и опресненной водой. Оно контрастно выделяется на общем фоне за счет большой разности диэлектрических проницаемостей вышележащей и нижележащей сред [27]. При этом у нижней границы морского льда прослеживается зона 3, в которой наблюдается повышение интенсивности отраженных волн. Причиной этого повышения, вероятно, являются небольшие по размеру трещины, обнаруженные при выполнении кернового бурения в пункте К1 (см. рис. 3), по которым вода просачивается в толщу льда. На наш взгляд, ввиду значительной мощности льда, это не влияет на его прочностные свойства для приема самолетов типа Ан-2 и БТ-67.

Анализ полученных георадарных данных показал, что вблизи ледника Эдисто на временных разрезах прослеживается значимое ослабление сигнала 4, вызванное формированием трещин большого размера. Результатом образования последних является нарушение целостности границы 2. Следует отметить, что ввиду контрастности границы 2 и незначительного ослабления электромагнитных волн во льду про-

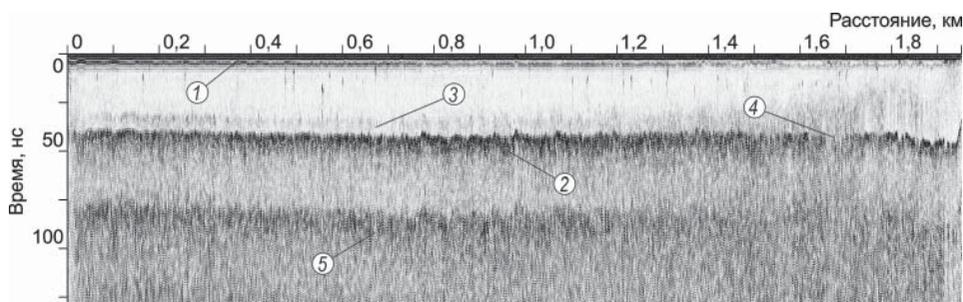


Рис. 4. Временной георадарный разрез:

1 — прямая волна; 2 — граница между ледяной толщей и водой; 3 — обводненная зона в толще льда; 4 — нарушение целостности границы между льдом и водой; 5 — кратная волна

Fig. 4. GPR time-section:

1 — direct wave; 2 — the boundary between the ice and water; 3 — water saturation in the ice; 4 — destruction of the integrity of the ice-water boundary; 5 — multiple wave

исходит многократное переотражение сигнала, фиксируемое на временном разрезе в качестве кратной волны 5. Приведенный временной разрез является характерным для всей выполненной съемки.

Для того чтобы перейти от временного разреза к глубинному, требуется наличие скоростных характеристик лоцируемых сред, что в случае анализа георадарных данных сводится к определению диэлектрической проницаемости. Наиболее простым и точным способом перехода к глубинам является соотнесение временного георадарного разреза с данными бурения. Для этого на начальном этапе был выполнен маршрут, на котором проведено механическое бурение в пункте В1 (см. рис. 3). Зная измеренную толщину льда и временную задержку отраженного сигнала, можно вычислить скорость распространения электромагнитных волн в слое льда и, как следствие, диэлектрическую проницаемость среды. Толщина льда по данным бурения в пункте В1 составила 2,95 м. На временном разрезе в этом пункте задержка отраженной волны от границы между льдом и водой составила 41,02 нс. Исходя из этого, получаем, что скорость распространения волны во льду составляет 143,83 м/мкс, что соответствует диэлектрической проницаемости 4,35 единицы.

Согласно [27], значение диэлектрической проницаемости для льда в среднем принимается равным 3,17, что существенно отличается от полученного в ходе съемки результата. Ее повышение, по всей видимости, связано с наличием трещиноватого обводненного слоя 3 (см. рис. 4). Поскольку скорости распространения электромагнитных волн во льду и в воде отличаются примерно на полпорядка, даже незначительное присутствие последней способно существенно изменить эффективную скорость и связанную с ней диэлектрическую проницаемость [28]. Ввиду технических трудностей, обусловленных отсутствием более глубокой аппаратуры, отбор керна в пункте К1 (см. рис. 3) осуществлялся на глубину 2 м, в то время как по данным контрольного бурения мощность льда составила порядка 3 м. По этой причине не представилось возможным подробно изучить нижнюю часть ледяной толщи, для которой, предположительно, и характерна развитая сеть трещин. Однако при выполнении керна бурения на глубине

0,5 м скважина начинала заполняться водой. В результате подробного стратиграфического анализа ледяного керна было выявлено, что на промежутке от 0,5 м до 1,1 м имеется прозрачный лед, характеризующийся трещиноватой анизотропной структурой. В трещинах также скапливалась вода, образовавшаяся под воздействием процессов интенсивного приповерхностного таяния, что и привело к обводнению и этой трещиноватой зоны льда.

Таким образом, полученное эффективное значение диэлектрической проницаемости, равное 4,35, и было использовано в качестве скоростной модели среды.

В ходе обработки полученных данных в программе Surfer 15.5 (Golden Software Inc., USA) построена схема мощности ледяного покрова в пределах изученной территории. Формирование грида выполнялось по методу Kriging с радиусом осреднения 250 м и расстоянием между узлами сетки грида 30 м. Как следует из схемы, приведенной на рис. 3, в центральной части полигона мощность льда варьирует в среднем в пределах 2,9–3,1 м. В целом прослеживается тенденция к его утолщению в районах, приближенных к торосам ледника Эдисто. Мощность льда на участках, расположенных в южной оконечности залива, несколько меньше, скорее всего, ввиду повышенной аккумуляции тепла за счет дневного нагрева скал. Участки, примыкающие непосредственно к береговой линии, характеризуются локальными повышениями мощности льда, в частности, вблизи австралийской полевой базы Эджворт Дэвид. Возможно, это вызвано воздействием на эти участки активных процессов, связанных с приливной трещиной.

Проведенные инженерные изыскания показывают, что с позиций безопасности, исходя из характера рельефа участка морского льда, отсутствия трещин, а также мощности льда в середине антарктического лета, изученная территория вполне пригодна для организации на ней ВПП. Характерные для толщи льда нарушения целостности и трещины по большей части развиты вблизи ледника Эдисто, и в центральной части полигона они отсутствуют.

При осуществлении геофизических и гляциологических изысканий дополнительно была проведена визуальная оценка состояния ледяного покрытия залива, так как отсутствие неровностей также считается важным критерием при организации посадочных площадок на ледяных поверхностях. В результате было выявлено большое количество каверн, образование которых связано с процессами неравномерного

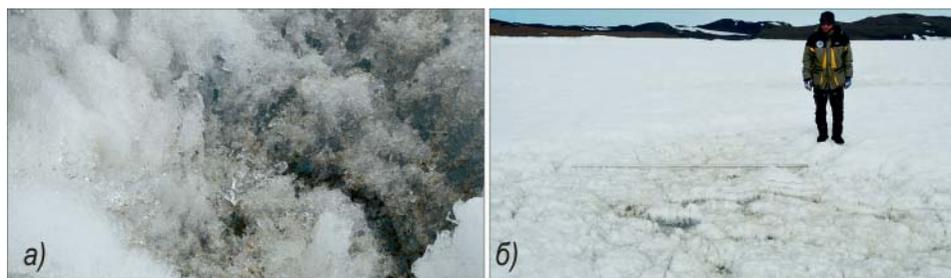


Рис. 5. Оценка состояния покрытия залива Транскрипция.

a — пылевые частицы на поверхности залива; *б* — каверны на поверхности залива. Фото А.А. Сухановой.

Fig. 5. Assessment of the surface condition of the Transcription Gulf.

a — dust particles on the gulf surface; *b* — cavities on the gulf surface. Photo by A.A. Sukhanova

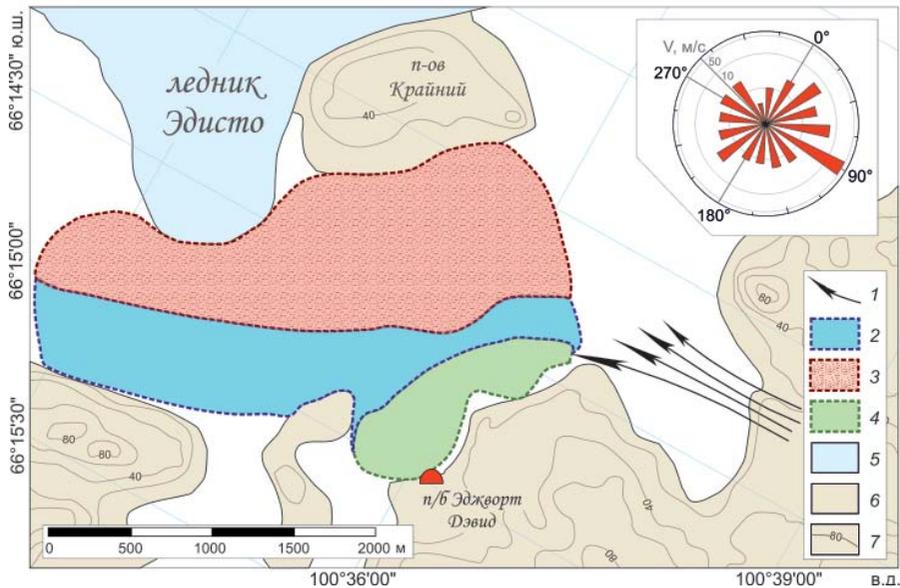


Рис. 6. Оценка безопасности участка залива Транскрипция:

1 — направление преобладающих ветров; 2 — зона для посадки Ан-2; 3 — зона для посадки БТ-67; 4 — зона, не пригодная для посадки самолетов без предварительной подготовки; 5 — ледник; 6 — скальные массивы; 7 — изолинии рельефа, сечение изолиний — 20 м. На врезке приведена роза ветров, построенная по метеоданным летнего полевого сезона 2017/18 г.

Fig. 6. Safety assessment of the area of the Transcription Gulf.

1 — the direction of prevailing winds; 2 — area for landing of An-2; 3 — area for landing of BT-67; 4 — area not suitable for landing of aircraft without preliminary preparation; 5 — glacier; 6 — rocks; 7 — contours of absolute heights; contour interval is 20 m. The insert shows the wind-rose based on the meteorological data collected in 2017/18.

протаивания пылевых частиц на поверхности ледяной толщи (рис. 5, а). Размеры каверн в диаметре нередко достигают 6–7 м при глубине 20–30 см (рис. 5, б), что недопустимо для посадки на таком участке самолетов на лыжном шасси без предварительной подготовки площадки. На рис. 6 стрелками 1 обозначено направление воздушных потоков между двумя сопками, под действием которых и происходит вынос пылевых частиц с поверхности оазиса.

Однако важно отметить, что развитие таких каверн приурочено не ко всей исследованной территории. По результатам визуального обследования полигона были выделены три зоны, для которых характерна различная степень концентрации каверн (рис. 6). Зона № 1 характеризуется ровным рельефом с минимальными неровностями. Именно этот участок используется австралийской экспедицией для приема самолета Twin Otter. Таким образом, эту зону можно считать пригодной для приема планируемых самолетов без какой-либо предварительной подготовки ВПП. Для зоны № 2 характерно наличие небольшого количества застрогов и каверн малых размеров, что несущественно для посадки среднемагистральных самолетов на лыжном шасси. Зона № 3 определена как район развития многочисленных каверн большого размера, что делает невозможным осуществление транспортных операций без предварительной подготовки этого участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в ходе сезонных работ 64-й РАЭ инженерные изыскания были направлены на поиск подходящей площадки для организации ВПП для приема самолетов типа Ан-2 и БТ-67 в районе полевой базы Оазис Бангера. По результатам работ в центральной части залива Транскрипция выяснено, что мощность льда вполне соответствует критериям, необходимым для организации взлетно-посадочной полосы. Определены границы области, на которой возможна организация аэродрома без предварительной подготовки поверхности.

Настоящие исследования являются еще одним хорошим примером эффективного применения метода георадиолокации для решения задач обеспечения безопасности логистических операций, осуществляемых в полярных регионах нашей планеты. Кроме того, они еще раз доказывают свою высокую результативность не только при работах на ледниках, но и при проведении изысканий на акваториях, покрытых льдом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу ЗАО «Авиалифт Владивосток» за обеспечение логистических операций в рамках проводимых работ и Институту наук о Земле СПбГУ за предоставленную геофизическую аппаратуру.

Acknowledgments. The authors are grateful to the crew of “Avialift Vladivostok” for carrying out logistic operations during the field work and to the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University for providing the geophysical equipment.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mellor M.* Hard-surface runways in Antarctica. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988. 87 p.
2. *Abele G.* Snow roads and runways. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990. 101 p.
3. *Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Снежно-ледовые взлетно-посадочные полосы Российской антарктической экспедиции — особенности подготовки и перспективы развития // Российские полярные исследования. 2015. № 2. С. 31–35.
4. *Кубланов М.С., Чернигин К.О.* Математическое моделирование посадки самолета Ил-76 ТД-90ВД в Антарктиде // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19. № 6. С. 35–41.
5. *Vaughan D.G.* Relating the occurrence of crevasses to surface strain rates // *Journal of Glaciology*. 1993. V. 39. № 132. P. 255–266.
6. *Войтковский К.Ф.* Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
7. *Van der Veen C.J.* Crevasses on glaciers // *Polar Geogr.* 1999. V. 23. № 3. P. 213–245.
8. *Nath P.C., Vaughan D.G.* Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2003. V. 108 (B1). ECV 7-1-ECV 7-12. doi:10.1029/2001JB000453.
9. *Пряхин С.С., Попов С.В., Сандалюк Н.В., Мартьянов В.Л., Поляков С.П.* Аэрофотосъемка районов российских антарктических станций Мирный и Прогресс в сезон 2014/15 г. // Лед и снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 107–113.
10. *Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J.* On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006. V. 45. P. 166–177.
11. *Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C.* Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar // *IAHS Proc.* 2007. V. 318. P. 153–162.

12. *Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M.* Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2008. V. XXXVII(B8). P. 837–841.
13. *Singh K.K., Negi H.S., Ganju A., Kulkarni A.V., Kumar A., Mishra V.D., Kumar S.* Crevasse detection in Himalayan glaciers using ground-penetrating radar // *Curr. Sci.* 2013. V. 105. № 9. P. 1288–1295.
14. *Попов С.В., Поляков С.П.* Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // *Криосфера Земли.* 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.
15. *Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Строение верхней части ледника в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // *Криосфера Земли.* 2017. Т. XXI. № 1. С. 73–84.
16. *Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки летного поля в районе российской станции Мирный, Восточная Антарктида // *Лед и снег.* 2016. Т. 56. № 3. С. 413–426.
17. *Саватюгин Л. М., Преображенская М.А.* Российские исследования в Антарктике. Т. 1 (1 САЭ – 20 САЭ). СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 337 с.
18. *Саватюгин Л. М., Преображенская М.А.* Российские исследования в Антарктике. Т. 3 (31 САЭ – 40 САЭ). СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 336 с.
19. *Симонов И.М.* Оазисы Восточной Антарктиды. СПб.: Гидрометеиздат, 1971. 180 с.
20. Атлас Антарктики. М.; Л.: Главное управление геодезии и картографии Министерства геологии и охраны недр СССР, 1966–1969. 240 с.
21. Атлас океанов: Антарктика. СПб.: Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны РФ, 2005. 300 с.
22. *Попов С.В., Поляков С.П.* Результаты гляцио-георадарных опытно-методических работ на морском льду в районе антарктической полевой базы Молодежная в сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.) // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2015. № 4. С. 54–62.
23. *Попов С.В., Кузнецов В.Л., Пряхин С.С., Кашкевич М.П.* Результаты георадарных исследований морского льда Нелла фиорда (р-н ст. Прогресс, Восточная Антарктида) в сезон 2016/17 года // *Криосфера Земли.* 2018. Т. XXII. № 3. С. 18–26.
24. *Maijala P., Moore J.C.* GPR investigations of glaciers and sea ice in the Scandinavian Arctic // *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'98).* 1998. P. 27–30.
25. *Delaney A.J., Arcone S.A., O'Bannon A., Wright J.* Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica // *Proc. Tenth Int. Conf. Grounds Penetrating Radar (GPR 2004).* 2004. P. 777–780. doi.org/10.1109/ICGPR.2004.179867.
26. *Nyland D.* Profiles of floating ice in Arctic regions using GPR // *Lead. Edge.* 2004. V. 23. P. 665–668.
27. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
28. *Looyenga H.* Dielectric constants of heterogeneous mixture // *Physica.* 1965. V. 31. № 3. P. 401–406.

REFERENCES

1. *Mellor M.* Hard-surface runways in Antarctica. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988: 87 p.
2. *Abele G.* Snow roads and runways. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990: 101 p.

3. Polyakov S.P., Martyanov V.L., Lukin V.V. Snow-landing runways of the Russian Antarctic Expedition – features of preparation and development prospects. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Investigations. 2015, 2: 31–35. [In Russian].
4. Kublanov M.S., Chernigin K.O. Mathematical modeling of plane Il-76 TD-90ND landing in Antarctica. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. Civil Aviation High Technologies. 2016, 19, 6: 35–41.
5. Vaughan D.G. Relating the occurrence of crevasses to surface strain rates. *Journal of Glaciology*. 1993, 39, 132: 255–266.
6. Voitkovskiy K.F. *Osnovy glyaciologii*. Fundamentals of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
7. Van der Veen C.J. Crevasses on glaciers. *Polar Geogr.* 1999, 23, 3: 213–245.
8. Nath P.C., Vaughan D.G. Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2003, 108 (B1): ECV 7-1-ECV 7-12. doi:10.1029/2001JB000453.
9. Pryakhin S.S., Popov S.V., Sandalyuk N.V., Martyanov V.L., Polyakov S.P. Aerial photography of Russian Antarctic stations Mirny and Progress in summer of 2014/15. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55, 4: 107–113. [In Russian].
10. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006, 45: 166–177.
11. Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C. Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar. *IAHS Proc.* 2007, 318: 153–162.
12. Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2008, XXXVII(B8): 837–841.
13. Singh K.K., Negi H.S., Ganju A., Kulkarni A.V., Kumar A., Mishra V.D., Kumar S. Crevasses detection in Himalayan glaciers using ground-penetrating radar. *Curr. Sci.* 2013, 105, 9: 1288–1295.
14. Popov S.V., Polyakov S.P. Ground-penetrating radar sounding of the ice crevasses in the area of the Russian Stations Progress and Mirny (East Antarctica) during the field season of 2014/15. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, XX, 1: 82–90. [In Russian].
15. Popov S.V., Polyakov S.P., Pryakhin S.S., Martyanov V.L., Lukin V.V. The structure of the upper part of the glacier in the area of a snow-runway of Mirny Station, East Antarctica (based on the data collected in 2014/15 field season). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017, XXI, 1: 67–77. [In Russian].
16. Popov S.V., Mezhonov S.V., Polyakov S.P., Martyanov V.L., Lukin V.V. Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56, 3: 413–426. [In Russian].
17. Savatyugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. *Rossiyskie issledovaniya v Antarktike*. Russian research in the Antarctica. V. 1 (1 SAE – 20 SAE). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1999: 337 p. [In Russian].
18. Savatyugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. *Rossiyskie issledovaniya v Antarktike*. Russian research in the Antarctica. V. 3 (31 SAE – 40 SAE). Leningrad: Hydrometeoizdat, 2001: 336 p. [In Russian].
19. Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoi Antarktidy*. The Oases of East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 180 p. [In Russian].
20. *Atlas Antarktiki*. Atlas of Antarctica. Moscow, Leningrad: Department of Geodesy and Cartography of the Ministry of Geology and conservation of resources of the USSR, 1966: 240 p. [In Russian].
21. *Atlas okeanov: Antarktika*. Atlas of the oceans: Antarctica. St. Petersburg: Department of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2005: 300 p. [In Russian].

22. Popov S.V., Polyakov S.P. Results of the glaciological and GPR tests on the sea ice in the region of Molodezhnaya antarctic field base in the 60-th RAE (2014/15). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 106 (4): 54–62. [In Russian].
23. Popov S.V., Kuznetsov V.L., Pryakhin S.S., Kashkevich M.P. Results of ground-penetrating radar investigations on the Nella fiord sea ice (Progress station area, East Antarctica) in the 2016/17 Austral summer field season. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, XXII, 3: 16–23. [In Russian].
24. Maijala P., Moore J.C. GPR investigations of glaciers and sea ice in the Scandinavian Arctic. Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'98). 1998: 27–30.
25. Delaney A.J., Arcone S.A., O'Bannon A., Wright J. Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica. Proc. Tenth Int. Conf. Grounds Penetrating Radar (GPR 2004). 2004: 777–780.
26. Nyland D. Profiles of floating ice in Arctic regions using GPR. *Lead*. Edge. 2004, 23: 665–668.
27. Macheret Y.Y. *Radiozondirovanie lednikov*. Radio echo-sounding of glaciers. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
28. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixture. *Physica*. 1965, 31, 3: 401–406.

УДК 504.42 + 551.326.7

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ
ПО ТРАССАМ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ
ЗА ПЕРИОД 1997–2018 гг.**

В.Ю. ТРЕТЬЯКОВ^{1,2}, С.В. ФРОЛОВ¹, М.И. САРАФАНОВ^{1,2}*

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

*v_yu_tretyakov@mail.ru

**THE VARIABILITY OF ICE CONDITIONS
ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE
FOR THE PERIOD 1997–2018**

V.Yu. TRETYAKOV^{1,2}, S.V. FROLOV¹, M.I. SARAFANOV^{1,2}*

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*v_yu_tretyakov@mail.ru

Received June, 20, 2019

Accepted July, 24, 2019

Keywords: ice navigation conditions, sea ice.

Summary

The paper discusses the methodology and results of electronic ice charts processing. The charts taken from AARI archive. The Barents, Kara, Laptev, East Siberian and Chukchi seas Ice maps reflect ice conditions for the period from 1997 to 2018 for the April-May inter-annual interval. The total stage lengths of «Sabetta – the Kara Gate –Murmansk» and «Sabetta – the Vilkitski Strait – the Bering Strait» standard routes were calculated at certain conditions of ice navigation. The route “Sabetta – the Bering Strait” was divided into sections within the Kara sea, Laptev Sea, East Siberian and Chukchi Seas for analysis. The purpose of the study is to obtain the values of the length of the routes in different categories of ice and to analyze changes trend of navigation in ice conditions for the period 1997-2018. The series were checked for the presence of trends using the integral curves method. The homogeneity of the series was checked using Wilcoxon - Mann-Whitney and Siegel - Tukey rank non-parametric criteria. Most of the series proved to be non-homogeneous. The following **Citation:** Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. The variability of ice conditions along the Northern sea route for the period 1997–2018. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research.* 2019, 65, 3: 328–340. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340.

conclusions were made: there was some improvement of ice navigation conditions along the route Sabetta – the Kara Gate – Murmansk due to the decrease of the route length in hard ice conditions. The ice navigation conditions along the Sabetta – the Bering Strait route changed little, if at all, the navigation conditions along the route within the Kara Sea and the Laptev Sea have changed for the worse, and within the East Siberian Sea ice conditions scarcely changed. Some slight improvement of the navigation conditions was noted within the Chukchi Sea. In general, the decrease of the route Sabetta – the Bering Strait length in compact drift ice with total concentration equal to 9 tenths or more and in the presence of old ice is partially compensated by increase of the route length in compact ice in the presence of thick first-year ice. The decrease and the increase are relatively equal.

Поступила 20 июня 2019 г.

Принята к печати 24 июля 2019 г.

Ключевые слова: ледовые условия плавания, морской лед.

В работе приводятся методика и результаты обработки ледовых карт из архива Арктического и антарктического научно-исследовательского института по Баренцеву, Карскому, Лаптевых, Восточно-Сибирскому и Чукотскому морям за период с 1997 по 2018 г., относящихся к внутригодовому интервалу «апрель – май». Цель исследования — получить значения протяженностей маршрутов плаваний в определенных категориях льдов и произвести анализ направленности произошедших за период 1997–2018 гг. изменений ледовых условий плавания. Получены протяженности маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив с различными ледовыми условиями, относящиеся к десятидневным (декадным) интервалам. Проверка рядов протяженностей на наличие трендов выполнена методом интегральных кривых; осуществлена проверка однородности рядов с помощью критериев Уилкоксона – Манна – Уитни и Зигеля – Тьюки. Получены следующие выводы: на маршруте Сабетта – Карские Ворота – Мурманск за двадцать последних лет произошло улучшение ледовых условий плавания. На маршруте Сабетта – Берингов пролив условия плавания изменились незначительно.

ВВЕДЕНИЕ

Морские транспортные операции по Северному морскому пути, являясь широко востребованными, в том числе и для транспортировки добытого сырья, осложнены практически круглогодичным наличием ледяного покрова. Ряд авторов указывает на высокие темпы потепления Арктики и, как следствие, уменьшение ледовитости Северного Ледовитого океана (СЛО) [1]. В то же время согласно другим источникам современная тенденция потепления может смениться похолоданием [2]. В любом случае именно изменение ледовой обстановки будет играть ключевую роль при стратегическом планировании морских транспортных систем [3]. Исходя из вышперечисленных потребностей в информации о состоянии ледяного покрова по стандартным маршрутам плаваний, в данной работе исследована динамика ледовых условий по трассам Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив (рис. 1) за более чем двадцатилетний период.

Цель исследования — получить значения протяженностей маршрутов плаваний в определенных категориях льдов и произвести анализ направленности произошедших за период 1997–2018 гг. изменений ледовых условий плавания. Для этого была произведена обработка электронных карт из архива Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), где содержится информация о распределении морских льдов, их сплоченности и возрастном составе [4]. Впервые для данных маршрутов были получены значения протяженностей в различных категориях льдов с использованием современных продуктов исследований в области наук о Земле — электронных карт, составленных на основе данных спутникового зондирования.

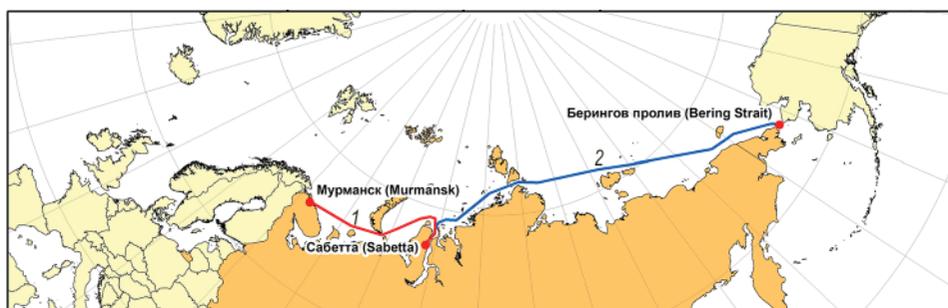


Рис. 1. Карта исследованных стандартных маршрутов плавания.

1 — Сабетта – Мурманск; 2 — Сабетта – Берингов пролив

Fig. 1. Map of the standard routes.

1 — Sabetta – Murmansk; 2 — Sabetta – The Bering Strait

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вдоль маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив произведена обработка электронных векторных карт ледовой обстановки в среде ГИС ArcGIS при помощи написанных на языке Python программ. Для маршрута Сабетта – Берингов пролив выполнен как анализ маршрута в целом, так и его секций в пределах отдельных морей. Данные анализировались подекадно для месяцев с наибольшим развитием ледяного покрова — апреля и мая.

В среде ГИС выполнялась оверлейная операция пересечения полигональных объектов слоя ледовой информации слоем маршрута плаваний и генерацией нового слоя линейных объектов, наследующих ледовые характеристики пересеченных объектов векторной ледовой карты. Затем производились атрибутивные запросы к объектам этого слоя с условиями их соответствия определенным параметрам ледяного покрова с генерацией новых слоев, куда экспортировались выбранные объекты, и расчеты протяженностей объектов. Сперва выделялись объекты с общей сплоченностью дрейфующих льдов 9 и более баллов, если только их ледяной покров не состоял исключительно из начальных видов льда, и экспортировались во вновь создаваемые слои электронных карт. Затем к этим слоям применялись новые атрибутивные запросы с генерацией слоев карты, содержащих участки маршрута с наличием льдов определенных возрастных категорий. Рассчитывались как протяженности отдельных объектов, так и суммарные протяженности всех участков маршрута, удовлетворяющих определенным условиям, например: всех участков маршрута в сплоченных льдах с присутствием толстых однолетних льдов.

Для каждой из декад апреля–мая были получены ряды протяженностей маршрутов плавания в припае, в сплоченных льдах, то есть во льдах с общей сплоченностью 9 и более баллов, в сплоченных льдах при наличии льдов различных возрастных категорий. Также получены значения протяженностей маршрутов плаваний в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых льдов 5 и более баллов и протяженностей маршрутов в сплоченных льдах с частной концентрацией суммы средних и толстых однолетних льдов 5 и более баллов. Для маршрута Сабетта – Мурманск протяженность в припае не рассматривалась, так как данный маршрут проходит вдали от прибрежных участков и припая.

Выполнены расчеты приведенных суммарных протяженностей участков маршрута во льдах разных возрастных категорий. Приведенная протяженность маршрута

во льдах определенной возрастной категории — это условная протяженность пути только в этих льдах.

Приведенная протяженность пути во льдах определенной возрастной категории на однородном участке маршрута рассчитывается как произведение его протяженности на долю площади акватории, занимаемую здесь этими льдами.

Рассчитаны приведенные протяженности старых и толстых однолетних льдов по маршруту Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив.

Полученные ряды межгодовой изменчивости декадных значений протяженностей были проанализированы на наличие межгодового тренда методом интегральных кривых. Этот метод уже давно применяется при исследованиях межгодовой динамики годовых расходов рек [5] и стал применяться для анализа изменчивости ледовых характеристик [6, 7].

Если на интегральной кривой присутствуют изломы и/или изгибы, это является признаком межгодового тренда исходных значений. В этом случае для проверки нулевой гипотезы об однородности ряда исходных значений он подразделяется на части по местам этих изломов или изгибов. Если изломов несколько, то число элементов в отдельных частях ряда может быть меньше необходимого для применения критериев однородности. В этом случае разделение исходного числового ряда на две части производится по месту самого выраженного излома или изгиба.

Затем выполняется проверка нулевой гипотезы о принадлежности двух частей ряда к одной генеральной совокупности, т.е. проверяется гипотеза об отсутствии существенных различий между этими частями [8, 9, 10].

Эта проверка выполнялась в среде системы MathCAD с помощью ранговых непараметрических критериев однородности Уилкоксона–Манна–итни и Зигеля–Тьюки. Для этого были специально разработаны компьютерные программы (рабочие области) MathCAD.

Если нулевая гипотеза об однородности числового ряда не опровергалась, то рассчитывалась вероятность ее верности в процентах. Ряд считался неоднородным, если гипотеза об однородности ряда опровергалась хотя бы одним из критериев или если хотя бы по одному из критериев вероятность верности нулевой гипотезы оказывалась менее 50 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате анализа рядов протяженностей маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив была установлена неоднородность для большинства рядов. Это говорит о статистически значимых изменениях суммарных протяженностей участков маршрутов, отвечающих определенным параметрам ледяного покрова. По маршруту Сабетта – Мурманск (табл. 1) выявлено уменьшение протяженностей маршрутов в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины, в сплоченных льдах при наличии толстых льдов, в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых льдов 5 и более баллов, в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых и средних льдов более 5 баллов.

По маршруту Сабетта – Берингов пролив (табл. 2) было обнаружено уменьшение протяженности маршрута в припае, а также в сплоченных льдах при наличии старых льдов.

Необходимо отметить увеличение во вторую половину периода 1997–2018 гг. суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Берингов пролив в спло-

Таблица 1

Результаты проверки на неоднородность и сравнения значений первой (1997–2007 гг.) и второй (2008–2018 гг.) половин рядов протяженностей по маршруту Сабетта – Мурманск

Протяженность маршрута плавания	Число рядов		% неоднородных рядов	Направленность изменений при сравнении первой и второй половин рядов
	однородных	неоднородных		
В сплоченных льдах	0	6	100	Уменьшение
В сплоченных льдах с наличием льдов следующих градаций возраста:				
однолетних средней толщины	1	5	83	Уменьшение
толстых однолетних старых льдов	1	5	83	Уменьшение
Не были обнаружены на маршруте				
В сплоченных льдах с частной концентрацией 5 баллов и более:				
толстых льдов	0	6	100	Уменьшение
суммы толстых и средних толщин льдов	1	5	83	Уменьшение

Таблица 2

Результаты проверки на неоднородность и сравнения значений первой (1997–2007 гг.) и второй (2008–2018 гг.) половин рядов протяженностей по маршруту Сабетта – Берингов пролив

Протяженность маршрута плавания	Число рядов		% неоднородных рядов	Направленность изменений при сравнении первой и второй половин рядов
	однородных	неоднородных		
в припае	0	6	100	Уменьшение
в сплоченных льдах	0	6	100	Увеличение
В сплоченных льдах с наличием льдов следующих градаций возраста:				
однолетних средней толщины	0	6	100	Увеличение
толстых однолетних старых	2	4	67	Увеличение
	3	3	50	Уменьшение
В сплоченных льдах с частной концентрацией 5 баллов и более:				
толстых однолетних	0	6	100	Увеличение

ченных льдах; в сплоченных льдах с наличием однолетних льдов средней толщины, толстых однолетних льдов; в сплоченных льдах с частной концентрацией 5 и более баллов толстых однолетних льдов и суммы толстых и средних льдов.

На рис. 2 и 3 приведены сравнения характеристик первой (1997–2007 гг.) и второй (2008–2018 гг.) половин рядов суммарных протяженностей участков маршрутов Сабетта – Мурманск и Сабетта – Берингов пролив в первую декаду мая, в сплоченных льдах при наличии тонких льдов, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины и в сплоченных льдах при наличии толстых льдов.

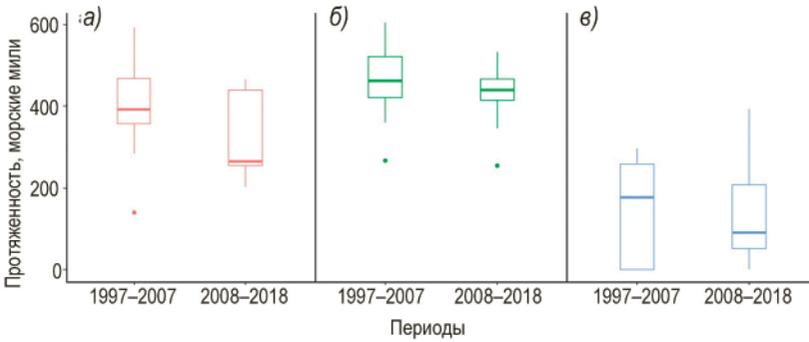


Рис. 2. Изменения суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Мурманск при определенных условиях ледового плавания в первую декаду мая. Медиана показана жирной линией:

а) — в сплоченных льдах при наличии тонких льдов; б) — в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины; в) — в сплоченных льдах при наличии толстых льдов

Fig. 2. Changes of the Sabetta – Murmansk route lengths at certain conditions of ice navigation for the first decade of May. The median is shown by bold solid line:

а) — within compact drift ice with presence of thin first-year ice; б) — within compact drift ice with presence of medium first-year ice; в) — within compact drift ice with presence of thick first-year ice

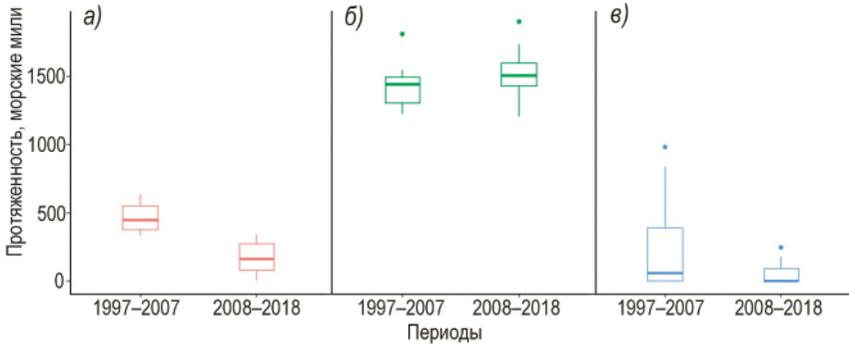


Рис. 3. Изменения суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Берингов пролив при определенных условиях ледового плавания в первую декаду мая. Медиана показана жирной линией:

а) — в припае; б) — в сплоченных льдах при наличии толстых льдов; в) — в сплоченных льдах при наличии старых льдов

Fig. 3. Changes of the Sabetta – Bering Strait route lengths at certain conditions of ice navigation for the first decade of May. The median is shown by bold solid line:

а) — within fast ice; б) — within compact drift ice with presence of thick first-year ice; в) — within compact drift ice with presence of old ice

Рис. 2 и 3 демонстрируют существенное изменение ледовых условий плавания от первого периода ко второму. Так, средняя суммарная протяженность участков маршрута Сабетта – Мурманск в сплоченных льдах в первую декаду мая в период 1997–2007 гг. составляла 513 морских миль, а в период 2008–2018 гг. — 451 морскую милю. Средняя суммарная протяженность участков маршрута Сабетта – Берингов

пролив» в сплоченных льдах в первую декаду мая увеличилась с 1796 морских миль в период 1997–2007 гг. до 2035 морских миль в период 2008–2018 гг. На участке этого маршрута в Карском море средняя суммарная протяженность участков пути в сплоченных льдах увеличилась с 275 морских миль в период 1997–2007 гг. до 512 морских миль в период 2008–2018 гг., в море Лаптевых — с 402 до 406, в Восточно-Сибирском море — с 744 до 746, а в Чукотском море — уменьшилась с 376 до 371 морской мили. Таким образом, наибольшее увеличение суммарной протяженности участков маршрута в сплоченных льдах произошло в Карском море, в остальных морях подобное увеличение незначительно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Уменьшение средних значений суммарных протяженностей участков маршрута Сабетта – Мурманск в сплоченных льдах с присутствием тонких однолетних льдов, однолетних льдов средней толщины и толстых однолетних льдов свидетельствует об улучшении условий плавания в первую декаду мая за период 1997–2018 гг. Анализ числовых рядов межгодовой изменчивости протяженностей методом интегральных кривых показал, что большинство изломов приходилось на 2003–2007 гг., т.е. в эти годы произошло изменение ледовых условий по маршруту плаваний.

Вероятно, произошло усиление процессов таяния в летний период, выражающееся в уменьшении количества остаточных льдов, что подтверждается и другими исследованиями [11]. Так, средняя площадь, занимаемая льдами Северного Ледовитого океана в летний период, значительно сократилась в сравнении с 1980-ми гг. и продолжает уменьшаться. Линейный тренд сокращения морского льда в летний период с 1979 по 2019 г. составляет 48 000 км² в год, или 4,08 % за десятилетие, по сравнению со средним показателем за период с 1981 по 2010 г. [12].

Изменяется процентное соотношение возрастных категорий льдов и в конце периода нарастания ледяного покрова (в мае), так, в море Лаптевых средняя величина количества толстых однолетних льдов за период 1997–2017 гг. на 20 % меньше, чем за период с конца 1930-х до начала 1970-х гг. [13].

Суммарная протяженность участков маршрута Сабетта – Берингов пролив сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии толстых и средних однолетних льдов увеличилась. Таким образом, частично место старых льдов на трассе заняли однолетние льды.

Уменьшение суммарной протяженности участков маршрута Сабетта – Берингов пролив в сплоченных льдах при наличии старых льдов, вероятно, может быть объяснено усилением выноса льдов в приполюсный район при смене систем атмосферной циркуляции. В работе [14] указано, что синоптические процессы двух групп (А и К) способствуют разрушению ледяного покрова. Процессы группы А приводят к развитию циклонической деятельности над большей частью Арктического бассейна (АБ), а группы К — над западной и восточной частями Арктического бассейна. Современное уменьшение ледовитости происходило при отрицательных аномалиях повторяемости процессов группы Б и росте повторяемости процессов других групп. В период с 1997 по 2006 г. в атмосфере наблюдались синоптические процессы с развитой циклонической деятельностью над Северо-Европейским бассейном и в южной части восточного сектора Арктики, что привело к усиленному разрушению льда в АБ и, вероятнее всего, обусловило исторические минимумы площади ледяного покрова в сентябре 2007 г. и затем 2012 г. [14].

Изменения ледовых условий плавания в первую декаду мая на отдельных участках маршрута плаваний Сабетта – Берингов пролив за период 1997–2018 гг. существенно различаются. Так, ледовые условия плавания на участках маршруту в Карском море и море Лаптевых ухудшились из-за увеличения суммарной протяженности участков пути с присутствием льдов наиболее возрастных категорий: однолетних средней толщины, толстых однолетних и старых льдов. На участке маршрута в Восточно-Сибирском море уменьшение протяженности пути в присутствии старых льдов частично компенсируется увеличением протяженности пути с наличием толстых однолетних льдах. В Чукотском море отмечено незначительное улучшение ледовых условий плавания.

Прочность старого льда, толстого однолетнего льда и однолетнего льда средней толщины практически одинакова. Поэтому для оценки степени трудности плавания не столь важно, однолетний лед или старый приходится преодолевать, важны толщина ровного льда и параметры торосов. Торошение же происходит в основном с молодыми и тонкими однолетними льдами. Следовательно, характеристики консолидированного слоя гряды торосов старого льда должны совпадать с характеристиками консолидированного слоя гряды однолетнего льда, т.к. в обоих случаях гряды были сформированы на стадиях молодых или однолетних льдов.

ВЫВОДЫ

В результате сделаны следующие выводы:

1. За период 1997–2018 гг. на трассе СМП Сабетта – Карские Ворота – Мурманск в среднем уменьшилась суммарная протяженность участков пути в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии толстых однолетних льдов, в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов, в сплоченных льдах с суммой частных концентраций толстых однолетних льдов и однолетних льдов средней толщины 5 и более баллов.

2. За период 1997–2018 гг. на трассе СМП Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив в среднем увеличилась суммарная протяженность участков маршрута в сплоченных льдах, в сплоченных льдах при наличии однолетних льдов средней толщины, толстых однолетних льдов; в сплоченных льдах с частной концентрацией толстых однолетних льдов 5 и более баллов, в сплоченных льдах с суммой частных концентраций толстых однолетних льдов и однолетних льдов средней толщины 5 и более баллов. При этом в среднем уменьшилась суммарная протяженность участков маршрута в сплоченных льдах при наличии старых льдов и в припае.

3. Уменьшение в 2008–2018 гг. по сравнению с 1997–2007 гг. средней приведенной протяженности маршрута плаваний Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив в старых льдах в апреле–мае на 160 морских миль «частично компенсируется» увеличением практически на эту же величину (на 166 морских миль) средней приведенной протяженности пути плавания в толстых однолетних льдах. Говорить о «полной компенсации» условий плавания заменой старых льдов на толстые однолетние льды некорректно из-за различного сопротивления старых и толстых однолетних льдов движению судов. Поскольку прочность толстого однолетнего и старого льдов практически одинакова [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], то в случае одинаковой толщины ровного толстого однолетнего и старого льдов они оказывают одинаковое сопротивление движению ледокола и одинаковое давление на борт судна при сжатиях льдов. Однако в апреле–мае толщина ровного старого льда больше

толщины ровного толстого однолетнего льда, т.к. рост толщины старого льда начинается осенью не с нуля, как у однолетнего льда. При плаваниях в сплоченных дрейфующих льдах наибольшим препятствием являются не ровные льды, а гряды торосов. Обычно гряды торосов формируются в молодых и тонких однолетних льдах. Первоначально гряды состоят из отдельных, не скрепленных между собой блоков такой же толщины, что и ровные льды, из которых они образовались. По прохождении некоторого времени блоки смерзаются в консолидированный слой, который является серьезным препятствием при преодолении ледоколом гряды торосов и опасным ледяным образованием при сжатиях судов. Чередование похолоданий и потеплений способствует образованию и росту консолидированного слоя. Существуют взаимосвязи между суммой градусо-дней мороза, толщиной ровного льда и толщиной консолидированного слоя гряд торосов [26, 27]. Поэтому обычно толщина консолидированного слоя гряд торосов в старых льдах больше, чем в грядах однолетних льдах. Следовательно, при «замещении» старых льдов толстыми однолетними льдами трудность ледового плавания должна несколько снижаться.

На маршруте плаваний Сабетта – Карские Ворота – Мурманск за период 1997–2018 гг. отмечено улучшение ледовых условий плавания в апреле–мае. На маршруте Сабетта – пролив Вилькицкого – Берингов пролив условия ледового плавания в апреле–мае практически не изменились.

Компьютерное имитационное моделирование морских транспортных операций в условиях дрейфующих морских льдов предполагает применение метода Монте-Карло, позволяющего учитывать все многообразие значений параметров ледяного покрова.

Результаты данного исследования необходимы для построения статистических распределений ряда параметров, используемых в компьютерной модели оценки вероятности аварийных ситуаций из-за сжатий судов дрейфующими льдами. Также они могут быть задействованы при модернизации компьютерной системы выбора оптимального маршрута плаваний.

Благодарности. Статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы по теме 1.5.3.6 ЦНТП «Моря Российской Арктики в современных климатических условиях».

Acknowledgments. The work was performed in accordance with the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP) 1.5.3.6 «The Russian Arctic seas under present climatic conditions».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Munshi J.* Trends in Polar Sea Ice Extent 1979–2015 (April 23, 2015). URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2598152> (дата обращения 13.06.2019).
2. *Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Морозова Е.А., Павлов М.В., Саватюгин Л.М.* Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 108–115.
3. *Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П., Данилов А.И.* Последствия изменений климата для некоторых видов хозяйственной деятельности в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 90–98.
4. *Бресткин С.В., Быченков Ю.Д., Десятаяев О.С., Фоломеев О.В.* Обеспечение гидрометеорологической безопасности в Арктическом регионе // Материалы международной научно-прак-

- тической конференции «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктическом регионе. Безопасный город в Арктике». МЧС России. 2016. С. 68–72.
5. Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт». Стандарт организации СТО ГГИ 52.08.41-2017, «Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету». СПб.: ГГИ, 2017. 46 с.
6. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Анализ межгодовой изменчивости ледовых условий на маршруте Сабетта – Карские Ворота – Мурманск за 1997–2017 гг. // География: Развитие науки и образования: (По материалам международной научно-практической конференции «LXXI Герценовские чтения». РГПУ им. А.И. Герцена, 18–21 апреля 2018 года). СПб.: РГПИ им. А.И. Герцена, 2018. С. 261–265.
7. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И., Федяков В.Е. Геоинформационные технологии для обеспечения морских транспортных операций в Арктике и замерзающих морях // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». СПб.: РГПИ им. А.И. Герцена, 2019. С. 491–493.
8. Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2001. 167 с.
9. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.
10. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
11. Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 3. С. 229–240.
12. National snow & Ice Data Center. «Melt season shifts into high gear». URL: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/> (дата обращения 14.07.2019)
13. Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Т. 63. № 4. С. 5–15.
14. Волков В.А., Мушта А.В., Демчев Д.М., Коржиков А.Я., Сандвен С. Связь крупномасштабной изменчивости поля дрейфа льда в Северном Ледовитом океане с климатическими изменениями общей ледовитости, происходящими в течение последних десятилетий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 2 (108). С. 50–63.
15. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
16. Гаврило В.П., Ковалев С.М., Недошивин О.А. Расчетные и среднемноголетние характеристики механических свойств однолетнего льда Баренцева и Карского морей / Под ред. В.П. Гаврило. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 42 с.
17. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 319 с.
18. Апель И.Л. О силах сжатия и внутреннего сопротивления в ледяном покрове при нажимном дрейфе // Труды ААНИИ. 1976. Т. 320. С. 153–160.
19. Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е. Определение структуры формул для оценки взаимодействия ледяного покрова с конструкциями // Труды ААНИИ. 1985. Т. 391. С. 55–62.
20. Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литоков О.Е., Мануров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 360 с.
21. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 318 с.

22. Никитин В.А., Сухоруков К.К. Прочность морских ледяных полей и ледовые нагрузки // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 88–95.
23. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Шейкин И.Б. Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб.: ААНИИ, 2011. 180 с.
24. Ледяные образования морей западной Арктики / Под. ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
25. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стройиздат, 1995. 46 с.
26. Guzenko R.B., Mironov E.U., May R.I. Morphometry and internal structure of ice ridges in the Kara and Laptev Seas // Proceedings of the Twenty-ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu. 2019. P. 647–654.
27. Salganik E., Høyland K.V., Shestov A. Thermodynamics and consolidation of ice ridges for laboratory scale // Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 11-16, 2017, Busan, Korea. 2017. Paper POAC17-078. URL: http://www.poac.com/Papers/2017/pdf/POAC17_078_Evgenii.pdf (дата обращения 29.08.2019).

REFERENCES

1. Munshi J. Trends in Polar Sea Ice Extent 1979–2015 (April 23, 2015). Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2598152> (accessed 13.06.2019).
2. Bol'shijanov D.Ju., Makarov A.S., Morozova E.A., Pavlov M.V., Savatjugin L.M. Polar regions environment during last millennium on the base of lake sediments investigations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2009, 1 (81): 108–115. [In Russian].
3. Kovalevskij D.V., Alekseev G.V., Bobylev L.P., Danilov A.I. The consequences of climate change for some types of economic activity in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 4 (94): 90–98. [In Russian].
4. Brestkin S.V., Bychenkov Iu.D., Deviataev O.S., Folomeev O.V. Ensuring hydrometeorological safety in the Arctic region // Problems of prevention and emergency response in the Arctic region. Safe city in the Arctic. EMERCOM of Russia, 2016: 68–72. [In Russian].
5. State institution “State Hydrological Institute”. *Standard organization STO GGI 52.08.41-2017. Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki pri nestacionarnosti vremennyh rjadov, obuslovlennoj vlijaniem klimaticheskikh faktorov. Rekomendacii po raschetu*. The main hydrological characteristics of non-stationary time series, due to the influence of climatic factors. Calculation recommendations. St. Petersburg, State Hydrological Institute, 2017: 46 p. [In Russian].
6. Tret'jakov V.Iu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Analysis of the interannual variability of ice conditions on the route Sabetta – Kara Gate – Murmansk for 1997–2017. *Geografija: Razvitie nauki i obrazovanija (Po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «LXXI Gertsenovskie chteniia». RGPU im. A.I. Gertsena, 18–21 aprelia 2018 goda)*. “Geography: Development of Science and Education” based on the materials of the international scientific-practical conference «LXXI Herzen readings. Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, April 18–21, 2018». 2018: 261–265. [In Russian].
7. Tret'jakov V.Iu., Frolov S.V., Sarafanov M.I., Fediakov V. Geo-information technologies for ensuring maritime transport operations in the Arctic and freezing seas // *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoichivogo razvitiia Rossijskoi Federatsii*. Modern problems of hydrometeorology and sustainable development of the Russian Federation. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2019: 491–493. [In Russian].
8. Druzhinin V.S., Sikan A.V. *Metody statisticheskoi obrabotki gidrometeorologicheskoi informacii*. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2001: 167 p. [In Russian].

9. Sikan A.V. *Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informacii*. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2007: 279 p. [In Russian].
10. Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii*. Statistical methods for analyzing hydrometeorological information. St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2008: 408 p. [In Russian].
11. Julin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V. Seasonal and inter-annual variability of the ice massifs of the East Siberian Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2018, 64, 3: 229–240. [In Russian].
12. National snow & Ice Data Center. Melt season shifts into high gear. Available at: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/> (accessed 14.07.2019).
13. Hotchenkov S.V. Formation of the age composition of the ice cover in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 63, 4: 5–15. [In Russian].
14. Volkov V.A., Mushta A.V., Demchev D.M., Korzhikov A.Ja., Sandven S. Connection of large-scale variability of the ice drift field in the Arctic Ocean with climatic changes in the total ice cover occurring during the last decades. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 2 (108): 50–63. [In Russian].
15. Bogorodskii V.V., Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody gliatsiologii*. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
16. Gavrilov V.P., Kovalev S.M., Nedoshivin O.A. *Raschetnye i srednemnogoletnie kharakteristiki mekhanicheskikh svoystv odnoletnego l'da Barentseva i Karskogo morei*. Calculated and average long-term characteristics of the mechanical properties of the annual ice of the Barents and Kara seas. Handbook ed. V.P. Gavrilov. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996: 42 p. [In Russian].
17. *Opasnye ledovye iavleniia dlia sudokhodstva v Arktike*. Dangerous ice phenomena for shipping in the Arctic. Ed. Mironov E.U. St. Petersburg: AARI, 2010: 319 p. [In Russian].
18. Appel' I.L. On the forces of compression and internal resistance in the ice cover under pressure drift. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1976, 320: 153–160. [In Russian].
19. Faddeev O.V., Kheisin D.E. Determining the structure of formulas for evaluating the interaction of ice cover with structures. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1985, 391: 55–62. [In Russian].
20. Alekseev Iu.N., Afanas'ev V.P., Litokov O.E., Manurov M.N., Panov V.V., Truskov P.A. *Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniia morskikh mestorozhdenii nefi i gaza*. Ice engineering aspects of the development of offshore oil and gas fields. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 360 p. [In Russian].
21. Doronin Iu.P., Kheisin D.E. *Morskoi led*. Sea ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1975: 318 p. [In Russian].
22. Nikitin V.A., Sukhorukov K.K. Durability of sea ice fields and ice loads. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1998, 12: 88–95. [In Russian].
23. Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Sheikin I.B. *Metodicheskoe posobie po izucheniiu fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik ledianykh obrazovaniy kak iskhodnykh dannykh dlia rascheta ledovykh nagruzok na berega, dno i morskije sooruzheniia*. Methodological manual for the study of the physico-mechanical characteristics of ice formations as initial data for the calculation of ice loads on the shores, bottom and offshore structures. St. Petersburg: AARI, 2011: 180 p. [In Russian].
24. *Ledianye obrazovaniia morei zapadnoi Arktiki*. Ice Formations of the Western Arctic Seas. Ed. G.K. Zubakin. St. Petersburg: AARI, 2006: 272 p. [In Russian].
25. SNiP 2.06.04-82. *Nagruzki i vozdeistviia na gidrotekhnicheskie sooruzheniia (volnovye, ledovye i ot sudov)*. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). Moscow: Stroizdat, 1995: 46 p. [In Russian].

26. *Guzenko R.B., Mironov E.U., May R.I.* Morphometry and internal structure of ice ridges in the Kara and Laptev Seas. Proceedings of the Twenty-ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu. 2019: 647–654.

27. *Salganik E., Høyland K.V., Shestov A.* Thermodynamics and consolidation of ice ridges for laboratory scale. Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 11–16, 2017, Busan, Korea. 2017. Paper POAC17 -078. Available et: http://www.poac.com/Papers/2017/pdf/POAC17_078_Evgenii.pdf (accessed 29.08.2019).

СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ

УДК [316.47+656.02](985)

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-341-352

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЕ И ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ СВЯЗИ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ

Н.Б. ВАХТИН, Е.В. ЛЯРСКАЯ*

*Центр социальных исследований Севера
АНООВО «Европейский университет в Санкт-Петербурге»,
Санкт-Петербург, Россия*

**nvakhtin@gmail.com*

HUMAN AND INFRASTRUCTURAL CONNECTIVITY OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION: METHODOLOGICAL APPROACHES TO RESEARCH

N.B. VAKHTIN, E.V. LIARSKAYA*

Center for Arctic Social Studies European University at St. Petersburg, St. Petersburg, Russia

**nvakhtin@gmail.com*

Received July, 3, 2019

Accepted August, 27, 2019

Keywords: connectivity, infrastructure, life trajectories, migration, Russian Arctic, translocality.

Summary

The aim of the present paper is to introduce to the reader a new project “Arctic Connectivity: People and Infrastructures” (Russian Fund for Fundamental Research grant № 18-05-60108, received within the programme “Fundamental problems of research in the Russian Arctic: natural and social environment”). The three-year research project described in the article began in 2018 and is done by the Centre for Arctic Social Studies (European University, St Petersburg). The approach is based on the central concept of connectivity. The main aim of the research is to study different kinds of connections that make possible movement of people, objects, and information both within the Arctic Zone of the Russian Federation (AZRF) and between AZRF and other parts of the country. The research uses holistic approach with its simultaneous and integrated attention to both social ties of the people who live and work in the AZRF and the physical infrastructure (roads and railroads, air and water transport, telecommunication etc.) that supports these ties. Despite the common stereotype, AZRF is not separated from the rest of the country. Multiple ties, both infrastructural and symbolic, unite the region by providing exchange of people, objects, and information between its parts, and link AZRF to the southern parts of the country. The target group of the ongoing research includes both indigenous

Citation: *Vakhtin N.B., Liarskaya E.V. Human and infrastructural connectivity of the Arctic zone of the Russian Federation: methodological approaches to research. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 341–352. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-341-352.*

and non-indigenous population. From the theoretical perspective, the research will help validate a working hypothesis of special importance of connectivity for the Arctic region. The research will help fill gaps in our fragmentary knowledge of the social life of the Arctic. From a practical viewpoint, the project will help plan the development of AZRF more rationally.

Поступила 3 июля 2019 г.

Принята к печати 27 августа 2019 г.

Ключевые слова: Арктическая зона РФ, жизненные траектории, инфраструктура, миграция, связанность.

Цель статьи — познакомить читателей с работой по проекту «Арктические связи: люди и инфраструктура» (грант РФФИ № 18-05-60108), выигравшему конкурс РФФИ «Фундаментальные проблемы изучения и освоения Российской Арктики: природная и социальная среда». Исследование ведется коллективом Центра социальных исследований Севера Европейского университета в Санкт-Петербурге начиная с 2018 г. и рассчитано на три года. В основе подхода лежит идея «связности». Основная цель, которую ставит перед собой данное исследование, — изучить различные виды связей, обеспечивающих передвижение людей, вещей и информации как внутри Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), так и между АЗРФ и другими регионами страны. Особенностью подхода является одновременное исследование социальных связей людей, живущих и работающих в АЗРФ, и физической инфраструктуры (железные дороги, авиасообщение, водный транспорт, телекоммуникации), поддерживающей эти связи. Вопреки широко распространенному мнению, АЗРФ (и в целом Крайний Север) не отделена от остальной страны; напротив, многочисленные связи различного характера (как осязаемые, инфраструктурные, так и человеческие, символические), во-первых, пронизывают сам регион, обеспечивая передвижение людей, вещей и информации внутри АЗРФ, и, во-вторых, соединяют АЗРФ с остальной территорией страны. Целевая группа исследования включает как коренное, так и некоренное население. Теоретически важным результатом работы станет проверка гипотезы об особой значимости «человеческих связей» для описания арктической инфраструктуры. С практической точки зрения результаты проекта помогут более рационально осуществлять планирование развития территорий АЗРФ.

ВВЕДЕНИЕ

На фоне стремительно растущего внимания государства и промышленных компаний к Арктической зоне Российской Федерации растет актуальность не только естественно-научных, но и социальных исследований в регионе. Успешность хозяйственной деятельности в АЗРФ в огромной степени зависит от социального поведения живущих там людей, которое не в последнюю очередь определяется социальными ожиданиями и мотивациями. Будущее развитие инфраструктуры АЗРФ неизбежно окажет воздействие на условия и качество жизни местного населения и не может быть спланировано без учета социальных последствий такого развития для региона.

Наш подход ориентирован на изучение социальной и инфраструктурной связанности территорий АЗРФ друг с другом и с более южными районами страны, исследование взаимодействия инфраструктурных и человеческих связей в формировании поведенческих моделей населения региона; цель — понять, как существующие связи и их потенциальные изменения влияют на выстраивание жизненных стратегий коренного и некоренного населения АЗРФ.

Громадный потенциал Арктического региона России не может быть верно оценен, а его реализация не может быть спланирована без учета не только уязвимости природной среды, но и социально-экономических проблем, связанных с неизбежными изменениями «физической» инфраструктуры и, как следствие, изменениями

в жизни населения. В этих условиях особую актуальность приобретает выявление и описание значимых факторов, влияющих на экономическое развитие территории, отвечающих за связность территории АЗРФ и могущих препятствовать депопуляции Арктики — стратегически значимого региона страны. Понимание природы и механизмов действия этих факторов поможет в составлении успешных планов развития Арктической зоны РФ.

Цель настоящей статьи — позиционировать новое направление исследований, заявленное в проекте «Арктические связи: люди и инфраструктуры» (грант РФФИ № 18-05-60108 в рамках программы «Фундаментальные проблемы изучения и освоения Российской Арктики: природная и социальная среда»). Основная цель, которую ставит перед собой это исследование, — изучить различные виды связей, обеспечивающих передвижение людей, вещей и информации как внутри АЗРФ, так и между АЗРФ и другими регионами страны. Особенностью нашего целостного подхода является одновременное изучение социальных связей людей, живущих и работающих в АЗРФ, и физической инфраструктуры (автомобильные и железные дороги, авиасообщение, водный транспорт, телекоммуникации и т.п.), поддерживающей эти связи. Исследование социальной и инфраструктурной связанности Арктики должно проводиться как на макроуровне (между АЗРФ и другими регионами), так и на локальном уровне (между соседними регионами и внутри регионов, где часто возникают так называемые «невидимые границы», нередко не совпадающие с административными).

Подобное широкомасштабное исследование должно решить следующие задачи:

1. Изучить совокупность связей, существующих в сознании жителей АЗРФ: внутри «своей» территории; между соседними территориями; в пределах России; трансграничные связи (со странами бывшего СССР).
2. Исследовать практики, основанные на этих связях: мобильность, миграции, телекоммуникации, обмен новостями, посылками и предметами; а также социальные сети, возникающие через подобные практики, в зависимости от гендера и возраста, родства и межпоколенческих отношений.
3. Оценить способы использования «физической» инфраструктуры, проследить, каким образом она достраивается и дополняется в случае ее разреженности или отсутствия.
4. Проанализировать управленческие аспекты развития арктических связей: связь арктического региона с другими территориями, влияние глобальных процессов (изменение климата, развитие транспортных коридоров) на Российскую Арктику.

Результатом такого исследования станет комплексный анализ феноменов северной связности и мультилокальности, характерных для жителей АЗРФ.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ РАМКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная концептуальная рамка предлагаемого подхода состоит в том, что, вопреки широко распространенному мнению, Арктика (Крайний Север, Север и т.д.), в особенности же Арктическая зона РФ, не отделена от остального мира: важным для нее является понятие *связанности*. Многочисленные связи различного характера пронизывают сам регион, обеспечивая привязанность населения к территории, передвижение людей, вещей и информации внутри АЗРФ; кроме того, они соединяют Арктику с остальной территорией страны, обеспечивая развитие арктического региона.

Идея связанности населения с той или иной территорией, наличие различных видов связей являются ключевыми для исследования практически всех аспектов жизни на Севере: миграционного поведения, отношения к месту проживания, мобильности, выбора рода деятельности и др. Эта связанность включает как физические, так и человеческие связи, которые обеспечиваются, среди прочего, заинтересованностью населения в жизни на Севере и в развитии региона.

Способы поддержания таких связей различны: от макроэкономического обмена между АЗРФ и другими регионами страны до таких мелких и незаметных процессов, как поездки в гости, в отпуск, на лечение, на учебу, за покупками и др. Во всех подобных связях и перемещениях важную роль играет существующая физическая инфраструктура (железные дороги и зимники, авиасообщение, морской и речной водный транспорт, почта и телекоммуникации). Расширение и развитие инфраструктуры, появление новых путей сообщения может способствовать возникновению дополнительных связей между регионами или усилению уже существующих. Однако само по себе наличие физической инфраструктуры не делает регионы более связанными друг с другом, если не развиты человеческие связи. В условиях, когда физической инфраструктуры недостаточно, а человеческие связи крепки, люди начинают самостоятельно «достраивать» недостающие звенья инфраструктуры.

«Физические» и «человеческие» связи находятся в сложном взаимодействии, накладываясь друг на друга, поддерживая друг друга, при этом «человеческие» связи зачастую оказываются более важными, чем «физические».

Научная значимость такого подхода состоит, среди прочего, в том, что на остальной территории России в силу гораздо большей плотности инфраструктуры и населения изучение подобных связей затруднено. Арктическая же зона из-за «разреженности» инфраструктуры представляет собой идеальный случай «социальной лаборатории»; в частности, Север — удобный «полигон» для изучения миграции, поскольку здесь представлены практически все ее виды — от традиционного кочевания и маятниковой трансграничной миграции до вахтовой работы и долгосрочных рабочих переездов.

Новизна подхода состоит в том, что различные типы связей внутри АЗРФ и между АЗРФ и другими регионами обычно изучаются отдельно друг от друга: ранее не предпринималось попыток комплексно проанализировать все виды связей, важных для региона, — трансграничную и международную миграцию, стратегии жизни и передвижений коренных народов, демографию «западного дрейфа» и т. д. Гипотеза исследования состоит в том, что все названные аспекты суть части единого феномена «северной связанности», который необходимо проанализировать с помощью единого языка описания.

Что касается территории, то при таком подходе необходимо охватить максимально широкий спектр, поскольку основная задача — исследование связей как на макроуровне, так и на локальном уровне. На макроуровне необходимо осуществлять анализ связей не только «с точки зрения Севера», но и с противоположной стороны: с точки зрения регионов, куда часто приезжают с Севера или откуда часто уезжают на Север.

Данный подход нацелен, кроме того, на изучение различных форм расселения людей в крупных городах и поселках и на неурбанизированной территории. Предшествующие исследования выявили на Севере феномен мультилокальности

(см. [1, 2 и др.]), при котором люди постоянно перемещаются между различными территориями и обнаруживают привязанность ко многим местам сразу. Поэтому наш подход ориентирован на изучение населения не в рамках административных единиц, а с географической привязкой к их перемещениям, с использованием методологии исследований миграций. Это поможет отследить связи с АЗРФ тех, кто покинул регион, но продолжает ощущать его частью своей жизни.

Предлагаемый подход продолжит разработанную в ходе предшествующих исследований методологию: при анализе населения Севера следует включать в его рамки все категории его жителей — представителей коренных народов, «северных старожилов», «приезжих», вахтовиков, трудовых мигрантов и др., жизненные стратегии и социальное поведение которых анализируются в единой методике, вне зависимости от категории.

Теоретически важным результатом подобного исследования должна стать проверка гипотезы об особой значимости «человеческих связей» для Арктики. Должны быть сопоставлены особенности социальных связей, характерные как для разных территорий, входящих в АЗРФ, так и для различных социальных групп населения, проживающих там. Это позволит лучше понять, как устроена «карта связанности» АЗРФ, как именно и с какими регионами связаны разные территории Арктической зоны; это позволит, кроме того, выявить структуру и механизмы действия этих связей, соединяющих северные регионы между собой и с другими регионами страны. Такой подход позволит преодолеть излишнюю фрагментарность научного знания о Севере и внесет вклад в создание более целостного представления о социальном устройстве современной Российской Арктики.

Практическая значимость исследований, проведенных с использованием описанной методологии, состоит в обеспечении устойчивого развития АЗРФ. Чтобы управлять северными территориями, отвечать на вызовы оттока населения из стратегически значимых регионов и планировать их заселение, необходимо понимать, как устроена связанность, какие ее аспекты могут быть использованы при демографическом планировании и государственном управлении, что удерживает людей в регионе и чего им там не хватает. Весь наш предшествующий опыт говорит о том, что подобные символические аспекты жизни в Арктике оказывают на поведение людей значительно большее влияние, чем прямые экономические факторы.

АЗРФ И МИГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Центральным для данного исследования является движение населения, то есть широко понимаемый миграционный аспект. Первыми на миграционные процессы в АЗРФ (и шире — в северных регионах) обратили внимание демографы. С миграционной точки зрения население Севера очень подвижно: значительная доля современных жителей Севера родилась за пределами регионов, в которых они проживают [3: 149–158]. Демографы зафиксировали и долгосрочный процесс оттока постоянного населения с Севера и Востока нашей страны в центральные регионы (так наз. «Западный дрейф»). Этот процесс пока не закончился [4]. С другой стороны, те же демографы, опираясь на данные статистики, показывают, что сегодня северные регионы далеко не однородны с точки зрения миграции: среди них есть как регионы, устойчиво теряющие населения, так и такие, которые служат центрами притяжения для трудовой миграции. Исследователи обратили внимание и на то, что иногда в структуре миграций можно выделить своего рода связанные, или «парные»,

регионы, которые в течение довольно долгого времени объединены устойчивыми экономическими, культурными и миграционными связями [5].

Для нашего подхода центральным является вопрос о связанности северных регионов между собой и с более южными, а также инфраструктурных элементов с мотивациями людей. Исследования инфраструктуры фокусируются на сложных и разнородных системах, обеспечивающих передвижение товаров, людей, вещей, денег и др. [6]. Инфраструктуры включают коммунальные сети и интернет, воздушные, водные и сухопутные транспортные системы, социальные институты и — менее очевидные — человеческие инфраструктуры, «сложные сочетания объектов, пространства, людей и практик... которые поддерживают и воспроизводят жизнь» [7]. Исследования инфраструктур обычно демонстрируют, как появление или исчезновение инфраструктуры влияет на конфигурацию социального взаимодействия [6]. В более широком смысле исследования инфраструктуры лежат в русле дисциплины, получившей название «исследования науки и технологий» (science and technology studies, STS), а также в рамках классического подхода Мишеля Фуко, трактующего любые отношения как властные, реализуемые разными акторами на всех уровнях социальной системы [8, 9, 10, 11].

Поиск миграционных мотиваций в области «дефицита инфраструктурных возможностей» региона, теряющего население, и привлекательных инфраструктурных условий «принимающего» региона лежит в русле классической «push and pull theory», которая объясняет миграцию (в основном в развитые страны) экономическими причинами. Обоснование миграционных стратегий через калькуляцию силы воздействия на сообщество и отдельных его представителей механизмов выталкивания — притяжения (затрат или выгод переезда) характерен для экономической парадигмы исследования этого феномена — см. [12, 13], ср. [14, 15].

Для городов АЗРФ одним из важных, хотя и не единственным «инфраструктурным дефицитом» является неразвитость инфраструктуры послешкольного образования; недостатки поселковой инфраструктуры (такие, как низкий уровень медицины или неразвитость сферы досуга) также формируют жизненные стратегии населения. Немецкий антрополог О. Хабек утверждает, что актуальная для региона «экономическая, политическая и дискурсивная гегемония города над сельской местностью» продолжает определять представления о «нормальной жизни» [16: 200]: именно опыт жизни в городе образует тот идеал, по сравнению с которым оценивается и критикуется поселок, в том числе северный. Поэтому один из основных векторов миграции — миграция типа «село – город», которая определяется необходимостью получения образования [16: 199–200, 17: 37]. В этой связи стоит упомянуть и недавнюю книгу М. Ларюэль [18]. Мобильность здесь понимается широко: как перемещение не только в географическом, но и в социальном смысле. Представленные в книге примеры показывают тесную связь «северной» миграции с изменением социального статуса у разных групп людей, выделенных по географическому, профессиональному или этническому признаку. Эта книга позволяет увидеть пеструю картину передвижений на просторах почти всего российского Севера, за исключением его самых восточных регионов; однако регионы-доноры (за исключением Республики Дагестан в последней главе) в книге не рассматриваются; не ставится здесь и задача систематического сравнения ситуаций в разных регионах, взгляда на существующее положение дел из обеих географических точек, соединяемых миграциями.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ

Одним из основных трендов в исследованиях мобильности последних лет стал отказ от рассмотрения миграций как однонаправленного процесса перемещения из начальной точки в конечную [19, 20]. Все больше исследователей склоняются к «транснациональному подходу» и приходят к выводу о том, что принимающая и отправляющая территория — скорее «сообщающиеся сосуды» [21], движение между которыми происходит в обе стороны. Сторонники такого подхода подчеркивают важность в современном обществе, с его уровнем развития транспорта и средств коммуникации, изучения социальных, политических и экономических связей между локальностями [19, 22, 23].

Важным этапом в развитии этого подхода стало понятие транслокальности [24], позволившее исследовать не только миграции между странами, но и внутри страны и показывать, каким образом транснациональные мигранты формируют социальные связи и поддерживают отношения одновременно в двух странах или в двух регионах одной страны [20, 25].

Транслокальный подход представляется подходящим инструментом для анализа северных трудовых миграций, так как в большинстве рассматриваемых случаев пересечения государственной границы не происходит, да и сложно обнаружить принципиальную разницу в механизмах миграции с пересечением государственной границы и без него.

Следующее важное понятие — «инфраструктура миграции»: термин, впервые использованный Бяо Сяном и Йоханом Линдквистом для описания сложной взаимосвязи людей, государственных и негосударственных институций и акторов, формирующих возможности и условия для рабочей мобильности в Китае и Индонезии. Они выделяют несколько аспектов инфраструктуры миграции: 1) коммерческий — рекрутинговые фирмы-посредники, 2) регуляционный — государственный аппарат и процедуры выдачи документов, 3) технологический — транспорт и коммуникация, 4) гуманитарный — НКО и некоммерческие организации, 5) социальный — сети мигрантов [26]. Авторы фокусируют свое внимание скорее на институциональной стороне вопроса, считая, что именно она не проблематизируется и поэтому требует нового подхода.

При международных миграциях институциональный и политический уровень представлены большим числом инфраструктурных «звеньев», в случае миграции внутри государства этот аспект оказывается более сжатым. Среди его звеньев можно назвать агентства недвижимости, программы переселения из северных регионов, институт постоянной и временной регистрации, а также центры занятости и отделы рекрутинга в промышленных компаниях на северных территориях в случае входящей миграции. Подход, который предлагается здесь, сфокусирован на социальном аспекте инфраструктуры миграций: каким образом связи между людьми (поддерживающиеся из года в год на огромных расстояниях) структурируют пути миграции населения с Севера «на материк» и обратно. В этом смысле употребление нами термина «инфраструктура миграций» оказывается ближе к «инфраструктуре людей» А. Симоне, нежели к пониманию этого термина Сяном и Линдквистом.

Н.Ю. Замятина и А.В. Пилясов прослеживают устойчивые миграционные связи между тем или иным городом на Севере и городом в более южных регионах России [27]; здесь детерминированность взаимодействий концептуализируется не

физическим расстоянием, а социальными и институциональными причинами с помощью термина «социальное расстояние» (или «социальная доступность», англ. *proximity*) [28]. Это дополняет и видоизменяет традицию индустриальной географии, в рамках которой объектом «социального расстояния» обычно выступают организации [29, 30, 31]. Представляется, что, анализируя «социальное расстояние» и «инфраструктуру миграций» и фокусируясь на качественных различиях связей, можно более объемно раскрыть суть понятия социальной близости.

Релевантной для данного подхода представляется и концепция распределенного образа жизни, предложенная С.Г. Кордонским [32], обращающим внимание на широко распространенный в России феномен проживания в нескольких локальностях. Распределенный образ жизни отличается от концептов *транснационализм* и *транслокальность* тем, что внимание здесь обращено не на трансграничные или удаленные миграции, а на повторяющиеся переезды и проживание в нескольких домах или квартирах индивидов и целых семей в рамках одного общества. В этом подходе изучаются социально-экономические аспекты распределенного образа жизни. Особенность северных регионов состоит в том, что у многих семей есть несколько «баз» — квартир, домов — в других, часто значительно удаленных регионах, в которых ежегодно проводят отпуск, куда отправляют детей на отдых, где живут обучающиеся в учебных заведениях выросшие дети. Жизнь северян часто распределяется не между двумя, а между тремя-четырьмя локальностями, разбросанными по территории страны, а иногда и за ее пределами. Расположение этих «баз» зависит главным образом от конфигурации социальных сетей каждой семьи.

Следует упомянуть в этой связи и недавно опубликованную монографию Арктического совета по проекту «Действия по адаптации для меняющейся Арктики» [33]. Проект проводился под эгидой Программы арктического мониторинга и оценки с целью способствовать своевременным и оперативным мерам и принятию решений в условиях быстро меняющейся Арктики. В Главе 8 монографии показано значение глобальной связанности в процессе жизнеспособного (*resilient*) развития Арктики (на примере Баренц-региона) и, что важно для настоящего проекта, подтверждена необходимость выявления и апробации показателей для мониторинга жизнеспособного и устойчивого развития Арктики.

Как представляется, комбинация предложенных концепций может стать основой для выработки подхода, позволяющего описать существующие социальные связи как внутри АЗРФ, так и между АЗРФ и другими регионами, лучше понять природу этих связей и оценить их значение для устойчивого развития региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планируемый проект тематически и методологически продолжает исследование, проведенное Центром в 2014–2016 гг. по гранту РНФ (№ 14-18-02136) в рамках проекта «“Дети девяностых” в современной Российской Арктике: оценка настоящего и желаемое будущее», в ходе которых была отработана методика исследования и собраны сравнимые данные по 27 населенным пунктам Арктической зоны РФ¹.

¹ Основные результаты проекта № 14-18-02136 опубликованы — см. журнал *Sibirica* (2017.V. 16. № 3); этот тематический выпуск журнала озаглавлен *Mobility and Infrastructure* и посвящен описанию результатов проекта: здесь — статьи Н. Вахтина, А. Болотовой, В. Васильевой, К. Гавриловой, А. Карасевой, Е. Лярской.

Он концентрируется на исследовании северян, меняющих место жительства как внутри арктических регионов, так и переезжающих постоянно или временно в более южные районы. Необходимо использовать уже проверенные социально-антропологические методы для исследования жизненных стратегий людей — представителей как коренного, так и некоренного населения Севера. В результате будут получены данные о реальных мотивациях северян в выборе жизненного пути, что позволит, оставаясь в рамках качественных методик, повысить точность прогнозирования поведения жителей Севера в условиях роста значения Арктики как промышленного и транспортного региона.

Благодарности. Статья написана в рамках проекта «Арктические связи: люди и инфраструктуры» (грант РФФИ № 18-05-60108), конкурс РФФИ «Фундаментальные проблемы изучения и освоения Российской Арктики: природная и социальная среда». Исследование, описанное в статье, в настоящее время ведется коллективом Центра социальных исследований Севера Европейского университета в Санкт-Петербурге. В подготовке заявки на проект, кроме авторов статьи, участвовали В.В. Васильева, К.А. Гаврилова, Н.Ю. Замятина, К.В. Истомина, Е.Л. Капустина и А.И. Карасева.

Acknowledgements. The article is written as part of the project № 18-05-60108 which won the grant of the Russian Foundation for Fundamental Research (“Fundamental Problems of Arctic Research: Natural and social environment”). The research described in the article is currently being done by the Center of Arctic Social Studies, European University at St. Petersburg. The grant application was written, besides the authors of the article, by K. Gavrilova, K. Istomin, E. Kapustina, A. Karaseva, V. Vasilieva and N. Zamiatina.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйльмштейнер-Саксингер Г.* Вахтовый метод: социально-антропологическое исследование на Крайнем Севере России // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. Тюмень. 2014. № 4. С. 24–26.
2. *Силин А.Н.* Мультилокальность образа жизни: опыт социологических исследований // Общество и социология в современной России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Вологда, 2015. С. 41–44.
3. Социально-демографический портрет России: По итогам Всероссийской переписи населения 2010 года / Федеральная служба государственной статистики. М.: ИИЦ «Статистика России», 2012. 183 с.
4. *Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В., Абылкаликов С.И.* Внутрироссийская миграция населения. Глава 7 // Население России 2015: двадцать третий ежегодный демографический доклад / Отв. ред.: С.В. Захаров. М.: Издательский дом НИУ ВШЭ, 2017. С. 309–332.
5. *Heleniak T.E.* The role of attachment to place in migration decisions of the population of the Russian North // *Polar Geography*. 2009. V. 32 (1–2). P. 31–60.
6. *Larkin B.* The politics and poetics of infrastructure // *Annual Review of Anthropology*. 2013. V. 42. P. 327–343.
7. *Simone A.* People as infrastructure: intersecting fragments in Johannesburg // *Public culture*. 2004. V. 16 (3). P. 407–429.
8. *Law J., Hassard J.* Actor Network Theory and After. Oxford. Blackwell Publishers, 1999. 264 p.

9. *Latour B.* Reassembling the Social: an Introduction to Actor-Network-Theory. Oxford; New York: Oxford University Press, 2007. 301 p.
10. *Алапура Р., Бычкова О., Хархордин О.* Инфраструктура свободы: общие вещи и Res Publica. СПб: Изд-во Европейского университета, 2012. 352 с.
11. *Фуко М.* Правительственность (идея государственного интереса и ее генезис) // Логос. 2003. № 4–5 (39). С. 4–22.
12. *Gavrilova K.A.* Temporal dimension of attitudes toward infrastructure and opportunities for relocation from the northern town: The case of Kamchatskii Krai // Sibirica. 2017. V. 16 (3). P. 35–56.
13. *Gavrilova K., Vakhtin N., Vasilyeva V.* Anthropology of the Northern Sea Route: Introducing the Topic // The Polar Journal. 2017. V. 7 (1). P. 46–57.
14. Migration Theory: Talking across discipline / C.B. Brettell and J.F. Hollifield (Eds.). New York and London: Routledge, Taylor & Francis Group, 2000. 239 p.
15. *Saxinger G.* Unterwegs: Mobiles Leben in der Erdgas- und Erdölindustrie in Russlands Arktis. Vienna: Böhlau, 2016. 227 p.
16. *Habeck J.O.* Does life makes more sense now? Young people's life projects and the new feeling of stability in Russia // Folklore: Electronic journal of folklore. 2009. V. 41. P. 189–206. URL: <https://www.folklore.ee/folklore/vol41/habeck.pdf> (дата обращения 29.08.2019)
17. *Glendinning A., Pak O., Popkov Y.V.* Youth, community life and well-being in rural areas of Siberia // Sibirica. 2004. V. 4. № 1. P. 31–48.
18. *Laruelle M.* (ed.) New mobilities and social changes in Russia's Arctic regions. Routledge, 2017. 216 p.
19. *Levitt P., Jaworsky B.N.* Transnational migration studies: past developments and future trends // Annual Review of Sociology. 2007. V. 33. P. 129–156.
20. *Greiner C., Sakdarpolak P.* Translocality: Concepts, applications and emerging research perspectives // Geography Compass. 2013. V. 7 (5). P. 373–384.
21. *Замятина Н.Ю., Пилясов А.Н.* Концепция близости: зарубежный опыт и перспективы применения в России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 3. С. 8–21.
22. *Schiller N. G., Basch L., Blanc-Szanton C.* Transnationalism: A new analytic framework for understanding migration // Annals of the New York Academy of Sciences. 1992. V. 645 (1). P. 1–24.
23. *Kearney M.* The local and the global: The anthropology of globalization and transnationalism // Annual Review of Anthropology. 1995. V. 24. P. 547–565.
24. *Appadurai A.* The Production of Locality // Richard Fardon (ed.): Counterworks. Managing the Diversity of Knowledge. London: Routledge, 1995. P. 204–225.
25. *Кайзер М., Бредникова О.* Транснационализм и транслокальность (комментарии к терминологии) // Миграция и национальное государство / Под ред. Т. Бараулиной и О. Карпенко. СПб.: ЦНСИ, 2004. С. 133–146.
26. *Xiang B., Lindquist J.* Migration infrastructure // International Migration Review. 2014. V. 48 (1). P. 122–148.
27. *Замятина Н.Ю., Пилясов А.Н.* Север, социальные сети и «диаспора наоборот» // Демоскоп. 2013. № 547–548. URL: <http://demoscope.ru/weekly/2013/0547/analit07.php>. (дата обращения 27.11.2016).
28. *Замятина Н.Ю.* Социальная лесотундра: географическая подвижность как элемент семейных траекторий жителей северных городов (на примере Норильска и Дудинки) // Не-прикосновенный запас. 2014. № 5 (97). URL: <http://magazines.russ.ru/nz/2014/97/15z.html> (дата обращения 12.07.2019).
29. *Torre A.* On the Role Played by Temporary Geographical Proximity in Knowledge Transfer // Regional Studies. 2008. V. 42 (6). P. 869–889.

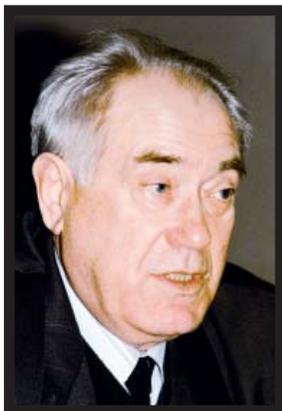
30. Torre A., Wallet F. eds. Regional development and proximity relations. Edward Elgar Publishing, 2014. 392 p.
31. Boschma R. Proximity and innovation: a critical assessment // Regional studies. 2005. V. 39 (1). P. 61–74.
32. Кордонский С. «В реальности» и «на самом деле» // Логос. 2000. Т. 26 (5/6). С. 53–64.
33. Carson M., Sommerkorn M., Vlasova T. A resilience approach to adaptation actions // Adaptation actions for a changing Arctic: perspectives from the Barents area. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Chapter 8. Oslo, Norway, 2017. P. 195–217.

REFERENCES

1. Elmsteiner-Saxinger G. Shift work: socio-anthropological study in the far north of Russia. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Sotsiologiya. Ekonomika. Politika*. News from Higher Educational Institutions. Sociology. Economics. Politics. 2014, 4: 24–26. [In Russian].
2. Silin A.N. *Mul'tilokal'nost' obraza zhizni: opyt sotsiologicheskikh issledovaniy. Obschestvo o sotsiologii v sovremennoi Rossii*. Multilocality of lifestyle: the experience of sociological research. The society about sociology in modern Russia. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Proceedings of the All-Russian Conference. Vologda, 2015: 41–44. [In Russian].
3. *Sotsialno-demograficheskii portret Rossii: po itogam Vserossiiskoi perepisi naseleniia 2010 goda. Federanlnaia sluzhba gosudarstvennoi statistiki*. Socio-demographic portrait of Russia: According to the results of the 2010 All-Russian Population Census. Federal State Statistics Service. M.: Statistics of Russia, 2012: 183 p. [In Russian].
4. Karachurina L.B., Mkrtchan N.V., Abylkalikov S.I. *Vnutrirossiiskaia migratsiia naseleniia. Glava 7. Naselenie Rossii 2015: dvadtsat' tretii ezhгодnyi demograficheskii doklad*. Domestic Russian population migration. Chapter 7. The population of Russia 2015: twenty-third annual demographic report. Ed. S.V. Zakharov. M.: NIU VShE, 2017: 309–332.
5. Heleniak T.E. The role of attachment to place in migration decisions of the population of the Russian North. *Polar Geography*. 2009, 32 (1–2): 31–60.
6. Larkin B. The politics and poetics of infrastructure. *Annual Review of Anthropology*. 2013, 42: 327–343.
7. Simone A. People as infrastructure: intersecting fragments in Johannesburg. *Public culture*. 2004, 16 (3): 407–429.
8. Law J., Hassard J. *Actor Network Theory and After*. Oxford: Blackwell Publishers, 1999: 264 p.
9. Latour B. *Reassembling the Social: an introduction to Actor-Network-Theory*. Oxford; New York: Oxford University Press, 2007: 301 p.
10. Alapuro R., Bychkova O., Kharkhordin O. *Infrastruktura svobody: obschie veschi i Res Publica*. Infrastructure of freedom: common things and Res Public. St. Petersburg: European University, 2012: 352 p. [In Russian].
11. Foucault M. Governmentality (the idea of state interest and its genesis). *Logos*. 2003, 4–5 (39): 4–22. [In Russian].
12. Gavrilova K.A. Temporal dimension of attitudes toward infrastructure and opportunities for relocation from the northern town: the case of Kamchatskii Krai. *Sibirica*. 2017, 16 (3): 35–56.
13. Gavrilova K., Vakhtin N., Vasilyeva V. Anthropology of the Northern Sea Route: introducing the topic. *The Polar Journal*. 2017. 7 (1): 46–57.
14. *Migration Theory: Talking across discipline*. C.B. Brettell and J.F. Hollifield (Eds.). New York and London: Routledge, Taylor & Francis Group, 2000: 239 p.
15. Saxinger G. *Unterwegs: Mobiles Leben in der Erdgas- und Erdölindustrie in Russlands Arktis*. Vienna: Böhlau, 2016: 227 p.

16. *Habeck J.O.* Does life makes more sense now? Young people's life projects and the new feeling of stability in Russia. *Folklore: Electronic journal of folklore*. 2009, 41: 189–206. Available at: <https://www.folklore.ee/folklore/vol41/habeck.pdf> (accessed 29.08.2019).
17. *Glendinning A., Pak O., Popkov Y.V.* Youth, community life and well-being in rural areas of Siberia. *Sibirica*. 2004, 4 (1): 31–48.
18. *Laruelle M.*(ed.) *New mobilities and social changes in Russia's Arctic regions*. Routledge, 2017: 216 p.
19. *Levitt P., Jaworsky B.N.* Transnational migration studies: past developments and future trends. *Annual Review of Sociology*. 2007, 33: 129–156.
20. *Greiner C., Sakdarpolak P.* Translocality: concepts, applications and emerging research perspectives. *Geography Compass*. 2013, 7 (5): 373–384.
21. *Zamyatina N.Yu., Pilyasov A.N.* Concept of proximity: Foreign experience and prospects of application in Russia. *Regional Research in Russia*. 2017, 7 (3): 197–207.
22. *Schiller N.G., Basch L., Blanc-Szanton C.* Transnationalism: A new analytic framework for understanding migration. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1992, 645 (1): 1–24.
23. *Kearney M.* The local and the global: The anthropology of globalization and transnationalism. *Annual Review of Anthropology*. 1995, 24: 547–565.
24. *Appadurai A.* The production of locality. Richard Fardon (ed.): *Counterworks. Managing the Diversity of Knowledge*. London: Routledge, 1995: 204–225.
25. *Kaizer M., Brednikova O.* *Transnatsionalizm i translokálnost' (kommentarii k terminologii). Migratsiia i natsional'noe gosudarstvo*. Transnationalism and translocality (comments on terminology). Migration and national state. Eds. T. Baraulinoi i O. Karpenko. St. Petersburg: TsNSI, 2004: 133–146. [In Russian].
26. *Xiang B., Lindquist J.* Migration infrastructure. *International Migration Review*. 2014, 48 (1): 122–148.
27. *Zamyatina N.Yu., Pilyasov A.N.* *Sever, sotsialnye seti i 'diaspora naoborot'*. North, social networks and the diaspora on the contrary. *Demoskop*. 2013, 547–548. Available at: <http://demoscope.ru/weekly/2013/0547/analit07.php> (accessed 27.11.2016). [In Russian].
28. *Zamiatina N.Yu.* *Sotsialnaia lesotundra: geograficheskaiia podvizhnost' kak element semeinykh traektorii zhitelei severnykh gorodov (na primere Nokolska i Dudinki)*. Social forest tundra: geographical mobility as an element of family trajectories of residents of northern cities (on the example of Norilsk and Dudinka). *Neprikosnovennyi zapas*. 2014, 97 (5). Available at: <http://magazines.russ.ru/nz/2014/97/15z.html> (accessed 12.07.2019). [In Russian].
29. *Torre A.* On the role played by temporary geographical proximity in knowledge transfer. *Regional Studies*. 2008, 42 (6): 869–889.
30. *Torre A. Waller F. eds.* *Regional development and proximity relations*. Edward Elgar Publishing, 2014: 392 p.
31. *Boschma R.* Proximity and innovation: a critical assessment. *Regional studies*. 2005, 39 (1): 61–74.
32. *Kordonskii S.* In reality and really. *Logos*. 2000, 26 (5/6): 53–64. [In Russian].
33. *Carson M., Sommerkorn M., Vlasova T.* A resilience approach to adaptation actions. *Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Barents Area*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Chapter 8. Oslo, Norway, 2017: 195–217.

ПАМЯТИ БОРИСА ИВАНОВИЧА ИМЕРЕКОВА



Борис Иванович Имерекров, наш коллега, известный полярный исследователь, кандидат географических наук, почетный полярник, деятельность которого неразрывно была связана с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) и с российскими полярными исследованиями, ушел из жизни в июле 2019 г.

Борис Иванович родился и вырос в Алтайском крае. После окончания Ленинградского Высшего морского арктического училища им. Макарова по специальности «Океанология» успешно работал на архипелаге Шпицберген.

В 1957 г. он был приглашен на должность начальника станции Оазис в Третью континентальную антарктическую экспедицию. Зимовка на станции Оазис в оазисе Бангера для шести зимовавших полярников выдалась крайне тяжелой. В условиях полярной ночи, при ураганных ветрах свыше 40 м/с удалось не

только проводить научные наблюдения по метеорологии, аэрологии, сейсмике, но и начать новые наблюдения за содержанием озона в атмосфере и визуальные наблюдения за полярными сияниями через каждые 30 минут. В конце зимовки коллектив станции, возглавляемый Борисом Ивановичем, подготовил все научные павильоны для консервации и передачи станции Польской академии наук для продолжения научных исследований.

В 1973 г. Борис Иванович возглавил коллектив зимнего сезона на станции Беллинсгаузен (19-я САЭ). В эту вторую свою антарктическую зимовку он активно изучал гидрологический режим озер о. Кинг Джордж.

После перехода на работу в Государственный Комитет по науке и технике (ГКНТ СССР) Борис Иванович возглавил один из отделов в Министерстве науки и техники.

Все годы Борис Иванович поддерживал тесную дружескую связь с АНИИ. Благодаря его содействию институт достроил в 1980-е гг. новое здание на ул. Беринга, а в 90-е — получил статус Государственного научного центра РФ.

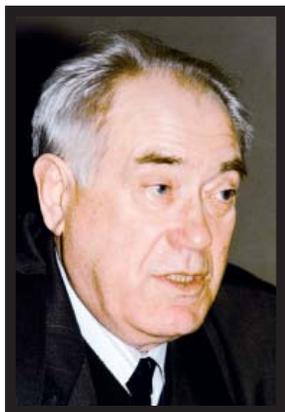
Неоценимый вклад Борис Иванович внес в международное сотрудничество в области полярных исследований, в частности в российско-германское партнерство. Он был одним из инициаторов создания в АНИИ российско-германской лаборатории морских и полярных исследований имени Отто Юльевича Шмидта (ОШЛ), официальное открытие которой состоялось 9 октября 2000 г. Его большой научный и организационный опыт полярного исследователя способствовал развитию актуальных направлений совместных научных исследований в полярных областях, а также организации стипендиальной программы поддержки молодых ученых в этой российско-германской лаборатории.

Долгое время Борис Иванович курировал Подпрограмму «Комплексные исследования океанов и морей, Арктики и Антарктики» Целевой программы «Мировой океан», одну из основных глобальных программ российских полярных исследований.

Старшее поколение полярников знало Бориса Ивановича Имерекорова как человека большого трудолюбия, исключительной скромности и исключительно внимательного отношения к людям, уважали его за принципиальность и доброжелательность ко всем. Таким он и останется в нашей памяти.

И.Е. Фролов, Л.А. Тимохов, С.М. Прямиков, Й. Тиде

IN MEMORY OF BORIS I. IMEREKOV



Boris I. Imerekov, our colleague, a well-known polar researcher, an honorary polar explorer, whose activities were inextricably linked with the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) and with the Russian polar research, passed away in July 2019.

Boris was born and raised in the Altai region. After graduating from the Leningrad Admiral Makarov Higher Marine Arctic School, specializing in Oceanology, he successfully worked in his specialty in the Svalbard archipelago.

In 1957, he was invited to be a chief of the Oasis station during the Third Continental Antarctic Expedition. For six wintering polar explorers that season at the station in the Bunger Oasis (Bunger Hills) turned out to be extremely difficult. In the polar night with hurricane winds reaching over 40 m/s, they were possible not only to conduct scientific observations in meteorology, aerology, seismic, but also to begin new observations on the ozone content in the atmosphere and visual observations of auroras every 30 minutes. At the end of the wintering, the team headed by Boris, prepared all the scientific pavilions for the conservation and transfer of the station to the Polish Academy of Sciences to continue scientific research. In 1973, Boris led the wintering team at the Bellingshausen station (19th SAE). In this his second Antarctic wintering, he actively studied the hydrological regime of the King George Island lakes.

After joining the State Committee for Science and Technology (USSR), Boris headed one of the departments in the Ministry of Science and Technology. All these years, Boris maintained a close and friendly relationship with the AARI. Thanks to his input, the Institute completed the construction of a new building on the Bering Street, and in the 90s received the status of the State Scientific Center of the Russian Federation.

Boris made an invaluable contribution to international cooperation in the field of polar research, in particular, to the Russian-German partnership. He was one of the initiators of the creation of the joint Russian-German Otto Schmidt laboratory for polar and marine research (OSL), the official opening of which took place on October 9, 2000. His great scientific and organizational experience of the polar researcher contributed to the development of relevant areas of joint research in polar areas, as well as the organization of a scholarship program to support young scientists in this joint Russian-German laboratory.

For a long time, Boris oversaw the Subprogram “Integrated Research of Oceans and Seas, the Arctic and Antarctic” of the Federal Targeted Program “World Ocean”, one of the main global programs of Russian polar research.

The older generation of polar explorers knew well the hallmarks of Boris – great industriousness, exceptional modesty and an exceptionally attentive attitude towards people, and respected him for his integrity and goodwill towards everyone. So he will remain in our memory. His enthusiastic presence will be missed by all who knew him and had the pleasure and honor to work with him.

I.E. Frolov, L.A. Timokhov, S.M. Priamikov, J. Tide

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

Журнал рассматривает для публикации научные статьи по основным направлениям исследований в полярных областях Земли: океанологии, физике атмосферы и гидросферы, метеорологии и климатологии, гидрологии суши и гидрохимии, гляциологии и криологии, геоморфологии и эволюционной географии, ледотехнике, геологии и геофизике. Также представляют интерес работы по экологии, биоценологии и биогеографии, социальной географии и социальной антропологии, исследующих изменения в полярных регионах.

В издании публикуются новые результаты научных исследований, а также научные сообщения теоретического, методического, экспериментального и прикладного характера, тематические обзоры (по заказу редакции), критические статьи, очерки по истории полярных исследований и краткие сообщения, посвященные памятным датам (по заказу редакции). Все статьи проходят двойное анонимное рецензирование.

Тексты статей должны быть на русском или английском языке. Автор(ы) статьи должны подтвердить, что эта статья ранее не была опубликована, а также не представлена для рассмотрения и публикации в другом журнале.

Все материалы представляются в редакцию в электронном виде в сопровождении бумажной версии текста, рисунков (см. требования к рисункам) и файла с полными сведениями об авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), место работы (полный адрес), ученая степень, должность, адрес электронной почты и телефон одного из авторов для связи. Рекомендуемый объем статей — от 8 до 20 страниц текста (через 1,5 интервала), включая таблицы и список литературы; рисунков не более 6. Текст набирается в формате Microsoft Word. Параметры набора: шрифт Times New Roman, кегль 12, интервал 1,5. Страницы в статье нумеруются.

Статьи оформляются следующим образом. Сначала дается УДК; затем на русском языке — название статьи, инициалы и фамилии всех авторов (при указании авторов статьи сначала идут инициалы, затем фамилия. Инициалы и фамилия разделяются пробелом), полное название организации(ций), где выполнена работа; электронный адрес автора, ответственного за связь с редакцией. Затем те же сведения приводятся на английском языке: заглавие, авторы, учреждения, второй раз e-mail главного автора. После этого на английском языке пишутся ключевые слова в соответствии с английским алфавитом (не более 10 слов и не более двух слов в сочетаниях) и авторское Summary статьи на 20–25 строк (здесь же для контроля обязательно прилагается перевод Summary на русский язык).

Ключевые слова должны отражать основное содержание статьи, повторять термины из текста статьи и по возможности не повторять термины заглавия; следует помнить, что эти слова должны облегчить поиск статьи средствами информационно-поисковой системы.

Summary должно быть понятно без обращения к самой публикации как независимый от статьи источник информации. Оно должно отвечать следующим критериям: информативности (не содержать общих слов); содержательности (отражать основное содержание статьи: задачи работы, методы, главные результаты исследований); последовательности изложения. Перевод Summary на английский язык должен быть выполнен качественно, с использованием англоязычной специальной терминологии, не быть дословным переводом русскоязычной версии (при необходимости следует

также включать пояснения для иностранного читателя, связанные со спецификой исследований).

Далее продолжается информация на русском языке: ключевые слова в соответствии с русским алфавитом (не более 10), краткая аннотация (7–10 строк) (без перевода на английский) — и начинается текст статьи.

Для статьи, представляемой на английском языке, требуются: УДК; перевод на русский язык всей информации, которая дается перед началом статьи в журнале. Кроме того, в конце статьи необходимо привести расширенный русский реферат (1–1,5 стр.), а в подписях к рисункам дать их перевод на русский язык.

Основной текст разбивается на разделы. Обычно это введение, постановка проблемы, методика исследований, результаты исследований, обсуждение результатов, заключение (выводы). В конце статьи можно поместить благодарность лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, и необходимо указать источник финансовой поддержки, способствовавший выполнению этой работы (гранты фондов, программы и т.д.). Благодарности и ссылки на гранты или темы даются на русском, а затем на английском языке (Acknowledgments).

Подписи под рисунками даются к каждому рисунку в соответствии с его расположением в тексте: сначала на русском (Рис. 1. Далее подпись), а потом на английском языке (Fig. 1. Figure caption). В подписях необходимо отделять собственно название рисунка от объяснений к нему (экспликация), которые надо давать с новой строки.

Рисунки и фотографии помещают в отдельных файлах: для растровых изображений в растровых форматах JPEG/TIFF/PSD, и в векторных — CDR (версии X6 и старше) или AI (не допускаются рисунки в формате Word). Разрешение растровых изображений в оттенках серого и RGB-цвет должно быть 300 dpi. Все словесные надписи на рисунках даются только на русском языке. Все условные знаки обозначаются цифрами (курсивом) с обязательной расшифровкой в подписуточных подписях, где они также обозначаются курсивом. Цифры можно ставить и на линиях графиков. На графиках все шкалы обязательно подписываются и указывается размерность величин.

Таблицы. Для больших таблиц следует использовать альбомную разметку страницы. Таблицы и графы в них должны иметь заголовки, сокращения слов в таблицах не допускаются. Таблицы набираются, как и текст, в формате Word шрифтом 9 пт. Примечания внутри таблицы не даются. Используются сноски ко всей таблице или отдельным ее показателям.

В тексте следует давать ссылки на все рисунки и таблицы. При первой ссылке — рис. 1, табл. 1; при повторных — см. рис. 1, см. табл. 1. Если в тексте дается одна таблица или один рисунок, то ссылки в тексте приводятся следующим образом: при первой ссылке — (таблица), (рисунок); при повторной ссылке — (см. таблицу), (см. рисунок).

Математические обозначения, символы и простые формулы набираются основным шрифтом статьи, сложные формулы — в программе MathType (или в версиях Word до 2007 года включительно). Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Русские и греческие буквы в формулах и тексте, а также химические элементы набираются прямым шрифтом, латинские буквы — курсивом. Аббревиатуры в тексте, кроме общепринятых, не допускаются.

В списке литературы (под заголовком «Список литературы») ссылки на литературу нумеруются последовательно, в соответствии с порядком их первого упоминания в тексте. Приводятся только опубликованные работы. Ссылки по тексту даются в квадратных скобках на номера списка, через запятую с пробелом: [1, 7, 23–27]. Статья должна содержать ссылки на все работы, приведенные в списке литературы. Обращаем внимание на недопустимость включения в список литературы изданий, выпущенных без ISSN- или ISBN-кодов (этим часто грешат сборники материалов конференций (тезисы или доклады)).

Далее прилагается второй список литературы (References). В списке на латинице строго сохраняются те же последовательность и нумерация источников, что и в «традиционном» списке. Ссылки на иностранные источники приводятся в обоих списках литературы.

Статьи, не соответствующие указанным требованиям, рассматриваться не будут. При работе над рукописью редакция по согласованию с автором вправе ее сократить. Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым передает авторские права на издание этой статьи журналу «Проблемы Арктики и Антарктики/ Arctic and Antarctic Research».

Редакция извещает авторов о возможной выборочной проверке присланных для публикации статей в системе «Антиплагиат».

Редакционная коллегия не вступает в дискуссии с авторами по поводу принимаемых ею решений.

Более полные сведения по оформлению статьи приведены в документе «Требования к оформлению статей, присылаемых в журнал “Проблемы Арктики и Антарктики”». Он размещен на странице журнала по адресу: http://www.aari.ru/misc/publicat/req_pub_aanii_.pdf и обязателен для ознакомления при подготовке материалов статьи.

Подписано в печать 27.10.2019
Формат 70×100 1/16
Тираж 100

Печать цифровая
Печ. л. 7,125
Заказ №

Типография издательства Политехнического университета Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29