

ISSN 0555-2648 (Print)
ISSN 2618-6713 (Online)



Проблемы Арктики и Антарктики

Arctic and Antarctic Research

Том 67
№ 3

2021

No 3
Volume 67



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
THE RUSSIAN FEDERAL SERVICE ON HYDROMETEOROLOGY
AND ENVIRONMENTAL PROTECTION



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

THE STATE SCIENTIFIC CENTER OF THE RUSSIAN FEDERATION
THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Problemy Arktiki i Antarktiki

Том 67, № 3, 2021

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 67, No 3, 2021

Санкт-Петербург
2021
Saint Petersburg

Журнал продолжает основанное в 1937 г. периодическое издание «Проблемы Арктики».
Выходит 4 раза в год. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)
Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН

Префикс DOI: 10.30758



Журнал публикует новые результаты комплексных исследований полярных областей Земли в области океанологии, метеорологии, климатологии, гидрологии, гляциологии, ледоведения, гидрохимии, палеогеографии, биологии и экологии полярных регионов, проблем экономической и социальной безопасности Арктики.

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

**Главный редактор — д-р физ.-мат. наук В.В. Иванов,
Москва, Россия**

Заместители главного редактора:

чл.-корр. РАН **В.Д. Каминский** (Санкт-Петербург, Россия),
канд. геогр. наук **В.Я. Липенков** (Санкт-Петербург, Россия), академик РАН **Г.Г. Матишов** (Ростов-на-Дону, Россия),
д-р физ.-мат. наук **Л.А. Тимохов** (Санкт-Петербург, Россия)

Члены редколлегий:

д-р геогр. наук Г.В. Алексеев (Санкт-Петербург, Россия)	д-р геогр. наук В.Н. Малинин (Санкт-Петербург, Россия)
канд. физ.-мат. наук Л.П. Бобылев (Санкт-Петербург, Россия)	д-р физ.-мат. наук А.П. Макштад (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН Н.Б. Вахтин (Санкт-Петербург, Россия)	проф. А.В. Марченко (Лонгйир, Норвегия)
проф. Т. Вихма (Хельсинки, Финляндия)	д-р геогр. наук Е.У. Миронов (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геогр. наук М.Н. Григорьев (Якутск, Россия)	академик РАН О.Н. Пугачев (Санкт-Петербург, Россия)
д-р биол. наук С.Г. Денисенко (Санкт-Петербург, Россия)	канд. геогр. наук В.Ф. Радионов (Санкт-Петербург, Россия)
д-р Д.В. Дивин (Тромсё, Норвегия)	проф. Д. Райно (Гренобль, Франция)
чл.-корр. РАН С.А. Добролюбов (Москва, Россия)	д-р физ.-мат. наук В.А. Рожков (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук В.М. Катцов (Санкт-Петербург, Россия)	академик РАН В.А. Румянцев (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук Б.В. Козелов (Мурманск, Россия)	д-р техн. наук К.Е. Сазонов (Санкт-Петербург, Россия)
академик РАН В.М. Когляков (Москва, Россия)	д-р техн. наук К.Г. Ставров (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геол.-минерал. наук Г.Л. Лейченко (Санкт-Петербург, Россия)	чл.-корр. РАН А.А. Тишков (Москва, Россия)
проф. М. Леппаранта (Хельсинки, Финляндия)	д-р физ.-мат. наук О.А. Трошичев (Санкт-Петербург, Россия)
канд. техн. наук В.А. Лихоманов (Санкт-Петербург, Россия)	чл.-корр. РАН Н.Н. Филатов (Петрозаводск, Россия)
академик НАН В.Ф. Логинов (Минск, Беларусь)	д-р геогр. наук К.В. Чистяков (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геогр. наук А.С. Макаров (Санкт-Петербург, Россия)	

Ответственный секретарь — канд. биол. наук **И.А. Алехина**

Литературный редактор — **Е.В. Миненко**

Оригинал-макет и подготовка к печати: **А.А. Меркулов**.

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.

Тел. +7(812) 416-4251, e-mail: aaresearch@aari.ru

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

Сайт журнала: <https://www.aaresearch.science>

Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс»

48657 – на полгода

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2021; © Росгидромет, 2021.

The journal continues the series of "Arctic Research", founded in 1937.
Four issues per year. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)
The journal is published under the scientific and methodological guidance of the Earth Sciences Division
of the Russian Academy of Sciences

DOI-prefix: 10.30758



The Journal publishes new findings of studies of the Earth polar regions in oceanology, meteorology, climatology, hydrology, glaciology, hydrochemistry, paleogeography, biology and ecology of the polar regions, and on the problems of economic and social security in the Arctic.

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief – Vladimir V. Ivanov
Dr of Sci. (Physics and mathematics),
Moscow, Russia

Deputy of the Editor-in-Chief:

Valery D. Kaminsky, RAS corr.member, Dr. of Sci. (Geology and mineralogy), St. Petersburg, Russia;
Vladimir Ya. Lipenkov, Cand. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;
Genady G. Matishov, academician, Dr. of Sci. (Geography), Rostov on the Don;
Leonid A. Timokhov, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia.

Members of the editorial board:

Genrikh V. Alekseev , Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia	Alexander P. Makshtas , Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia
Leonid P. Bobylev , Cand. of Sci. (Physics and mathematics) St. Petersburg, Russia	Valery N. Malinin , Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia
Kirill V. Chistyakov , Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia	Alexey V. Marchenko , Dr. of Sci. (Physics and mathematics), Longyearbyen, Norway
Stanislav G. Denisenko , Dr. of Sci. (Biology), St. Petersburg, Russia	Eygeny U. Mironov , Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia
Dmitry V. Divine , Cand. of Sci. (Geography), Tromsø, Norway	Oleg N. Pugachev , academician, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia
Sergey A. Dobrolyubov , RAS corr. member, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia	Vladimir F. Radionov , Cand. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia
Nikolay N. Filatov , RAS corr. member, Dr. of Sci. (Geography), Petrozavodsk, Russia	Dominique Raynaud , Prof. emer., Grenoble, France
Mikhail N. Grigoriev , Dr. of Sci. (Geography), Yakutsk, Russia	Valentin A. Rozhkov , Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia
Vladimir M. Kattsov , Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia	Vladislav A. Rumiantsev , academician, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia
Vladimir M. Kotlyakov , academician, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia	Kirill E. Sazonov , Dr. of Sci. (Technology), St. Petersburg, Russia
Boris V. Kozelov , Dr. of Sci. (Physics and mathematics), Murmansk, Russia	Konstantin G. Stavrov , Dr. of Sci. (Technology), St. Petersburg, Russia
German L. Leitchenkov , Dr. of Sci. (Geology and mineralogy), St. Petersburg, Russia	Arkady A. Tishkov , RAS corr. member, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia
Matti Leppäranta , Ph.D. (Geography), Prof. emer., Helsinki, Finland;	Oleg A. Troshichev , Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia
Vladimir A. Likhomanov , Cand. of Sci. (Technology, P.E.), St. Petersburg, Russia	Nikolay B. Vakhtin , corr. member, Dr. of Sci. (Linguistics); St. Petersburg, Russia
Vladimir F. Loginov , academician, Dr. of Sci. (Geography), Minsk, Belarus	Timo Vihma , Prof., Helsinki, Finland
Alexander S. Makarov , Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia	

Executive Secretary – **Irina A. Alekhina**

Literary Editor – **Elena V. Minenko**

Original layout and preparation for printing: **Alexander A. Merkulov**.

Registration Certificate for the print publishing ИИ № ФС 77-73644 of September 7, 2018.

Registration Certificate for the web publishing ЭИ № ФС 77-73287 of July 20, 2018.

Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

The Journal is licenced and indexed by the Supreme Certification Commission in Moscow (VAK). The Journal publishes papers on the next scientific specialties of the Supreme Certification Commission: 25.00.25, 25.00.27, 25.00.28, 25.00.29, 25.00.30, 25.00.31.

Contacts:

199397 Saint Petersburg, Bering str, 38; phone: +7 (812) 416-4251; e-mail: aaresearch@aari.ru.

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute

<https://www.aaresearch.science>

Subscription index of the journal catalog "Ural-Press" 48657 – for half a year

© SSC RF AARI, 2021; © Roshydromet, 2021.

СОДЕРЖАНИЕ

ОКЕАНОЛОГИЯ

- I.V. Polyakov.* The effect of using local mean versus constant reference salinity to estimate Arctic Ocean freshwater content changes..... 230
- Т.А. Алексеева, С.В. Фролов, В.Е. Федяков, Е.И. Макаров, Е.У. Миронов, Ю.В. Соколова.* Анализ ледовых условий круглогодичного плавания судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря 236

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

- Е.Е. Сибир, В.Ф. Радионов, Е.Н. Русина.* База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ изменения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде 249
- Ю.А. Завгородняя, О.Б. Поповичева, В.О. Кобелев, Д.П. Стародымова, В.П. Шевченко, Н.С. Касимов.* Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Ямало-Ненецкого автономного округа как индикаторы влияния источников техногенных эмиссий 261

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

- Г.В. Суркова, В.А. Романенко.* Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей 280

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

- М.Р. Кузнецова, Г.В. Пряхина, С.Д. Григорьева, Э.Р. Киньябаева.* Факторы формирования поверхностного притока к озерам антарктического оазиса Холмы Ларсеманн 293

CONTENTS

OCEANOLOGY

- I.V. Polyakov*. The effect of using local mean versus constant reference salinity to estimate Arctic Ocean freshwater content changes..... 230
- T.A. Alekseeva, [S.V. Frolov], V.Ye. Fedyakov, E.I. Makarov, E.U. Mironov, Yu.V. Sokolova*. Analysis of ice conditions of year-round navigation of Arc7 vessels in the southwestern part of the Kara Sea 236

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

- E.E. Sibir, V.F. Radionov, E.N. Rusina*. Database of hourly and daily sums of total radiation at Russian antarctic stations: analysis of changes in total radiation for the entire period of observations in Antarctica..... 249
- Yu.A. Zavgorodnyaya, O.B. Popovicheva, V.O. Kobelev, D.P. Starodymova, V.P. Shevchenko, N.S. Kasimov*. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snowpack of Yamal-Nenets Autonomous region as indicators of anthropogenic source influence 261

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

- G.V. Surkova, V.A. Romanenko*. Climate change and heat exchange between atmosphere and ocean in the Arctic based on data from the Barents and the Kara sea 280

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

- M.R. Kuznetsova, G.V. Priakhina, S.D. Grigoreva, E.R. Kiniabaeva*. Formation factors of surface inflow to antarctic lakes of the Larsemann Hills oasis..... 293

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-230-235>
УДК 504.423



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

THE EFFECT OF USING LOCAL MEAN VERSUS CONSTANT
REFERENCE SALINITY TO ESTIMATE ARCTIC OCEAN
FRESHWATER CONTENT CHANGES

IGOR V. POLYAKOV

International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, 930 Koyukuk Drive,
Fairbanks, AK, 99775, USA

ivpolyakov@alaska.edu

Summary

Changes of high-latitude freshwater content (*FWC*) play an important role in shaping the variability of polar oceans. *FWC* is defined as depth-integrated departure of salinity from a reference salinity S_{ref} divided by this S_{ref} . A constant S_{ref} is often used for high-latitude *FWC* estimates. Here it is argued that for analyzing *FWC* spatiotemporal changes the use of *local* mean S_{ref} is a better choice. Analysis of 2007 *FWC* anomalies in the 25–75 m layer demonstrated, for example, that the choice of $S_{ref} = 34.8$ (which is often used in climate studies) leads to *FWC* spatial anomalies exaggerated, on average, by ~ 0.6 m, which is a substantial fraction of total spatial *FWC* changes. The problem is aggravated in areas where the difference between the local S_{ref} and $S_{ref} = 34.8$ is greater. Thus, it is concluded that using climatological mean salinities as S_{ref} provides superior estimates of spatiotemporal Arctic Ocean *FWC* changes.

Keywords: Arctic Ocean, freshwater content, reference salinity.

For Citation: Polyakov I.V. The effect of using local mean versus constant reference salinity to estimate Arctic Ocean freshwater content changes. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 230–235. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-230-235>

Received 13.07.2021

Revised 20.08.2021

Accepted 23.08.2021

INTRODUCTION

High-latitude regions play a special role in shaping variability in sub-polar oceans through regulating convection in the Labrador and Greenland seas via freshwater exchanges [e. g. 1, 2]. Hence, Arctic Ocean freshwater content (*FWC*) variations are of primary importance for detection and attribution of regional and global climate change. Several studies have addressed questions related to changes in the *FWC* of the Polar Basin [e. g. 3–12].

The total *FWC* stored in a water column is usually computed as

$$FWC = \int_{z_1}^{z_2} \frac{S - S_{ref}}{S_{ref}} dz, \quad (1)$$

where S is salinity, S_{ref} is reference salinity, and z_1 and z_2 are the upper and lower boundaries of the water layer for which FWC is calculated. With this formulation, FWC is equivalent to the freshwater column (m) required to adjust water salinity to S_{ref} ; and negative FWC anomalies are associated with fresher ocean. FWC is often computed relative to a constant S_{ref} . For example, for the Arctic Ocean Aagaard and Carmack [3] used $S_{ref} = 34.8$, which may be found at ~200–250 m in the Eurasian Basin and down to 350m and deeper in the Canada Basin. $S_{ref} = 35.2$ was used by Dickson et al. [13] as the salinity of inflowing intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean. For discussion in depth of the choice of various definitions for S_{ref} see Carmack et al. [9]. Aagaard and Carmack [3] were arguably the first who used different reference salinities to calculate FWC budgets for different high-latitude regions. This approach has been adopted in recent studies in which local climatological mean salinities were used in analyses of long-term FWC changes of the North Atlantic Ocean [14] and Arctic Ocean [10].

The goal of this note is to demonstrate potential problems which may arise from using a constant S_{ref} to analyze changes of the Arctic Ocean FWC .

DATA AND METHODS

The analysis area comprises the Arctic Ocean together with its Siberian marginal seas (Kara, Laptev, East Siberian, and Chukchi). We employed extensive observational data collected during the International Polar Year in 2007. This data set consists of 3452 temperature and salinity profiles measured using Conductivity-Temperature-Depth (CTD) instruments. Typical measurement errors are 0.003–0.005 °C for temperature and 0.003–0.005 psu salinity and vertical resolution of observations is ~1–2 m or even better. This data set includes summer ship-based observations and annual drifting buoy observations; for consistency, only summer observations were used in this analysis.

Observations from the 1970s were used to calculate local decadal-mean salinities, applied as the local climatological mean S_{ref} for estimates of FWC . These historical observations were obtained from Nansen bottle water samples and discrete temperature measurements. Although the accuracy of these data is at least an order of magnitude worse than that of the CTD measurements and the data have rather coarse vertical resolution, they span a reasonable horizontal extent; seven repeated 1973–1979 surveys totaling 775 oceanographic stations make these data an invaluable resource of information about the decadal-mean water-mass structure within the Arctic Ocean. These data were interpolated onto a spherical spatial grid with 0.2° step along both latitude and longitude following the method of Polyakov and Timokhov [15] (Fig. 1a).

For each Arctic Ocean location with available 2007 CTD profiles, FWC was estimated by integrating S and (in case of spatially variable) S_{ref} over a constant-depth (z) layer of 25–75 m (thus avoiding the generally noisy data from the upper 25 m ocean and reducing the effects of the seasonal signal). S_{ref} was found by searching for the nearest grid node with a mean climatological S , which was not further than ~11km. Displacement of isopycnal surfaces strongly impacts estimates of FWC anomalies [10]; however, for simplicity we used z -based estimates in this study.

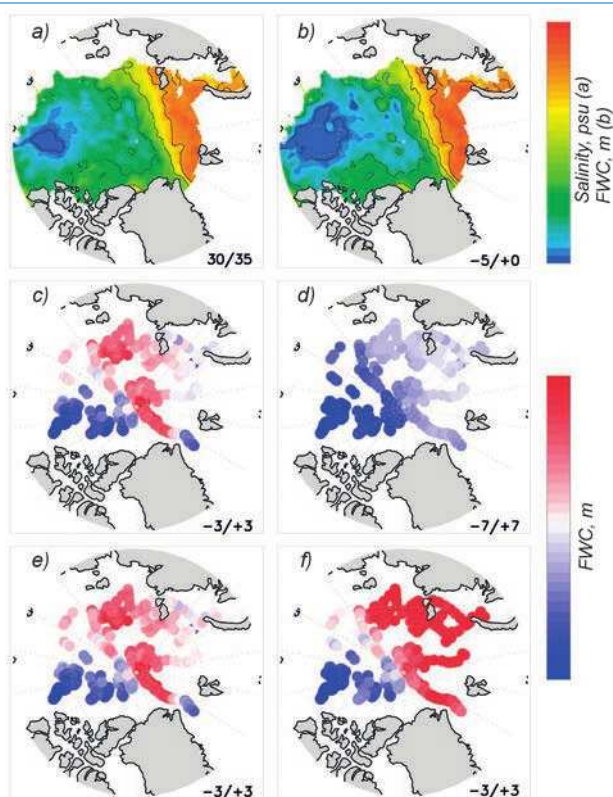


Fig. 1. Freshwater content (FWC , m) and its anomalies in the subsurface 25–75 m layer of the Arctic Ocean.

a — decadal mean (1970s) salinity (psu) used as local reference salinity S_{ref} in calculations of FWC ; *b* — FWC in the 1970s calculated using constant $S_{ref} = 34.8$; *c* — 2007 FWC calculated using local mean S_{ref} ; *d* — 2007 FWC calculated using constant $S_{ref} = 34.8$; *e* — 2007 (local mean S_{ref}) FWC anomalies relative to FWC spatial mean; *f* — 2007 (constant $S_{ref} = 34.8$) FWC anomalies relative to FWC spatial mean. Color maps indicate linear change of corresponding parameters between their maximum and minimum values, which are shown in the right bottom corner of each panel

Рис. 1. Пресноводный баланс (ПБ, м) и его аномалии в подповерхностном 25–75 м слое Северного Ледовитого океана.

a — среднедекадная (1970-е гг.) солёность (ЕПС), использованная в качестве локальной относительной солёности S_{ref} в расчетах ПБ; *b* — ПБ в 1970-е гг., рассчитанный с использованием постоянной $S_{ref} = 34,8$ ЕПС; *c* — 2007 г. ПБ, рассчитанный с использованием локальной средней S_{ref} ; *d* — 2007 г. ПБ, рассчитанный с использованием постоянной $S_{ref} = 34,8$ ЕПС; *e* — 2007 г. (локальная средняя S_{ref}) аномалии ПБ относительно среднего по области ПБ; *f* — 2007 г. (постоянная $S_{ref} = 34,8$ ЕПС) аномалии ПБ относительно среднего по области ПБ. Цветовые карты используют линейное изменение параметра между максимальными и минимальным его значениями, которые приводятся в правом нижнем углу каждого рисунка

PATTERNS OF 2007 ARCTIC OCEAN FRESHWATER CONTENT

Spatial distribution of decadal-mean (1970s) salinity in the 25–75m layer of the Arctic Ocean is shown in Fig. 1a. It exhibits such well-known features as the Canada Basin salinity minimum of ~30 psu and increased salinities in the Eurasian Basin due to intensive communication between the polar basins and the North Atlantic Ocean. Data from the

1970s were used to compute FWC based on constant $S_{ref} = 34.8$ (Fig. 1b). Expectedly, FWC faithfully copies the salinity pattern with the minimum FWC in the Canada Basin and an increase towards the Eurasian Basin. The FWC values suggest, for example, that in order to reach a salinity of 34.8 psu the 25–75 m layer in the Canada Basin must lose up to 5 m of fresh water. An analogous map based on local mean S_{ref} is not shown because the entire domain in this case is filled with zeros. However, this is useful information attesting that the Arctic Ocean salinity (or FWC) is at its most probable state (assuming normal distribution of FWC changes) and no additional fresh or salty water is required for the layer to move its FWC closer to this state. We will henceforth refer to this state as “normal state”.

We now direct our attention to the analysis of FWC observed in 2007. Fig. 1d shows that FWC values based on $S_{ref} = 34.8$ are universally negative owing to the fact that the $S_{ref} = 34.8$ is much higher than any of the observed salinities in this layer of the Arctic Ocean; indeed, this S_{ref} is so high that, arguably, it has never been observed at this depth range in the Polar Basin (i.e. this is a highly unlikely state of the layer). FWC based on the local mean S_{ref} shows that in 2007 the western Arctic Ocean was actually saltier than normal, whereas the eastern Arctic Ocean was fresher; a comparable magnitude (up to several meters) of positive and negative FWC spatial differences was observed in the eastern and western Arctic Ocean (Fig. 1c).

A closer look at the FWC spatial patterns shown in Figs. 1c and 1d suggests a certain similarity between these two distributions with lower FWC values in the eastern Arctic Ocean and higher values in the western Arctic Ocean. This similarity is clouded in Figs. 1c and 1d by very different spatial means defined by different S_{ref} . Indeed, when these means are subtracted, the spatial patterns of FWC anomalies look quite similar (Figs. 1e and 1f), which is confirmed by the high pattern correlation ($R = 0.88$). However, there are still some noticeable differences between these distributions. Most notably, FWC anomalies based on $S_{ref} = 34.8$ are greater than those based on the local mean S_{ref} . This is confirmed by differences between these two anomalous freshwater distributions (Fig. 2). This difference

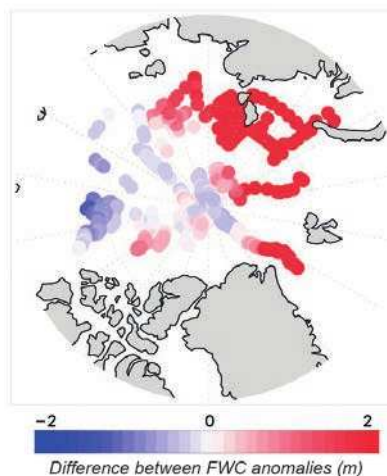


Fig. 2. Difference between FWC anomalies (m) in the subsurface 25–75 m layer of the Arctic Ocean calculated using local mean S_{ref} or constant $S_{ref} = 34.8$.

Рис. 2. Разница между аномалиями ПБ (м) в подповерхностном слое 25–75 м Северного Ледовитого океана, рассчитанными по локальным S_{ref} или постоянной $S_{ref} = 34,8$ ЕПС

was quantified by estimating the spatial standard error, which was found to be 0.62 m and thus constitutes a substantial fraction of anomalous *FWC* (Figs. 1e,f). This quantity suggests that the use of different S_{ref} leads not only to different means (Figs. 1c and 1d) but also substantially exaggerates spatial *FWC* anomalies.

CONCLUDING REMARKS

Using 2007 observational data as an example, this paper demonstrates substantial differences between 25–75 m Arctic Ocean mean and anomalous *FWC* calculated using local mean S_{ref} and the constant $S_{ref} = 34.8$, which is often used in climate studies. Estimates based on the latter S_{ref} may be useful in illustrating very different *FWC* in the upper and lower layers of the Arctic Ocean or the fresher state of the Polar Basin compared with sub-polar oceans. However, we argue that for analyzing *FWC* spatiotemporal changes the use of the local mean S_{ref} is a better choice since the local S_{ref} represents the most probable local state defined by the climatological mean local salinity.

Estimates of 2007 *FWC* anomalies demonstrated that the choice of $S_{ref} = 34.8$ leads to *FWC* spatial anomalies exaggerated, on average, by ~0.6 m; this is a substantial fraction of spatial *FWC* changes. It is evident (but not shown here) that temporal *FWC* anomalies will suffer the same problem when $S_{ref} = 34.8$ is used. The problem is aggravated in areas where the difference between the local S_{ref} and arbitrary S_{ref} is bigger. We note that defining climatological mean S is not a trivial task, either. For illustrative purposes, in our analysis we used “climatology” defined by data averaged over the 1970s. A better choice would be to use means defined over a longer time interval. However, a rapidly changing Arctic Ocean and the lack of historical data challenges our ability to provide a well-constrained estimate of the most probable state of the Arctic Ocean. Despite this problem, we argue that even existing climatologies would be a better choice for analyzing spatiotemporal changes of the Arctic Ocean *FWC*.

Competing interests. The author has no competing interests.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Funding. This study was supported by NSF Grants 1708424, 1708427, and 1724523.

Финансирование. Данное исследование было выполнено в рамках грантов NSF 1708424, 1708427 и 1724523.

REFERENCES

1. Dickson R. R., Yashayaev I., Meincke J., Turrell W. R., Dye S., Holfort J. Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature*. 2002, 416: 832–837.
2. Visbeck M., Chassignet E., Curry R., Delworth T., Dickson B., Krahmann G. The ocean's response to North Atlantic Oscillation variability. *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. Hurrell, J., Y. Kushnir, G. Ottersen, and M. Visbeck (eds.). Washington, AGU, 2002, Geophysical Monograph Series, 134: 113–146.
3. Aagaard K., Carmack E. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.* 1989, 94: 14485–14498.
4. Proshutinsky A., Bourke R.H., McLaughlin F.A. The role of the Beaufort Gyre in Arctic climate variability: Seasonal to decadal climate scales. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 31: L11311. doi: 10.1029/2004GL020039
5. Häkkinen S., Proshutinsky A. Freshwater content variability in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.* 2004, 109: C03051. doi: 10.1029/2003JC001940
6. Swift J. H., Aagaard K., Timokhov L., Nikiforov E. G. Long-term variability of Arctic Ocean waters: Evidence from a reanalysis of the EWG data set. *J. Geophys. Res.* 2005, 110: C03012. doi: 10.1029/2004JC002312

7. Peterson B., McClelland J., Holmes M., Curry R., Walsh J., Aagaard K. Acceleration of the Arctic and subarctic freshwater cycle. *Science*. 2006, 313: 1061–1066.
8. Steele M., Ermold W. Steric sea level change in the Northern Seas. *J. Climate*. 2007, 20: 403–417.
9. Carmack E., McLaughlin F., Yamamoto-Kawai M., Itoh M., Shimada K., Krishfield R., Proshutinsky A. Freshwater storage in the Northern Ocean and the special role of the Beaufort Gyre. Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate. Dickson R.R., Meincke J., Rhines P. (eds.). New York: Springer, 2008: 145–170.
10. Polyakov I. V., Alexeev V., Belchansky G.I., Dmitrenko I.A., Ivanov V., Kirillov S., Korablev A., Steele M., Timokhov L.A., Yashayaev I. Arctic Ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes. *J. Climate*. 2008, 21 (2): 364–384.
11. McPhee M.G., Proshutinsky A., Morison J.H., Steele M., Alkire M.B. Rapid change in freshwater content in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 2009, 36: L10602. doi: 10.1029/2009GL037525
12. Proshutinsky A., Krishfield R., Timmermans M.-L., Toole J., Carmack E., McLaughlin F., Williams W.J., Zimmermann S., Itoh M., Shimada K. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations. *J. Geophys. Res.* 2009, 114 (C00A10). doi: 10.1029/2008JC005104
13. Dickson R.R., Dye S., Karcher M., Meincke J., Rudels B., Yashayaev I. Current estimates of freshwater flux through Arctic and Subarctic seas. *Progress in Oceanography*. 2007, 73: 210–230. doi: 10.1016/j.pocean.2006.12.003
14. Curry R., Mauritzen C. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science*. 2005, 308: 1772–1773.
15. Polyakov I.V., Timokhov L.A. Mean fields of temperature and salinity of the Arctic Ocean. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1994, 7: 33–38.

ЭФФЕКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОСТОЯННОЙ СОЛЕННОСТИ В ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРЕСНОВОДНОГО БАЛАНСА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

И.В. ПОЛЯКОВ

Международный арктический научный центр университета Аляски, Фэрбэнкс, Аляска, США

ivpolyakov@alaska.edu

Изменения высокоширотного пресноводного баланса (ПБ) играют важную роль в формировании изменчивости полярных бассейнов. ПБ определяется как интегрированное по глубине отклонение солёности от относительной солёности S_{ref} , деленное на S_{ref} . Для оценок высокоширотного ПБ часто используется постоянная S_{ref} . В данной работе показывается, что использование локальной средней S_{ref} предпочтительнее. Анализ аномалий ПБ 2007 г. в слое 25–75 м демонстрирует, например, что выбор $S_{ref} = 34,8$ ЕПС (который часто используется в климатических исследованиях) приводит к искаженным аномалиям ПБ порядка 0,6 м, что составляет значительную долю от общего пространственного изменения ПБ. Проблема усугубляется в областях со значительными отклонениями локальной S_{ref} от $S_{ref} = 34,8$ ЕПС. Таким образом, использование климатической средней солёности в качестве S_{ref} является предпочтительным для оценок пространственно-временных изменений ПБ Северного Ледовитого океана.

Ключевые слова: относительная солёность, пресноводный баланс, Северный Ледовитый океан.

Поступила 13.07.2021

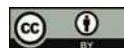
После переработки 20.08.2021

Принята 23.08.2021

Для цитирования: Polyakov I.V. The effect of using local mean versus constant reference salinity to estimate Arctic Ocean freshwater content changes. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021, 67 (3): 230–235. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-230-235>

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248>

УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

АНАЛИЗ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ КРУГЛОГОДИЧНОГО ПЛАВАНИЯ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА ARC7 В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Т.А. АЛЕКСЕЕВА^{*1,2}, С.В. ФРОЛОВ¹, В.Е. ФЕДЯКОВ¹, Е.И. МАКАРОВ¹, Е.У. МИРОНОВ¹,
Ю.В. СОКОЛОВА^{1,2}

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

² — Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^{*}taa@aari.ru

Резюме

Начиная с 2006 г. на трассе Северного морского пути работают суда нового поколения усиленного ледового класса Arc7. Для безопасного и эффективного плавания в морских льдах судов данного типа необходимо детальное изучение ледовых условий. Накопление и анализ данных о ледовых и гидрометеорологических условиях по всей Арктике в сопоставлении с ледовыми условиями на пути плавания судов является неотъемлемой частью разработки оптимальных вариантов и оптимальных маршрутов ледового плавания.

Задачей исследования являлось обобщение ледовых условий плавания судов типа «Норильский никель» по оптимальным вариантам плавания в юго-западной части Карского моря. Для этого по информации из диспетчерских сообщений о плавании судов типа «Норильский никель» за период 2006–2014 гг. была рассчитана вероятность выбора оптимального пути плавания по маршруту Мурманск — Дудинка: через пролив Карские Ворота (мористым, центральным или прибрежным маршрутом) или к северу от мыса Желания. Описаны особенности ледового режима, обуславливающие выбор того или иного пути плавания. Рассчитаны скорости движения судов типа «Норильский никель» по различным маршрутам плавания в дрейфующих льдах юго-западной части Карского моря.

Ключевые слова: арктическое судоходство, гидрометеорологическое обеспечение, ледовые условия плавания, оптимальный маршрут.

Для цитирования: Алексеева Т.А., Фролов С.В., Федяков В.Е., Макаров Е.И., Мионов Е.У., Соколова Ю.В. Анализ ледовых условий круглогодичного плавания судов ледового класса Arc7 в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 236–248. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248>.

Поступила 25.07.2021

После переработки 03.09.2021

Принята 15.09.2021

ANALYSIS OF ICE CONDITIONS OF YEAR-ROUND NAVIGATION OF ARC7 VESSELS IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE KARA SEA

TATIANA A. ALEKSEEVA^{*1,2}, SERGEI V. FROLOV¹, VALERY YE. FEDYAKOV¹,
EVGENY I. MAKAROV¹, EVGENY U. MIRONOV¹, YULIA V. SOKOLOVA^{1,2}

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

² — Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*taa@aari.ru

Summary

Since 2006, a new generation of reinforced ice class Arc7 vessels has been operating on the Northern Sea Route. Safe and efficient sailing of this type of vessels in sea ice demands a detailed study of ice conditions. Accumulation and analysis of data on ice and hydrometeorological conditions for the entire Arctic in comparison with ice conditions along the route of vessels is an essential part of the development of optimal variants and optimal routes for ice navigation.

The main aim of the study was to generalize the conditions of ice navigation of Norilskiy Nickel vessels along the optimal navigational routes in the south-western part of the Kara Sea. Based on the reports on sailing obtained from vessels of the “Norilskiy Nickel” type for the 2006–2014 period, we calculated the probability of choosing the optimal route along the Murmansk – Dudinka passage: through the Kara Gate Strait (seaward, central or coastal route) or the north of Cape Zhelaniya. During the year, vessels move predominantly through the Kara Gate. However, for three month per year, from April to June, the most appropriate route lies to the north of the Zhelaniya Cape. In April – May it is, on average, every second navigation, and in June – more than 80 % of all navigation. The features of the ice regime determining the choice of the specific navigation route, are described. The speeds of vessels of the “Norilskiy Nickel” type along various navigation routes in drifting sea ice of the Kara Sea are calculated. The fastest speed in drifting ice was recorded in the winter navigations of 2007–2008 and 2011–2012, in the January-May of these years the average speed was 10.2 and 11.2, correspondingly. The minimum speed in these years, even during the months of maximum ice cover growth, was not less than 4.8 knots. In other years, the average speeds were in the range of 9.2–9.8 knots. During the whole period of study, ice conditions that were extremely difficult for navigation formed three times: at the end of May 2009, at the end of March 2010 and in the middle of March 2011, these are considered in more detail in the present article.

Keywords: Arctic shipping, conditions of ice navigation, hydrometeorological support, optimal route of navigation.

For Citation: Alekseeva T.A., Frolov S.V., Fedyakov V.Ye., Makarov E.I., Mironov E.U., Sokolova Yu.V. Analysis of ice conditions of year-round navigation of Arc7 vessels in the southwestern part of the Kara Sea *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 236–248. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-236-248>.

Received 25.07.2021

Revised 03.09.2021

Accepted 15.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

В 2006 г. в Арктике начали работать суда нового поколения усиленного ледового класса Arc7. Эти суда имеют движительный комплекс Azipod®. Суда этого типа — double acting ships (суда двойного действия) предназначены для самостоятельного (безледокольного) плавания в условиях Арктики.

Активное безледокольное плавание судов усиленного ледового класса Arc7 в зимний период выявило новые требования к информационному гидрометеоро-

логическому и ледовому обеспечению (ГМО) арктического судоходства. Одно из основных требований к ГМО — прогноз ледовых условий непосредственно на пути движения судна, который реализуется в рекомендациях по оптимальному варианту и оптимальному маршруту плавания. Оптимальный вариант плавания (ОВП) предсказывается с большей заблаговременностью (до 30 суток), чем оптимальный маршрут ледового плавания (ОМП) — заблаговременность до 5 суток.

Разработка таких прогнозов является важной частью специализированного гидрометеорологического и ледового обеспечения (СГМО). Специализированные прогнозы предназначены для определенных морских операций или конкретных судов. Они используются как в планировании морских операций, так и для их оперативного регулирования.

Разработка ОВП и ОМП основывается на специализированных базах данных (СБД). В таких СБД проводится накопление, хранение и обработка данных о ледовых и гидрометеорологических условиях по всей Арктике в сопоставлении с ледовыми условиями на пути плавания судов. Диспетчерские донесения с судов являются одним из источников таких данных в СБД.

В марте 2006 г. на трассу Северного морского пути (СМП) вышло первое транспортное судно нового поколения — дизель-электроход (д/э) «Норильский никель», открыв принципиально новую страницу в арктическом судоходстве. Д/э «Норильский никель» построен судостроительной компанией Aker Finnyards Inc. на верфи в Хельсинки, сдан в эксплуатацию 28 февраля 2006 г. Судно построено в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства (РС) и имеет категорию ледовых подкреплений Arc7. Основной особенностью судна является то, что оно построено по концепции DAS (Double Acting Ship). Суть этой концепции заключается в том, что при плавании по чистой воде и в легких ледовых условиях судно движется носом вперед, как судно традиционной конструкции, а при плавании в тяжелых ледовых условиях может двигаться кормой вперед. Такую возможность изменения варианта движения предоставляет использование движительной установки типа Azipod. У каждого классификационного сообщества, присваивающего технический класс судам, существует своя система классификации, и сопоставление этих классов весьма приблизительное. Поэтому приведем требования РС для судов класса Arc7: самостоятельное плавание в сплоченных однолетних арктических льдах толщиной до 1,4 м в зимне-весеннюю навигацию и толщиной до 1,7 м в летне-осеннюю навигацию при эпизодическом преодолении ледяных перемычек набегам, плавание в канале за ледоколом в однолетних арктических льдах толщиной до 2,0 м в зимне-весеннюю и до 3,2 м в летне-осеннюю навигацию (<https://rs-class.org/>). По правилам Администрации Северного морского пути (АСМП, <http://nsra.ru/>), государственного учреждения, созданного в 2013 г. для осуществления организации плавания судов в акватории СМП, плавание судов класса Arc7 разрешено круглогодично в юго-западной части Карского моря при любых ледовых условиях (легких, средних, тяжелых) без сопровождения ледокола.

Ледопроходимость (под которой понимается предельная толщина сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимально устойчивой скоростью (приблизительно 1,5–3 узла) при работе главной энергетической установки на полную мощность [1]) судов такого типа сопоставима с ледопроходимостью мощных линейных ледоколов, при этом мощность их судовой энергетической установки в разы меньше мощности энергетической установки подобных ледоколов. Например,

ледопроходимость танкера «Енисей», оборудованного кормовым движительным комплексом типа Azipod мощностью 13 МВт и подруливающим устройством в носовой части судна, — кормой вперед — 1,5 м при скорости около 2 узлов, носом вперед — 1,5 м при скорости около 1 узла [2]. Ледопроходимость атомного ледокола типа «Таймыр» составляет 1,7 м (мощность на валах 32,5 МВт) (<http://www.rosatomflot.ru/flot/universalnyy-atomnyy-ledokol-proekta-22220/>). Этот факт делает суда типа Arc7 наиболее перспективными для транспортировки грузов в данном регионе Арктики.

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) к 2006 г. была разработана и успешно используется система СГМО. На борт работающих в Арктике судов ледового класса Arc7 поступает фактическая и прогностическая информация о ледовых и гидрометеорологических условиях плавания, а также рекомендуемый маршрут плавания, а в ААНИИ ежедневно поступают диспетчерские сообщения, содержащие данные о движении судов, гидрометеорологических и ледовых условиях плавания. Информация о системе СГМО ААНИИ представлена в публикациях [3–6].

В 70–80-х гг. XX в. научными сотрудниками ААНИИ был проведен анализ ледовых условий плавания современных на тот период судов [7–8]. Для планирования того, суда каких типов и в каком количестве целесообразно использовать для транспортировки грузов в Арктике, весьма полезным является анализ фактической информации, поступающей с борта уже действующих судов. На основе диспетчерских сообщений с судов типа «Норильский никель», впервые после исследования, проведенного в 1980-х гг., были проанализированы маршруты плавания и скорости движения в дрейфующих льдах юго-западной части Карского моря за период 2006–2014 гг.

Задачей исследования являлось обобщение ледовых условий плавания судов типа «Норильский никель» по оптимальным вариантам плавания в юго-западной части Карского моря. Результаты, приведенные в данной статье, являются первым шагом в направлении классификации ледовых условий плавания в юго-западной части Карского моря для современных судов.

ДАННЫЕ

Начиная с 2006 г. с борта д/з «Норильский никель» в ААНИИ дважды в сутки поступают регулярные диспетчерские сообщения, содержащие в себе следующую информацию на 12 и 24 часа (МСК): координаты положения судна, время, ледовые и гидрометеорологические условия. В 2008–2009 гг. было выведено на трассу еще четыре судна: д/з «Мончегорск», «Заполярный», «Талнах» и «Надежда», а в 2011 г. — д/з «Енисей» (танкер). Таким образом, в настоящее время на трассе СМП эксплуатируется 6 судов указанного типа. На основе диспетчерских сообщений, доступных к анализу, за период с 2006 по 2014 г. рассчитаны повторяемость положения оптимальных вариантов плавания и скорости движения судов в дрейфующих льдах юго-западной части Карского моря (рис. 1). Для расчета распределения скоростей движения использовались данные за 12-часовые интервалы при следовании судна в дрейфующих льдах (скорости движения в канале припая Енисейского залива не учитывались).

Для анализа ледовых условий по пути плавания, наряду с информацией из диспетчерских сообщений, использовались снимки ИСЗ NOAA (AVHRR), находящиеся в свободном доступе на сайте <http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome>, снимки Terra (MODIS) (<https://earthdata.nasa.gov/>) и ледовые карты из архива Центра ледовой и гидрометеорологической информации ААНИИ (еженедельные обзорные карты представлены на сайте <http://aari.ru>).



Рис. 1. Варианты плавания в юго-западной части Карского моря (1 — прибрежный, 2 — центральный, 3 — мористый, 4 — через мыс Желания)

Fig. 1. Standard routes of navigation in the south-western part of the Kara Sea (1 — coastal, 2 — central, 3 — seaward, 4 — to the north of the Zhelaniya Cape)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Многолетний опыт плавания в арктических морях определил основные варианты маршрутов плавания с благоприятными для судоходства ледовыми условиями. Эти маршруты являются рекомендованными (стандартными) трассами (рис. 1), их расположение зависит от сезона, района, типа судов, но решающим фактором являются ледовые условия [7].

Положение оптимального варианта плавания судов в юго-западной части Карского моря

Общий принцип выбора оптимального пути предусматривает, что движение судна во льдах осуществляется по кратчайшему пути через зоны, в которых:

- преобладающая ориентация нарушений сплошности ледяного покрова (разрывы, трещины, каналы) примерно совпадает с генеральным курсом движения судна;
- предлагаемый маршрут плавания должен удовлетворять навигационным ограничениям (глубины, районы, закрытые для мореплавания, и т. п.);
- общая сплоченность льда минимальна;
- количество молодых видов льда (в осенне-зимний) и разрушенность льда (в весенне-летний период) максимальны;
- отмечается минимальная торосистость и повышенная раздробленность льда.

При выборе оптимального маршрута плавания учитываются метеорологические условия (в основном видимость и ветер), а также явления в ледяном покрове, оказывающие существенное влияние на эффективность плавания (сжатия, обледенение корпуса и т. д.).

Вероятность использования различных вариантов плавания по маршруту Мурманск (Архангельск) — Дудинка приведена на рис. 2а. Три месяца в году с апреля по

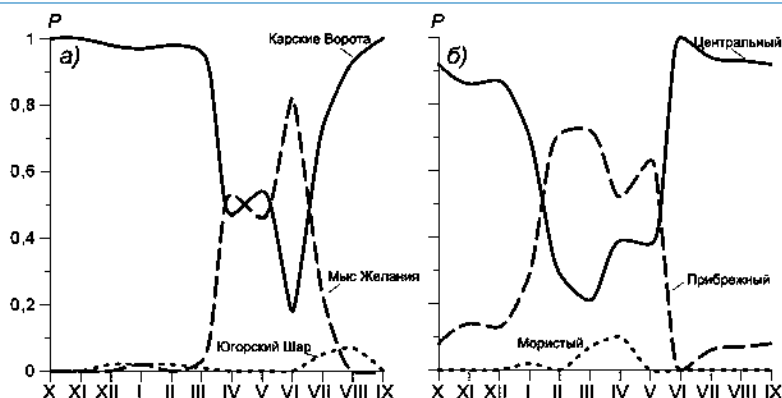


Рис. 2. Вероятность (P) использования различных вариантов плавания в Карском море судами типа «Норильский никель» в период 2006–2014 гг. по маршрутам Мурманск (Архангельск) — Дудинка: *a* — вероятность выбора пути через м. Желания, пр. Карские Ворота или пр. Югорский Шар, *б* — вероятность выбора прибрежного, центрального или мористого варианта плавания в юго-западной части Карского моря в случае прохода судна через пр. Карские Ворота или Югорский Шар

Fig. 2. Frequency (P) of using the various navigational routes in the south-western part of the Kara Sea by vessels of the “Norilskiy Nikel” type during the period 2006–2014 along the navigational routes “Murmansk (Arkhangelsk) – Dudinka”. *a* — the frequency of selecting the route from the Barents Sea to the Kara Sea – through the Zhelaniya Cape, Kara Gate Strait or Yugorsky Shar Strait. *b* — the frequency of selecting coastal, central or seaward route in the south-western part of the Kara Sea when the vessel moves through the Kara Gate or Yugorsky Shar Straits.

июнь наиболее часто выбирается маршрут через мыс Желания. В апреле–мае — это в среднем каждый второй рейс, а в июне — более 80 %. В апреле происходит разделение Новоземельского и Североземельского ледяных массивов, вследствие чего появляется зона льдов пониженной сплоченности и повышенной раздробленности, пролегающая от мыса Желания до о. Диксон. В июне-июле в этой зоне лед уже вытаивает, а Новоземельский массив остается у берегов Новой Земли.

В случае плавания через проливы Карские Ворота или Югорский Шар во льдах юго-западной части Карского моря существует три оптимальных варианта плавания: прибрежный, центральный и мористый (рис. 3–5). Повторяемость положения этих трех оптимальных вариантов плавания приведена на рис. 2б.

Повторяемость широтных направлений зимнего дрейфа в юго-западной части Карского моря имеет большие различия: повторяемость дрейфа восточной четверти составляет 40–60 %, а западной четверти — примерно 10 %. Это означает более частое и устойчивое образование заприпайных зон тонких льдов вдоль Ямала и редкое их появление вдоль Новой Земли. При смещении льдов в сторону Новой Земли образуется Ямальская полынья. При смещении дрейфующих льдов в сторону п-ова Ямал вдоль ямальского припая возникают значительные сжатия льдов и образуются ледяные нагромождения [9]. В юго-западной части Карского моря в зимне-весенний период формируются две стационарные полыньи — Амдерминская и Обь-Енисейская, а также три устойчивые — Северная Новоземельская, Южная Новоземельская и Ямальская [10]. Режим формирования заприпайных полыней и зон сжатий в юго-западной части Карского моря играет определяющую роль в выборе оптимального пути плавания.

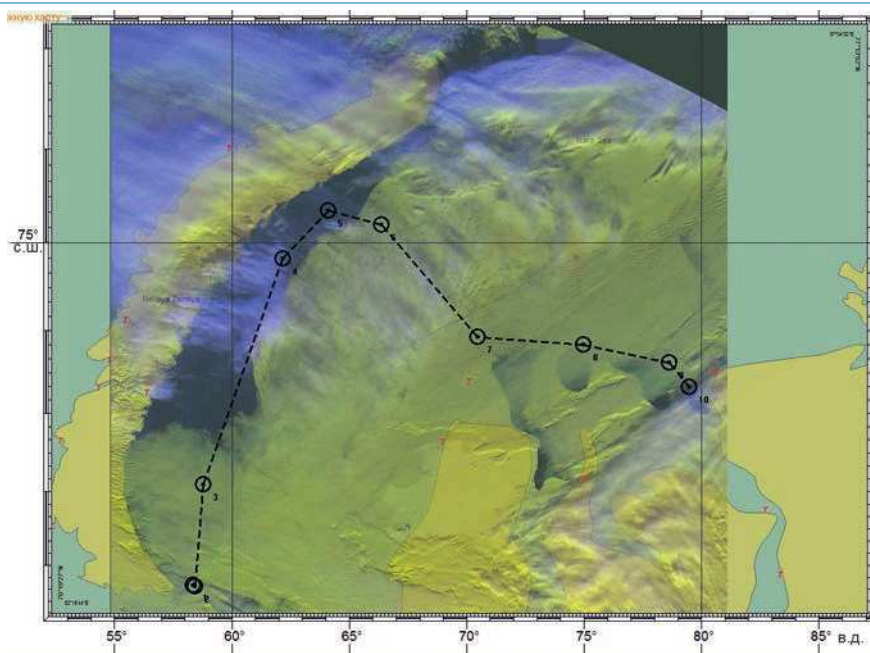


Рис. 3. Снимок ИСЗ NOAA (AVHRR) от 22 марта 2011 г. и пример маршрута плавания (мористого)

Fig. 3. Satellite image NOAA (AVHRR) obtained on 22 March 2011 and example of seaward route

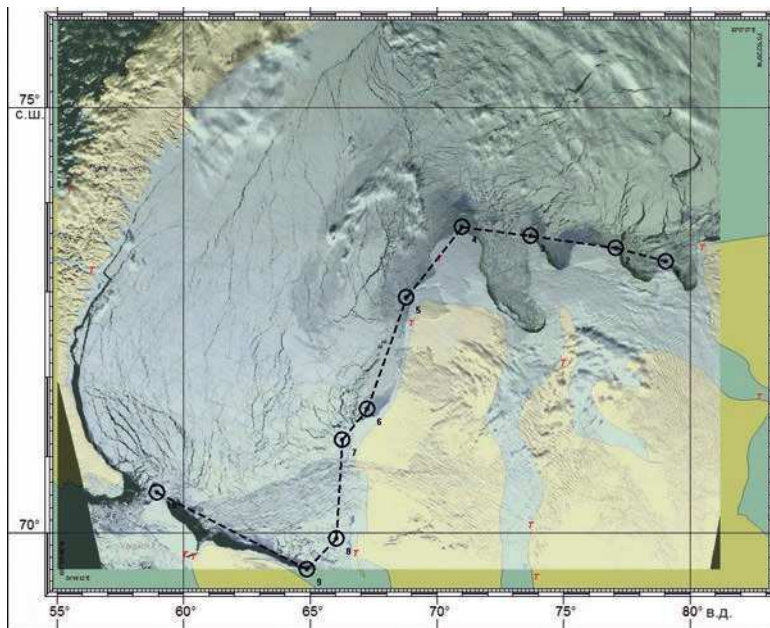


Рис. 4. Снимок ИСЗ Terra (MODIS) от 24 марта 2008 г. и пример маршрута плавания (прибрежного)

Fig. 4. Terra (MODIS) obtained on 24 March 2008 and example of coastal route

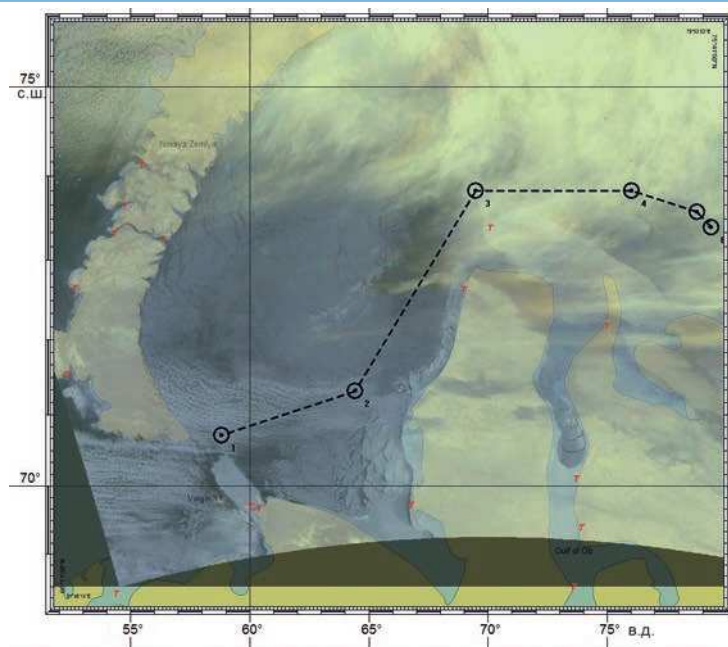


Рис. 5. Снимок ИСЗ NOAA (AVHRR) от 03 января 2012 г. и пример маршрута плавания (центрального)
 Fig. 5. NOAA (AVHRR) obtained on 03 January 2012 and example of central route

Наиболее редко выбирается мористый путь плавания вдоль восточных берегов Новой Земли, в случае наличия Южной и Северной Новоземельских полыней. В период максимального развития ледяного покрова в юго-западной части Карского моря с февраля по май в более чем половине случаев выбирается прибрежный путь плавания. Данный выбор обусловлен наличием Амдерминской и Ямальской полыней, а также наличием и ориентацией разрывов в ледяном покрове между югорским и ямальским побережьями. С июня по январь, когда юго-западная часть Карского моря либо свободна ото льда, либо покрыта начальными видами льдов, в подавляющем большинстве случаев суда идут по кратчайшему центральному пути.

На основе диспетчерских сообщений, поступающих с борта судов типа «Норильский никель», были рассчитаны средние скорости движения судов в дрейфующих льдах юго-западной части Карского моря за период 2006–2014 гг. При расчете скоростей движения судов были исключены задержки, связанные с производством грузовых операций и с техническими остановками.

Средние скорости движения судов типа «Норильский никель» были определены отдельно для периода начала образования ледяного покрова в ноябре–декабре и для периода дальнейшего развития ледяного покрова в январе–мае. Наиболее высокие средние скорости движения в дрейфующих льдах наблюдались в зимние навигации 2007/08 и 2011/12 гг., в январе–мае они составляли 10,2 и 11,2 узла соответственно. В эти же годы минимальные скорости движения, даже в период максимального развития ледяного покрова, были не менее 4,8 узлов. В остальные годы средние скорости движения судов были в пределах 9,2–9,8 узлов. За весь исследуемый период лишь в третьей декаде мая 2009 г., третьей декаде марта 2010 г. и второй декаде марта 2011 г.

Таблица

Средние, минимальные и максимальные скорости движения судов типа «Норильский никель» в дрейфующих льдах за 12-часовые интервалы

Table

Average, minimum and maximum speed of the vessels of the Norilskiy Nikel type moving in drifting ice in the south-western part of the Kara Sea in 12-hour intervals

Год	Число ДПР, используемых для расчетов скорости		Скорость, узлы					
	Ноябрь– декабрь	Январь– май	Минимальная		Максимальная		Средняя	
			Ноябрь– декабрь	Январь– май	Ноябрь– декабрь	Январь– май	Ноябрь– декабрь	Январь– май
2006–2007	68	183	6,3	2,0	13,9	14,9	10,7	9,5
2007–2008	10	38	9,7	5,5	12,8	13,3	11,2	10,2
2008–2009	33	288	8,3	1,5	13,1	18,9	10,7	9,3
2009–2010	54	254	7,4	0,2	13,2	16,4	11	9,8
2010–2011	72	276	6,6	1,6	14,0	14,6	10,5	9,5
2011–2012	44	229	8,7	4,8	14,4	16,4	11,5	11,2
2012–2013	51	363	7,6	0,6	15,0	14,8	10,6	9,7
2013–2014	61	327	6,9	3,3	13,1	15,3	10,7	9,2

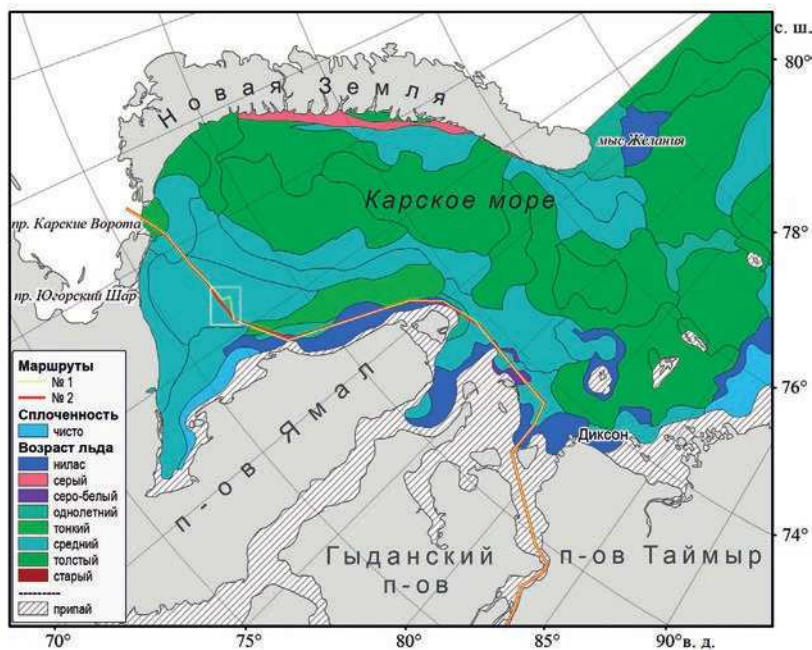


Рис. 6. Ледовая карта ААНИИ юго-западной части Карского моря 18–20 мая 2009 г. и наложенные на нее маршруты плавания д/э «Надежда» (маршрут 1) и д/э «Талнах» (маршрут 2). Белым прямоугольником выделен участок маршрута д/э «Надежда», на котором зафиксировано снижение скорости до 0,2 узла

Fig. 6. The AARI's sea ice chart of the south-western part of the Kara Sea on 18–20 May 2009 and routes of navigation of the vessels Nadezhda (route 1) and Talnakh (route 2) in the extremely severe ice conditions. The white rectangle denotes part of the navigational route of Nadezhda, where the speed dropped to 0.2 knots

сформировались наиболее тяжелые для данного региона ледовые условия плавания. Наиболее легкий маршрут плавания, рекомендуемый специалистами ААНИИ на основе анализа ледовой и гидрометеорологической информации, в этих рейсах проходил через пролив Карские Ворота.

Во всех случаях максимальных затрат времени и наименьших скоростей движения в дрейфующих льдах суда двигались в зонах высокой торосистости (до 4 баллов) и сильных сжатий (2–3 балла), вследствие чего скорость судов на протяжении 1–3 суток (в зависимости от времени действия сжатий) падала до 0–3 узлов. Ледовая карта на момент одной из таких ситуаций показана на рис. 6.

На рис. 7 приведено распределение скоростей движения судов в период становления ледяного покрова в ноябре–декабре и в период максимального развития

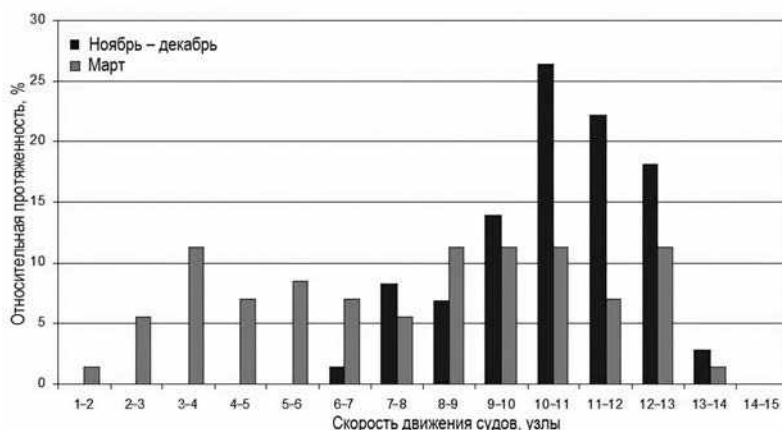


Рис. 7. Распределение скорости движения судов типа «Норильский никель» в дрейфующих льдах юго-западной части Карского моря в ноябре–декабре 2010 г. и марте 2011 г.

Fig. 7. Distribution of the “Norilskiy Nikel” vessels speed in drifting ice in the south-western part of the Kara Sea in November–December 2010 and March 2011

ледяного покрова в марте в зимнюю навигацию 2010/11 г. (одна из навигаций со средним значением среднегодовых скоростей движения во льдах, см. табл.). Для «легких» условий плавания в ноябре–декабре характерно одномодальное распределение скоростей движения с максимумом в диапазоне 10–12 узлов (относительная протяженность 48,6 %), для максимального развития ледяного покрова в марте — относительно равномерное распределение скоростей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты анализа вариантов плавания в юго-западной части Карского моря и скорости движения судов ледового класса Arc7 в зависимости от ледовых условий плавания. Представлена вероятность использования различных вариантов плавания в юго-западной части Карского моря во время круглогодичной навигации за период 2006–2014 гг. Подобное исследование выполнялось в 1980-х гг. на основе данных за 1979–1985 гг. [8]. В период 1979–1985 гг. в преобладающем большинстве случаев (90,2 %) оптимальный маршрут плавания проходил через Новоземельские проливы. В период 2006–2014 гг. оптимальный маршрут плавания в 84,2 % случаев проходил через Новоземельские проливы, а в 15,7 % случаях

к северу от мыса Желания. В случае прохода судна через Новоземельские проливы, как в период 1979–1985, так и в 2006–2014 гг., в ноябре–декабре наиболее часто плавание судов происходило по кратчайшему центральному пути. По мере формирования массива однолетних льдов и заприпайных полыней трасса смещалась в зону Ямальской заприпайной полыни. Мористый путь вдоль восточных Новоземельских островов выбирался достаточно редко, так как при выходе из Новоземельских полыней дальнейший курс движения судна часто не совпадает с преобладающей ориентацией разрывов ледяного покрова. В 2006–2014 гг. центральный путь выбирался в 58,8 % случаев, прибрежный — в 38,9 % случаев и мористый — в 2,3 % случаев.

Основным направлением развития специализированной информации в Арктике является автоматизация рутинных процессов обработки данных [11], получения экспертных оценок, формирования базы знаний. Комплексная информация о среде судоходства — специализированная информация — в настоящее время получила мощный стимул в своем развитии, связанный с перспективными планами судоходства по СМП. Информация, получаемая из диспетчерских сообщений, регулярно поступающих с судов, совместно с обработкой ледовых карт ААНИИ, спутниковых снимков высокого разрешения и другой гидрометеорологической информации используется для круглогодичного мониторинга так называемой «среды судоходства» [12].

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках НИТР НИУ Росгидромета на 2021–2024 гг. по теме 5.1.2. Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений (Т.А. Алексеева, В.Е. Федяков, Е.И. Макаров, Е.У. Миронов). Работа со спутниковыми данными выполнялась в рамках темы «Мониторинг» гос. регистрация № 01.20.0.2.00164 (Т.А. Алексеева, Ю.В. Соколова).

Благодарности. ГМК «Норильский никель», экипажам судов, регулярно отправляющих оперативную информацию о ледовых условиях в ААНИИ.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The work was carried out within the framework Roshydromet topic 5.1.2. for 2021–2024. Development of existing and new methods and technologies for long-term (monthly and seasonal) forecasting of the elements of the ice-hydrological regime of the Arctic seas, lower reaches and estuarine areas of rivers in conditions of climatic changes (T.A. Alekseeva, V.E. Fedyakov, E.I. Makarov, E.U. Mironov). The work with satellite data was carried out within the framework of the topic “Monitoring”, state registration No. 01.20.0.2.00164 (T.A. Alekseeva, Yu.V. Sokolova).

Acknowledgments. The authors are grateful to the MMC “MKF Norilsk Nickel”, the crews of the vessels that regularly send updated information about ice conditions to the AARI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутина Н.А., Лихоманов В.А., Чернов А.В. Оценка ледовой ходкости НЭС «Академик Трешников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 57–64.
2. Платонов В.В., Тряскин В.Н. Архитектурно-конструктивные особенности арктических судов двойного действия // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35). С. 84–96. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-84-96

3. Фролов С.В. Основные принципы организации и современные технологии специализированного гидрометеорологического обеспечения судоходства в замерзающих морях // Северный морской путь: состояние, проблемы, перспективы. СПб.: РГО, СЗНИИ наследия, 2007. С. 142–155.
4. Миронов Е.У., Бресткин С.В., Смирнов В.Г. Адаптируемый комплекс мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы для обеспечения судоходства в замерзающих морях // Морская биржа. 2007. № 1 (19). С. 56–58.
5. Бресткин С.В., Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Юлин А.В. Опыт ледового обеспечения морских операций в арктических и замерзающих морях России с использованием терминала конечного пользователя // Тезисы докладов 9-й междунар. конференции «Российское судостроение и судоходство, деятельность портов, освоение океана и шельфа», 25–26 сентября 2007, Санкт-Петербург. СПб., 2007. С. 101–102.
6. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Смоляницкий В.М., Юлин А.В., Фролов С.В. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики // Российская Арктика. 2020. № 10. С. 13–29.
7. Бузуев А.Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 200 с.
8. Адамович Н.М. Ледовые условия западного района Советской Арктики в холодный период года и учет их влияния на судоходство: Автореф. дис ... канд. геогр. наук. Л.: ААНИИ, 1987. 19 с.
9. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей / Под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб.: ААНИИ, 2004. 431 с.
10. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи Арктических морей Сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 180 с.
11. May R.I., Fedyakov V.E., Frolov S.V., Tarovik O.V., Alex G.T. Method for finding the optimal ship route in ice based on Vector Geo-algorithms // Int. J. Offshore Polar Eng. 2020. V. 30. P. 78–85. doi: <https://doi.org/10.17736/ijope.2020.jc785>
12. Федяков В.Е., Фролов С.В. Новые алгоритмы учета влияния ледяных образований на надежность движения судов во льдах // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 28–35.

REFERENCES

1. Krupina N.A., Likhomanov V.A., Chernov A.V. Estimation of ice capability of research vessel “Akademik Tryoshnikov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 97 (3): 57–64. [In Russian].
2. Platonov V.V., Tryaskin V.N. Architectural and structural features of Arctic double-acting vessels. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: Ecology and Economy. 2019, 3 (35): 84–96. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-84-96. [In Russian].
3. Frolov S.V. Basic principles of organization and modern technology of hydrometeorological support of navigation in the freezing seas. *Severnyi morskoi put': sostoianie, problemy, perspektivy*. The Northern Sea Route: state, problems, prospects. St. Petersburg: RGO, SZNII nasledii, 2007: 142–155. [In Russian].
4. Mironov E.U., Brestkin S.V., Smirnov V.G. Adaptive complex for monitoring and forecasting the state of the atmosphere and hydrosphere for support of navigation in the freezing seas. *Morskaya birzha*. Maritime market. 2007, 1 (19): 56–58. [In Russian].
5. Brestkin S.V., Mironov E.U., Smirnov V.G., Iulin A.V. Experience of ice support for offshore operations in the Arctic and freezing seas of Russia using an end-user terminal. *Tezisy dokladov 9-i mezhd. konferentsii «Rossiiskoe sudostroenie i sudokhodstvo, deiatel'nost' portov, osvoenie okeana i shel'fa»*. Proc. 9th Int. Conf. “Russian shipbuilding and shipping, port activities, ocean and shelf development”. St. Petersburg, 2007: 101–102. [In Russian].

6. Mironov Ye.U., Klyachkin S.V., Smolyanitsky V.M., Yulin A.V., Frolov S.V. Current state and perspectives of ice cover studies in the Russian Arctic seas. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2020, 10: 13–29. [In Russian].
7. Buzuev A.Ia. *Vliianie prirodnnykh uslovii na sudokhodstvo v zamerzaiushchikh moriakhs*. Influence of environmental conditions on shipping in the freezing seas. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981: 200 p. [In Russian].
8. Adamovich N.M. *Ledovye usloviia zapadnogo raiona Sovetskoi Arktiki v kholodnyi period goda i uchet ikh vliianiia na sudokhodstvo. Avtoref... kand. geogr. nauk*. Ice conditions of the western part of the Soviet Arctic during the cold season and taking into account their impact on shipping. Author's abstract of dissertation for the degree of PhD in Geography. Leningrad: AARI, 1987. 19 p. [In Russian].
9. *Izmenchivost' prirodnnykh uslovii v shel'fovoi zone Barentseva i Karskogo morei*. Variability of environmental conditions in the shelf zone of the Barents and Kara seas. St. Petersburg: AARI, 2004: 431 p. [In Russian].
10. Karelin I.D., Karklin V.P. *Pripai i zapripainye polyn'i Arkticheskikh morei Sibirskogo shel'fa v kontse XX — nachale XXI veka*. Fast ice and flaw leads of the Arctic seas of the Siberian Shelf at the end of XX — beginning of XXI century. St. Petersburg: AARI, 2012: 180 p. [In Russian].
11. May R.I., Fedyakov V.E., Frolov S.V., Tarovik O.V., Alex G.T. Method for finding the optimal ship route in ice based on Vector Geo-algorithms. *Int. J. Offshore Polar Eng.* 2020, 30: 78–85. doi: <https://doi.org/10.17736/ijope.2020.jc785>
12. Fedyakov V.Ye., Frolov S.V. The new algorithms of taking into account the affect of ice features upon ice navigation reliability. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 3 (97): 28–34. [In Russian].

**ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ
ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS**<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-249-260>

УДК 551.510



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**БАЗА ДАННЫХ ЧАСОВЫХ И СУТОЧНЫХ СУММ СУММАРНОЙ
РАДИАЦИИ НА РОССИЙСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ:
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ
ЗА ВЕСЬ ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ В АНТАРКТИДЕ**

Е.Е. СИБИР, В.Ф. РАДИОНОВ*, Е.Н. РУСИНА

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия**vradion@aari.ru**Резюме**

С учетом ощутимых изменений климата на планете в целом, особую роль приобретают базы и архивы данных основных климатообразующих характеристик атмосферы, собранных за длительные периоды времени в различных районах земного шара и, в частности, в полярных областях. Суммарная солнечная радиация входит в число важнейших параметров, влияющих на энергетический баланс системы Земля — атмосфера. В статье приведено описание созданной базы данных (БД) часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских станциях Антарктиды. БД предназначена для исследования радиационного режима Антарктики с начала актинометрических наблюдений и до настоящего времени. База данных прошла процедуру государственной регистрации и зарегистрирована под № 2020621401. На основе содержащейся в ней информации были получены оценки характеристик изменчивости суточных, месячных и годовых сумм суммарной радиации на станциях Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская и Прогресс за весь период наблюдений по 2019 г. Результаты их анализа свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в поступлении суммарной солнечной радиации на антарктическую поверхность за более чем шестидесятилетний период актинометрических наблюдений.

Ключевые слова: актинометрические наблюдения, антарктические станции, база данных, суммарная солнечная радиация, энергетический баланс.

Для цитирования: Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. База данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях: анализ изменения суммарной радиации за весь период наблюдений в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 249–260. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-249-260>.

Поступила 27.07.2021

После переработки 03.09.2021

Принята 09.09.2021

**DATABASE OF HOURLY AND DAILY SUMS OF TOTAL RADIATION
AT RUSSIAN ANTARCTIC STATIONS: ANALYSIS OF CHANGES
IN TOTAL RADIATION FOR THE ENTIRE PERIOD
OF OBSERVATIONS IN ANTARCTICA**

Summary

Given the significant changes in the climate on the planet as a whole, databases and archives of data on the main climate-forming characteristics of the atmosphere, collected over long periods of time in various regions of the globe and, in particular, in the polar regions, acquire a special role. Total solar radiation is one of the most important parameters affecting the energy balance of the Earth-atmosphere system. We have created a database (DB) of hourly and daily sums of total radiation (Q) at the Russian Antarctic stations, designed to study the radiation regime of the Antarctic, from the beginning of actinometric observations to 2019. The information presented in the database was collected at five Antarctic stations — Bellingshausen, Vostok Mirny, Novolazarevskaya and Progress. The database has undergone a state registration procedure and is registered under No. 2020621401.

The article gives a description of the structure of the DB and presents detailed information for each station. To provide an example of how database information can be used, characteristics of the total radiation in different parts of the Antarctic continent are obtained. Thus, it is found that the average monthly amounts of Q in the continental part of Antarctica on the high plateau (Vostok station) in conditions of minimal cloudiness and high transparency during the Antarctic summer are maximum and average 1240 MJ/m^2 . At the same time, at the tip of the Antarctic Peninsula (Bellingshausen station) during the same period, the average monthly amounts of Q due to the almost constantly present cloud cover do not exceed 570 MJ/m^2 . In the coastal areas at the three remaining stations, the average monthly amounts of total radiation range from 908 MJ/m^2 (Progress) to 950 MJ/m^2 (Mirny). Estimates of variability characteristics of daily, monthly, and annual sums of total radiation at all the five stations for the entire observation period up to 2019 were also obtained. The absence of statistically significant long-term trends in the annual and monthly sums of total radiation at all the stations under consideration was noted. The results of their analysis indicate that there are no significant changes in the inflow of total solar radiation to the Antarctic surface over more than sixty years of actinometric observations.

Keywords: actinometric observations, Antarctic stations, database, energy balance, total solar radiation.

For Citation: Sibir E.E., Radionov V.F., Rusina E.N. Database of hourly and daily sums of total radiation at Russian antarctic stations: analysis of changes in total radiation for the entire period of observations in Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 249–260. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-249-260>.

Received 27.07.2021

Revised 03.09.2021

Accepted 09.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

Регулярные наблюдения за радиационным режимом на антарктическом континенте были начаты в 1956–1958 гг. в рамках программ Международного геофизического года. Первоначально актинометрические наблюдения проводились на станции Мирный, а затем на вновь организуемых станциях. Первые результаты радиационных исследований в Антарктиде были представлены в монографии Н.П. Русина [1]. В ней впервые были рассмотрены особенности радиационного режима Антарктиды, включая антарктические оазисы. Материалы актинометрических наблюдений на сети антарктических станций за период от начала наблюдений по 1973 г. были приведены в «Справочнике по климату Антарктиды» [2]. Исследования радиационного климата Антарктиды проводились также и за рубежом [3–7].

Подробный анализ радиационного режима на антарктических станциях был выполнен в монографии М.С. Маршуновой [8]. В ней использованы материалы

актинометрических и некоторых сопутствующих наблюдений на 28 советских и зарубежных антарктических станциях за период с 1956 по 1975 г. Эти исследования, расширенные по видам наблюдений, продолжаются до сих пор [9–16]. Их результаты используются для мониторинга радиационного режима Антарктиды. Поэтому очень важным является накопление и хранение получаемой информации. Существенная роль в этом отводится созданию баз данных составляющих радиационного баланса системы атмосфера — подстилающая поверхность.

На первом этапе исследований радиационного режима преимущественно анализировались данные месячной дискретности — месячные суммы характеристик радиационного режима, средние за месяц величины коэффициентов интегральной прозрачности и т. д. Результаты показали, что для детального понимания роли тех или иных факторов, формирующих радиационный режим в Антарктиде, необходим анализ данных актинометрических наблюдений с дискретностью, меньшей, чем месяц. Очень важны такие данные и для развития гелиоэнергетики. С этой целью в ААНИИ был создан архив актинометрических данных, полученных на 7 российских станциях в Антарктиде (Беллинсгаузен, Восток, Ленинградская, Мирный, Молодежная, Новолазаревская, Прогресс) за весь период с начала наблюдений на каждой из станций и по 1996 г. [12]. В этот архив вошла информация срочных актинометрических наблюдений (включая сопутствующую метеорологическую информацию) и данные регистраторов (часовые суммы различных элементов радиационного баланса).

Однако в 1990-х гг. программа актинометрических наблюдений была сокращена. К настоящему времени выполняется только регистрация часовых сумм суммарной радиации на 5 станциях (Беллинсгаузен с 1978 г., Восток с 1992 г., Мирный с 1997 г., Новолазаревская с 1992 г., Прогресс с 2004 г.).

С целью сохранения всей имеющейся в наличии информации о поступлении солнечной радиации к поверхности Антарктиды, по результатам наблюдений на указанных пяти станциях от начала измерений и до 2019 г. включительно была сформирована «База актинометрических данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях» (Свидетельство о государственной регистрации № 2020621401). Заархивированные данные могут быть использованы как для изучения и анализа специфики изменения радиационного режима Антарктиды как одной из составляющих климата Антарктиды в целом (примеры такого использования приводятся ниже), так и в качестве входных параметров в климатических моделях.

ОПИСАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ЧАСОВЫХ И СУТОЧНЫХ СУММ СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ. СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ

На российских станциях в Антарктиде с момента их открытия с помощью регистраторов проводятся измерения часовых сумм суммарной радиации. Именно часовые и суточные суммы суммарной радиации стали основой базы данных. Суммы суммарной радиации приведены в единицах системы СИ МДж/м². Результаты наблюдений, выполнявшихся до 1980 г. в кал/см², были пересчитаны в единицы системы СИ с помощью соотношения $1 \text{ кал/см}^2 = 0,0419 \text{ МДж/м}^2$.

До середины 1990-х гг. на большинстве станций проводились, помимо измерений часовых сумм суммарной радиации, и измерения других составляющих радиационного баланса (прямой, рассеянной, отраженной радиации, радиационного

баланса и альбедо подстилающей поверхности). Поэтому у нас была возможность проводить контроль качества информации путем проверки выполнения существующих соотношений между различными видами радиации [12]. После перехода к сокращенной программе измерений возможность для такого контроля отсутствует.

База данных состоит из текстовых файлов (ANSI): для каждой станции отдельная таблица, включающая год, месяц, координатный номер станции, код вида радиации, дату и час наблюдений, результаты измерений часовых сумм суммарной радиации и расчета суточных сумм. Часовая сумма относится к периоду в один час, оканчивающемуся в этот час (например: в столбце, соответствующем 1 часу приведена часовая сумма за период 0–1 час и т. д.).

В табл. 1 приведена структура единичной записи данных регистрации часовых сумм радиации (соответствует информации таблицы ТМ-13).

Коды отсутствия данных 999 или 9999 соответственно для часовых и суточных сумм радиации.

Вводимые в таблицу характеристики качества информации имеют следующие значения: 0 — величина корректна, 1 — величина сомнительна, 2 — величина восстановлена, 3 — величина забракована, 9 — контроль качества не проводился.

Координатный номер включает сведения о широте и долготе станции.

Шифр вида радиации 7103 соответствует суммарной радиации.

Таблица 1

Структура записи в архив данных регистрации радиационных характеристик

Table 1

Structure of archival recording of radiation characteristics data

Элемент	Длина записи в байтах	Повторяемость
Год	4	
Месяц	2	
Координатный номер станции	7	
Шифр вида регистрации	4	
День	2	
Суточная сумма радиации	4	
Характеристика качества (QA)	1	
Часовые суммы радиации	3	24

Пример формата файлов:

The screenshot shows a text editor window titled "progress2 — Блокнот". The menu bar includes "Файл", "Правка", "Формат", "Вид", and "Справка". The main text area displays a large table of data. The first few lines of the table are as follows:

Год	Месяц	Координатный номер станции	Шифр вида регистрации	День	Суточная сумма радиации	Характеристика качества (QA)	Часовые суммы радиации
2004	1	6940764	7103	21	22509	5	1 7 12 32 90 95120181180236239234204179144 97 66 48 36 28 10 3 3
2004	1	6940764	7103	22	210449	2	4 9 19 34 21 25 32 63 56 85 94104 78 63 70 89 72 60 30 21 10 2 1
2004	1	6940764	7103	23	27069	1	3 11 18 47 78175204249274298215237199181205119 70 57 40 16 6 2 1
2004	1	6940764	7103	24	14899	1	3 8 18 31 48 75 94105110116115121144125 82 99 95 43 28 17 7 3 1
2004	1	6940764	7103	25	26229	3	4 12 25 65 67 84137187208274275257223218188159109 69 28 13 9 3 3
2004	1	6940764	7103	26	28799	2	4 12 29 73 73 90165239269286288279260229197181108 68 26 11 6 3 1
2004	1	6940764	7103	27	29609	1	3 7 29 67123168203237266289273266266241127162102 65 35 20 7 2 1
2004	1	6940764	7103	28	28219	1	3 8 24 4110516220023264281284274256225194136104 64 24 10 3 2 1
2004	1	6940764	7103	29	29859	1	2 6 29 62117166202238266283285277256226191314102 67 28 19 7 1 0
2004	1	6940764	7103	30	3026709	0	1 2 8 15 35 74174175276276285277273237193135103 63 30 13 4 1 0
2004	1	6940764	7103	31	26239	0	1 4 21 22 52 8015122525427727826525222176121118 50 29 17 6 1 1
2004	1	6940764	7103	1	127789	1	4 12 36 79136178212243268279275260232198157110 63 21 8 4 1 0
2004	1	6940764	7103	2	220539	0	1 3 7 28 63115 93135114166211253267212142127 58 28 18 3 1 0
2004	1	6940764	7103	3	325279	0	1 3 8 17 48 92145184224255267266254233177145103 62 29 10 3 1 0
2004	1	6940764	7103	4	425779	0	2 4 12 29 56110151194232247265254240218185152107 78 31 6 3 1 0
2004	1	6940764	7103	5	524769	0	1 3 10 31 62 98140177206236244245236218191159116 64 28 7 3 1 0
2004	1	6940764	7103	6	623859	0	0 2 8 33 69113155190216235245246236212139143 79 38 18 7 1 0 0
2004	1	6940764	7103	7	717899	0	0 2 8 25 41 54 87 95109129146183190202153159104 59 31 10 2 0 0

ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕЛИЧИН СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ

Антарктический континент отличается крайней неравномерностью поступления к его поверхности солнечной радиации, очень высокой прозрачностью атмосферы из-за малого содержания водяного пара и аэрозолей, высоким альбедо (80–90 %), что связано с почти полным покрытием поверхности континента снегом и льдом. Особенности циркуляции атмосферы определяют специфический режим облачности в разных частях континента — на центральном плато, западном и восточном склонах, на побережье. В центральных районах существенную роль играют температурные инверсии с высокой частотой повторяемости 96–99 % [8]. На побережье велико влияние циклонов и стоковых ветров.

Станции, данные наблюдений которых собраны в БД, отражают особенности разных районов континента, например станция Восток — специфику центральных частей Антарктиды, Мирный — особенности побережья, Новолазаревская характеризует условия антарктических оазисов, где значительную часть года поверхность свободна от снега, а станция Беллинсгаузен — условия антарктического полуострова.

Сведения о периодах наблюдений на станциях, представленных в базе данных суммарной радиации, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Перечень станций, их координаты и периоды актинометрических наблюдений

Table 2

List of stations, their coordinates and periods of actinometric observations		
Станция	Координаты	Период наблюдений (годы, месяцы)
Беллинсгаузен	62°12' ю. ш., 58°56' з. д.	1968 (III–V); 1969 (I–XII); 1970 (I–VI); 1971 (III–XII); 1972–1989 (I–XII); 1991–1998 (I–XII); 1999 (IV–XII); 2000–2019 (I–XII)
Восток	78°27' ю. ш., 06°52' в. д.	1963 (III–IV, IX–XII); 1964 (III–IV, IX–XII); 1965–1975 (I–IV, VIII–XII); 1976 (IX–XII); 1977–1978 (I–IV, VIII–XII); 1979 (I–IV, IX–XII); 1980 (I–IV, VIII, X–XII); 1981 (I–IV, VIII–XII); 1983–1984 (I–IV, VIII–XII); 1985 (I, III–IV, VIII–IX, XI–XII); 1986–1988 (I–IV, VIII–XII); 1989 (I–IV, IX–XII); 1991–1992 (I–IV, VIII–XII); 1993 (I–IV, IX–XII); 2000–2003 (I–IV, VIII–XII); 2004 (I–IV, VIII–XI); 2005 (II–IV, VIII–XII); 2006–2019 (I–IV, VIII–XII)
Мирный	66°33' ю. ш., 93°00' в. д.	1956 (IV–XII); 1957 (III–XII); 1961–1970 (I–XII); 1971 (I–IV, VII–XII); 1972–1989 (I–XII); 1991–2019 (I–XII)
Новолазаревская	70°46' ю. ш., 11°50' в. д.	1961 (III–V, VII–XII); 1963 (III–V, VII–XII); 1964–1970 (I–V, VII–XII); 1971 (I–IV, VII–XII); 1972–1992 (I–V, VII–XII); 1993 (III–V, VIII–XII); 1994–1998 (I–V, VII–XII); 1999 (III–V, VIII–XI); 2000–2019 (I–V, VII–XII)
Прогресс	69°23' ю. ш., 76°23' в. д.	2004–2007 (I–XII); 2008 (I–IX); 2009 (I–XII); 2010 (I–X); 2011–2019 (I–XII)

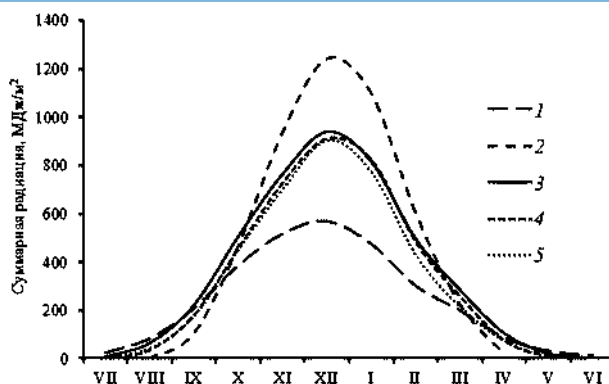


Рис. 1. Внутригодовой ход месячных сумм суммарной радиации на антарктических станциях: 1 — Беллинсгаузен; 2 — Восток; 3 — Мирный; 4 — Новолазаревская; 5 — Прогресс

Fig. 1. Intra-annual variation of monthly sums of total radiation at Antarctic stations: 1 — Bellingshausen; 2 — Vostok; 3 — Mirny; 4 — Novolazarevskaya; 5 — Progress

На рис. 1 приведен годовой ход осредненных за весь период наблюдений месячных сумм суммарной радиации (Q).

Максимальный приход суммарной радиации наблюдается в летние антарктические месяцы, что обусловлено сезонными изменениями продолжительности светового дня и высоты Солнца. Пик суммарной радиации приходится на декабрь, это соответствует июню Северного полушария (см. рис. 1).

Самые высокие значения суммарной солнечной радиации Q регистрируются летом (в декабре) на континентальной станции Восток, расположенной в высокогорной части Восточно-Антарктического ледникового щита. Этому, в частности, способствуют следующие факторы:

- высотное расположение станции — 3,5 км над уровнем моря;
- низкое влагосодержание атмосферы;
- слабое развитие облачного покрова, характеризуемого преобладанием перистых облаков при незначительной облачности нижнего яруса. Общая облачность за год составляет 3,5–5,0 баллов при слабой изменчивости от сезона к сезону;
- высокая отражательная способность подстилающей поверхности, в течение всего года покрытой снегом.

Минимальные значения суммарной радиации антарктическим летом наблюдаются на станции Беллинсгаузен, что связано со спецификой метеорологических условий. Станция находится на оконечности Антарктического полуострова и отличается от других станций высокими значениями облачности и большим влагосодержанием атмосферы. В частности, в течение года показатели общей облачности изменяются в среднем от 7,6 до 8,4 балла. В переходные сезоны эти значения бывают более высокими: 8,6–8,8 баллов.

На трех других станциях кривые годового хода суммарной радиации близки между собой. Общая облачность над районами расположения этих станций в среднем за год составляет от 6,0 до 6,5 баллов, максимум отмечается зимой, минимум летом.

На рис. 2 представлен годовой ход суточных сумм суммарной радиации на четырех станциях с длинными рядами наблюдений, где наблюдения проводились более 50 лет. На этом рисунке приведены средние за период наблюдений значения

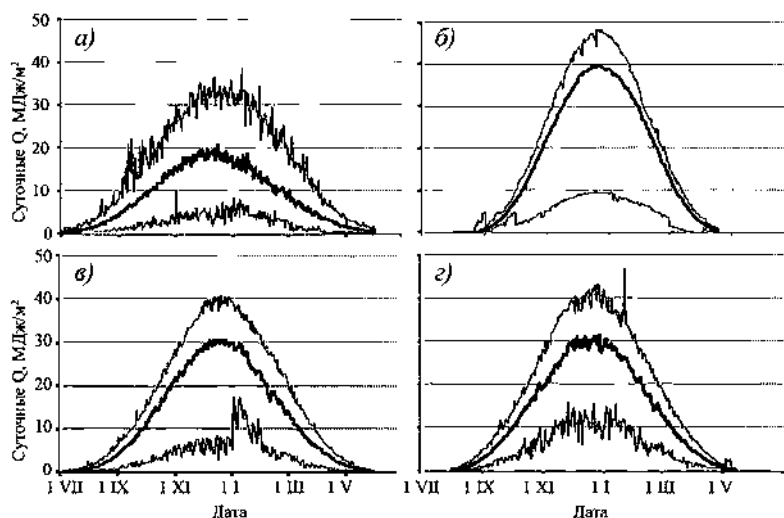


Рис. 2. Годовой ход средних многолетних значений суточных сумм суммарной радиации Q и их экстремумов на антарктических станциях: a — Беллинсгаузен; b — Восток; v — Мирный; z — Новозеландская

Fig. 2. Annual variation of the average long-term values of daily sums of total radiation Q and their extremes at Antarctic stations: a — Bellingshausen; b — Vostok; v — Mirny; z — Novolazarevskaya

суточных сумм Q , а также абсолютные максимумы и минимумы значений суточных сумм Q за весь период наблюдений на соответствующих станциях.

Рис. 2 дает достаточно четкое представление о средних величинах и пределах изменчивости суточных сумм суммарной радиации, поступающей на поверхность. Главной причиной таких различий являются облачность, характер подстилающей поверхности и прозрачность атмосферы. На разных станциях эти факторы, как уже говорилось, существенно отличаются. Абсолютные величины максимальных и минимальных значений суточных сумм Q и специфика соотношения их средних, максимальных и минимальных значений характеризуют радиационный режим каждой из станций и соответствующих областей Антарктиды. К примеру, на внутриконтинентальной станции Восток, характеризующейся высоким альбедо в течение всего года, незначительным количеством облачности и высокой прозрачностью атмосферы, максимальные и средние суточные суммы Q летом значительно выше, чем в других районах Антарктиды. Большой, по сравнению с другими станциями, разброс между максимальными и минимальными значениями суточных сумм связан с изменениями облачности в конкретные дни года.

Минимальные летом значения суточных сумм Q отмечаются на станции Беллинсгаузен (см. рис. 2а) с ее высокой влажностью и облачностью. На этой станции также наблюдается самая большая, по сравнению с другими станциями, межсуточная изменчивость суммарной радиации, связанная со спецификой погодных условий, и существенно меньший разброс между максимальными и минимальными значениями.

Таким образом, с помощью размещенных в БД данных о часовых и суточных суммах суммарной радиации, особенно с привлечением данных об облачности, влажности, прозрачности атмосферы и характере подстилающей поверхности, можно более четко отследить особенности радиационного режима различных районов Антарктиды.

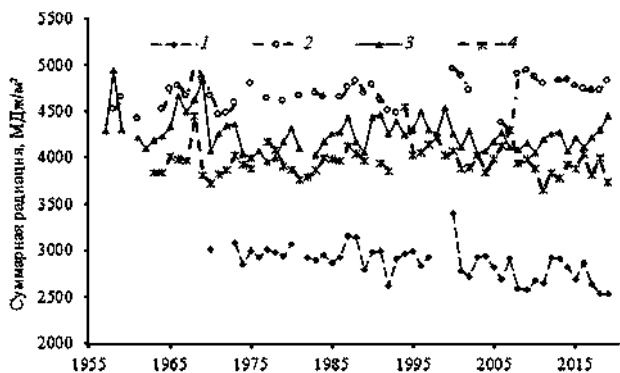


Рис. 3. Многолетнее изменение годовых сумм суммарной радиации на антарктических станциях: 1 — Беллинсгаузен, 2 — Восток, 3 — Мирный, 4 — Новолазаревская

Fig. 3. Long-term change in annual sums of total radiation at the Antarctic stations: 1 — Bellingshausen; 2 — Vostok; 3 — Mirny; 4 — Novolazarevskaya

На рис. 3 приведена многолетняя изменчивость годовых сумм суммарной радиации на тех же четырех станциях с длительными рядами наблюдений. Прежде всего, он подтверждает особенность, отмеченную на рис. 1 и 2, — максимальное поступление радиации на внутриконтинентальной станции Восток и минимальное — на прибрежной станции Беллинсгаузен на Антарктическом полуострове.

На станциях Мирный и Новолазаревская отличия в годовых суммах Q менее заметны. Однако на станции Мирный, расположенной на ледниковом побережье, поступление суммарной радиации постоянно выше, чем на станции Новолазаревская, расположенной в антарктическом оазисе, где подстилающая поверхность свободна от снега значительную часть года.

В табл. 3 приведены параметры линейных трендов и величины достоверности их аппроксимаций R^2 многолетних изменений годовых сумм Q на этих станциях.

Как видно из табл. 3, на Востоке наблюдается тенденция многолетнего линейного увеличения приходящей к поверхности в течение года суммарной радиации, а на трех других станциях — тенденция ее уменьшения, более выраженная на станции Беллинсгаузен. Анализ трендов многолетней изменчивости месячных сумм суммарной радиации показал точно такие же тенденции, а именно, положительные тренды в каждый из месяцев наблюдений на станции Восток и отрицательные на трех других станциях, однако, и те, и другие статистически незначимы.

Таблица 3

Параметры линейных трендов и величины достоверности их аппроксимаций R^2 многолетних изменений годовых сумм Q

Table 3

Parameters of linear trends and values of reliability of their approximations R^2 of long-term change in annual sums Q

Станция	Уравнение	R^2
Беллинсгаузен	$y = -7,130x - 17103$	0,332
Восток	$y = 2,506x - 292,2$	0,085
Мирный	$y = -2,533x - 9291$	0,056
Новолазаревская	$y = -0,355x - 4669$	0,001

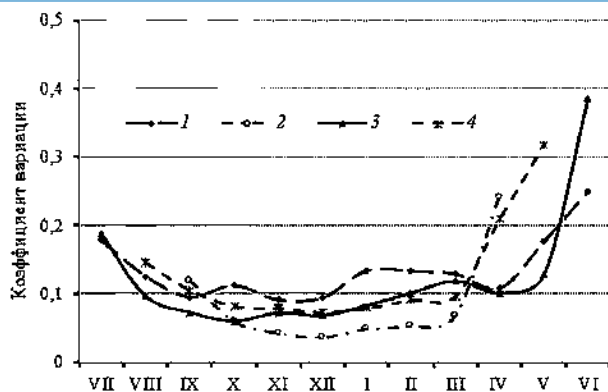


Рис. 4. Коэффициенты вариации месячных сумм суммарной радиации на антарктических станциях: 1 — Беллинсгаузен; 2 — Восток; 3 — Мирный; 4 — Новолазаревская

Fig. 4. Coefficients of variation of monthly sums of total radiation at Antarctic stations: 1 — Bellingshausen; 2 — Vostok; 3 — Mirny; 4 — Novolazarevskaya

Таким образом, можно утверждать, что отсутствие на российских антарктических станциях статистически значимых положительных или отрицательных трендов в поступлении к поверхности суммарной солнечной радиации является основной особенностью многолетней изменчивости этой составляющей радиационного режима.

На рис. 4 показано, как меняются в течение года коэффициенты вариации месячных сумм суммарной радиации (отношение стандартного отклонения величины к ее среднему значению) на тех же четырех длиннорядных станциях.

Из рис. 4 видно, что минимальные значения коэффициентов вариации наблюдаются на станции Восток, а максимальные (примерно в 2 раза большие) — на Беллинсгаузене. На станциях Мирный и Новолазаревская с сентября до марта величины коэффициентов вариации месячных сумм приходящей к поверхности солнечной радиации занимают промежуточные, по сравнению с Востоком и Беллинсгаузенем, значения и составляют менее 10 %.

В этот период года к поверхности поступает более 95 % годовой суммы солнечной радиации в Мирном, более 97 % на Новолазаревской и практически 100 % на Востоке. Несколько большие значения коэффициента вариации на станции Беллинсгаузен антарктическим летом связаны с особенностями внутригодовой изменчивости облачности над Антарктическим полуостровом, но и здесь за период с сентября до марта поступает более 92 % годового количества солнечной энергии. В целом можно говорить о малой изменчивости месячных сумм в конце весны — летом — в начале осени на указанных станциях.

ВЫВОДЫ

Приведено описание сформированной в ААНИИ «Базы актинометрических данных часовых и суточных сумм суммарной радиации на российских антарктических станциях».

На основе информации, включенной в БД, проанализированы результаты измерений часовых и суточных сумм суммарной радиации на пяти российских антарктических станциях Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская и Прогресс с начала наблюдений по 2019 г.

Получены оценочные характеристики поступления суммарной радиации к земной поверхности в разных частях антарктического материка. Так, было установлено, что средние месячные суммы Q в континентальной части Антарктиды на высокогорном плато (станция Восток) в условиях минимальной облачности и высокой прозрачности в период антарктического лета максимальны и составляют в среднем 1240 МДж/м^2 . В то же время на оконечности Антарктического полуострова (станция Беллинсгаузен) в этот же период средние месячные суммы Q из-за практически постоянно присутствующего облачного покрова не превышают 570 МДж/м^2 . В прибрежных районах на остальных трех станциях средние месячные суммы суммарной радиации колеблются в пределах от 908 МДж/м^2 (Прогресс) до 950 МДж/м^2 (Мирный). Отмечено отсутствие статистически значимых многолетних трендов годовых сумм суммарной радиации на всех рассматриваемых станциях. Это позволяет сделать вывод об отсутствии существенных изменений в поступлении суммарной солнечной радиации на антарктическую поверхность за более чем шестидесятилетний период актинометрических наблюдений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ по проекту 5.2 ЦНТП Росгидромета.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the planned scientific topics of the AARI under the project 5.2 of the Roshydromet CSTP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русин Н.П. Метеорологический и радиационный режим Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 448 с.
2. Справочник по климату Антарктиды. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 211 с.
3. Dutton E.G., Stone R.S., DeLuise J.T. South Pole surface radiation balance measurements, April 1986 to February 1988. Silver Spring, Md.: U. S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resources Laboratory, [1989]. Series: NOAA data report ERL ARL. V. 17. 49 p.
4. Gardiner B.G. Solar radiation transmitted to the ground through cloud in relation to surface albedo // J. Geophys. Res. 1987. V. 92 (D4). P. 4010–4018.
5. Gardiner B.G., Shanklin J.D. Measurements of Solar and Terrestrial Radiation at Faraday and Halley / British Antarctic Survey. Cambridge, 1989. 45 p.
6. Dutton E.G., Stone R.S., Nelson D.W., Mendonca B.G. Recent interannual variations in solar radiation, cloudiness, and surface temperature at the South Pole // J. Climate. 1991. V. 4. P. 848–858.
7. Sanhill G., Cohen S. Recent Changes in Solar Irradiance in Antarctica // J. Climate. 1997. V. 10. № 8. P. 2078–2086.
8. Мариунова М.С. Условия формирования и характеристики радиационного режима Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 214 с.
9. Мариунова М.С., Радионов В.Ф. Колебания интегральной прозрачности атмосферы в полярных районах // Метеорология и гидрология. 1988. № 11. С. 71–80.
10. Радионов В.Ф., Мариунова М.С., Русина Е.Н. и др. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных областях // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 797–801.
11. Справочник по климату Антарктиды. Солнечная радиация. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 148 с.

12. Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Мишин А.А. Параметры изменчивости характеристик радиационного режима на российских антарктических станциях по результатам анализа данных из архива актинометрических измерений на этих станциях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2003. № 74. С. 7–18.
13. Радионов В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е. Специфика многолетней изменчивости суммарной радиации и характеристик прозрачности атмосферы в полярных областях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 76. С. 131–136.
14. Радионов В.Ф., Русина Е.Н., Сакерин С.М., Сибир Е.Е., Смирнов А.В. Составляющие радиационного баланса и аэрозольно-оптические параметры атмосферы в Антарктике в период МПП на фоне их многолетней изменчивости // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen, 2011. С. 158–169.
15. Van den Broeke M., Reijmer C., Van den Wal R. Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations // J. of Geoph. Res. 2004. V. 109. D09103. doi: 10.1029/2003JD004394
16. Balog I., Spinelli F., Grigioni P., Caputo G., Napoli G., De Silvestri L. Estimation of direct normal irradiance at Antarctica for concentrated solar technology // Appl. Syst. Innov. 2019. V. 2. № 21. 18p. doi: 10.3390/asi2030021

REFERENCES

1. Rusin N.P. *Meteorologicheskii i radiatsionnyy rezhim Antarktiki*. Meteorological and Radiation Regime of Antarctica. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961: 448 p. [In Russian].
2. *Spravochnik po klimatu Antarktiki*. Handbook of Antarctica Climate. V. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 211 p. [In Russian].
3. Dutton E.G., Stone R.S., DeLuise J.T. South Pole surface radiation balance measurements, April 1986 to February 1988. Silver Spring, Md.: U. S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resources Laboratory, [1989]. Series: NOAA data report ERL ARL; 17: 49 p.
4. Gardiner B.G. Solar radiation transmitted to the ground through cloud in relation to surface albedo. J. Geophys. Res. 1987, 92 (D4): 4010–4018.
5. Gardiner B.G., Shanklin J.D. Measurements of solar and terrestrial radiation at Faraday and Halley. British Antarctic Survey. Cambridge, 1989: 45 p.
6. Dutton E.G., Stone R.S., Nelson D.W., Mendonca B.G. Recent interannual variations in solar radiation, cloudiness, and surface temperature at the South Pole. J. Climate. 1991, 4: 848–858.
7. Sanhill G., Cohen S. Recent changes in solar irradiance in Antarctica. J. Climate. 1997, 10 (8): 2078–2086.
8. Marshunova M.S. *Usloviya formirovaniya i kharakteristiki radiatsionnogo klimata Antarktity*. Formation conditions and characteristics of radiation climate in Antarctica. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 214 p. [In Russian].
9. Marshunova M.S., Radionov V.F. Fluctuations of integral transparency of the atmosphere in polar regions. *Meteorologiya i gidrologiya*. Sov. Meteorol. Hydrol. 1988, 11: 71–80. [In Russian].
10. Radionov V.F., Marshunova M.S., Rusina E.N., Lubo-Lesnichenko K.E., Pimanova Yu.E. Aerosol turbidity of the atmosphere in polar regions. *Fizika atmosfery i okeana*. Atmos. Oceanic Phys. 1994, 6 (30): 797–801. [In Russian].
11. *Spravochnik po klimatu Antarktity. Solnechnaia radiatsiia*. Handbook of Antarctica climate. Solar radiation. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002: 148 p. [In Russian].
12. Sibir E.E., Radionov V.F., Mishin A.A. Parameters of the variability of the characteristics of the radiation regime at the Russian Antarctic stations based on the results of the analysis of data from

the archive of actinometric measurements at these stations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research 2003, 74: 7–18. [In Russian].

13. Radionov V.F., Rusina E.N., Sibir E.E. Particularities of long-term variability of total solar radiation and atmospheric transparency characteristics in the polar areas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2007, 76: 131–136. [In Russian].

14. Radionov V.F., Rusina E.N., Sibir E.E., Sakerin S.M., Smirnov A.V. Components of the radiation balance and aerosol-optical parameters in Antarctica during IPY compared with their long-term variability. Contribution of Russia to the International Polar Year 2007/08. Meteorological and geophysical researches. Moscow: Paulsen, 2011: 158–169. [In Russian].

15. Van den Broeke M, Reijmer C., Van den Wal R. Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations. *J. Geophys. Res.* 2004, 109: D09103. doi: 0.1029/2003JD004394

16. Balog I., Spinelli F., Grigioni P., Caputo G., Napoli G., De Silvestri L. Estimation of direct normal irradiance at Antarctica for concentrated solar technology. *Appl. Syst. Innov.* 2019, 2 (21): 18 p. doi:10.3390/asi2030021



ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА КАК ИНДИКАТОРЫ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЭМИССИЙ

Ю.А. ЗАВГОРОДНЯЯ¹, О.Б. ПОПОВИЧЕВА^{2*}, В.О. КОБЕЛЕВ³, Д.П. СТАРОДЫМОВА⁴,
В.П. ШЕВЧЕНКО⁴, Н.С. КАСИМОВ¹

¹ — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² — Научно-исследовательский институт ядерной физики им Д.В. Скобельцына,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

³ — Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

⁴ — Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*olga.popovicheva@gmail.com

Резюме

Проведен анализ содержания и состава полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в твердой фракции снежного покрова Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Определено суммарное содержание десяти 3–6-ядерных ПАУ в 51 пробе, отобранной на различных расстояниях от объектов топливно-энергетического комплекса, у автодорог, вблизи населенных пунктов и в удаленных арктических районах. Суммарное содержание ПАУ варьирует от 0,3 нг/мг на о. Белый, повышенного ~5 нг/мг в районах разработки новых газовых месторождений до высоких 15 нг/мг в городах ЯНАО. Выделены характерные черты состава ПАУ под влиянием эмиссий газовых факелов в центральных районах высокой техногенной нагрузки при содержании до 144 нг/мг и обогащение низкомолекулярными ПАУ. В удаленных арктических регионах доминируют высокомолекулярные 5-, 6-ядерные ПАУ. Определены профили индивидуальных ПАУ вблизи факельных установок сжигания природного газа, транспортных магистралей и объектов жилого сектора. Процентный вклад суммы 3-, 4- и 5–6-ядерных ПАУ в суммарное содержание ПАУ указывает на степень влияния эмиссий факельных установок. Индикаторные показатели: отношения флуорантена к пирену и бенз(б)флуорантена к бенз(ghi)перилену — описывают изменение состава ПАУ в твердой фракции снега при снижении вклада факельных эмиссий. Полученные данные о влиянии эмиссий на состав ПАУ снежного покрова в зонах действия техногенных источников актуальны для полярных районов освоения новых месторождений.

Ключевые слова: Арктика, загрязнения, полициклические ароматические углеводороды, снежный покров, факельные установки.

Для цитирования: Завгородняя Ю.А., Поповичева О.Б., Кобелев В.О., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Касимов Н.С. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Ямало-Ненецкого автономного округа как индикаторы влияния источников техногенных эмиссий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 261–279. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279>.

Поступила 15.03.2021

После переработки 07.07.2021

Принята 07.09.2021

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN THE SNOWPACK OF YAMAL-NENETZ AUTONOMOUS REGION AS INDICATORS OF ANTHROPOGENIC SOURCE INFLUENCE

YULIYA A. ZAVGORODNYAYA¹, OLGA B. POPOVICHEVA^{2*}, VASILY O. KOBELEV³,
DINA P. STARODYMOVA⁴, VLADIMIR P. SHEVCHENKO⁴, NIKOLAY S. KASIMOV¹

1 — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

2 — Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

3 — Scientific center of Arctic Research, Salekhard, Russia

4 — Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

*olga.popovicheva@gmail.com

Summary

A study of the content and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the solid fraction of the snowpack is carried out on the territory of the Yamal-Nenetz Autonomous region, the north of Western Siberia. The total content of ten three-six nucleus PAHs was determined in the 51 samples collected at various distances from oil and gas producers and roads, near settlements, and in remote Arctic areas. The total PAH content varies from the lowest 0.3 ng/mg on the Bely Island, increasing to ~ 5 ng/mg in areas of new gas fields, and up to high 15 ng/mg in cities. Characteristic features of PAHs composition under the influence of gas flares emissions in central areas of high technogenic load are identified; they are a total content of up to 144 ng/mg and enrichment with low-molecular weight PAHs. In remote Arctic regions, high-molecular weight 5–6 nucleus PAHs dominate. Profiles of individual PAHs near gas flares, roads and residential sector facilities have been determined. The percentage contribution of the sum of 3, 4 and 5, 6-nucleus PAHs to the total PAH content indicates the gas flaring impact. Ratios of fluorantene to pyrene and benzene(b)fluorantene to benzene(ghi)perylene indicate changes in the snow PAHs composition with a decrease in the gas flaring contribution. The data obtained for the assessment of gas flaring emission impact on the PAHs composition in the snowpack are relevant to polar areas where new fields are being developed.

Keywords: Arctic, gas flares, pollution, polycyclic aromatic hydrocarbons, snow cover.

For Citation: Zavgorodnyaya Yu.A., Popovicheva O.B., Kobelev V.O., Starodymova D.P., Shevchenko V.P., Kasimov N.S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snowpack of Yamal-Nenetz Autonomous region as indicators of anthropogenic source influence. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 261–279. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279>.

Received 15.03.2021

Revised 07.07.2021

Accepted 07.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

Север Западной Сибири является одним из индустриально-развитых регионов. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) добывается 85 % российского и 20 % мирового природного газа [1]. Ежегодные выбросы вредных веществ от стационарных и передвижных источников в ЯНАО составляют 856 тыс. тонн [1], поэтому уровень техногенного воздействия при освоении недр является определяющим в формировании экологической обстановки на всей территории округа.

Комплексные геоэкологические исследования севера Западной Сибири в пределах ЯНАО показали сильный и умеренный уровни загрязнения углеводородами и тяжелыми металлами в локальном масштабе вблизи скважин и объектов промысловой инфраструктуры [2]. Характеристики снежного покрова вблизи объектов

топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и транспортных магистралей отличаются от удаленного малонаселенного арктического района Ямала увеличением степени закисления от нейтрального до слабокислого и кислого [3, 4].

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — класс органических соединений, состоящих из двух или более сконденсированных бензольных колец; они относятся к стойким органическим загрязняющим веществам, определяющим геохимические маркеры загрязнений [5]. ПАУ подразделяются на пирогенные, образовавшиеся в результате неполного сгорания ископаемых топлив и биомасс, и петрогенные нефтяного происхождения, а также образующиеся в диагенетических процессах (перилен). Они обладают высокой устойчивостью, токсичными, мутагенными и канцерогенными свойствами [5], что определяет актуальность исследований их распространения в окружающей среде.

Пирогенные ПАУ накапливаются в нижних слоях атмосферы в составе мелко-дисперсных аэрозолей, в наземные экосистемы они поступают в результате сухого и мокрого осаждения при доминировании последнего [6]. От локальных источников (хозяйственных объектов, автомагистралей) аэрозольные эмиссии выпадают на расстоянии сотни метров [7]. Вблизи крупных городов и промышленных районов повышенный уровень ПАУ формируется на территориях в радиусе от 10 до 50 км [8–10]. В составе аэрозолей ПАУ могут переноситься воздушными массами на сотни и тысячи километров от источника эмиссии [11]. Для 4-ядерных ПАУ фотоокислительная деградация на поверхности частиц аэрозолей происходит более интенсивно по сравнению с 5–6-ядерными [12], что приводит к накоплению высокомолекулярных полиаренов в снежном покрове при увеличении дальности переноса от источников эмиссий.

Исследования загрязнений окружающей среды продуктами антропогенной деятельности показали увеличенные концентрации органических компонентов в снежном покрове Арктики, возможно, связанные с более быстрыми климатическими изменениями в этом регионе в глобальном масштабе [13]. Высокие концентрации ПАУ характеризуют загрязнения проб снега в поселках, вблизи автодорог и промышленных предприятий на архипелаге Шпицберген [14]. Следовые количества ПАУ наблюдаются в удаленных районах высокоширотной Арктики, на Баренцево-Карском шельфе и хребте Менделеева в центральной части Северного Ледовитого океана [15].

Соотношение концентраций различных ПАУ в окружающей среде указывает на их происхождение [16]. Показатель суммарного содержания неалкилированных ПАУ широко используется для оценки уровня антропогенной загрязненности экосистемы [17]. Анализ профилей незамещенных полиаренов или их производных позволяет сравнивать источники поступления ПАУ [18]. Рассчитывают и индикаторные показатели ПАУ с разным числом ядер для оценки вклада пирогенных и петрогенных источников, в том числе автомобильного транспорта, отопительных систем, установок сжигания мусора, угля и переработки нефти [19].

По оценкам [20], до 30 % всех промышленных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу приходится на нефтегазовый сектор экономики. Эмиссии сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на российских территориях превышают все другие нефтедобывающие регионы мира; по объему сжигания ПНГ лидируют индустриальные регионы Центральной и Западной Сибири [21]. Распространение

сконденсированных на аэрозолях канцерогенных и экологически опасных соединений на большие расстояния приводит к загрязнению снежного покрова, почвы и поражению растительных сообществ [22]. Однако из-за значительной изменчивости состава нефти и технологических условий сжигания на факельных установках физико-химические свойства эмиссий остаются наименее изученными среди всех источников эмиссий горения природных топлив [23]. Аэрозольное загрязнение снежного покрова нефтегазовыми факелами остается предметом актуальных научных исследований [24]. Аэрозольный состав атмосферы Арктического региона особо чувствителен к переносу крупномасштабных эмиссий от сжигания природного газа и ПНГ [25], что ставит актуальную задачу анализа концентраций ПАУ, поступающих с техногенными выбросами и накапливающихся в твердой фракции снега, а также оценки вклада промышленных источников в состав ПАУ на основе характерных индикаторных показателей.

Данная работа посвящена анализу содержания и состава ПАУ в твердофазной фракции снежного покрова ЯНАО вблизи зон действия техногенных источников и на удалении от них. Задачами исследования являлись поиск количественных закономерностей и взаимосвязей между концентрациями ПАУ, локальными и региональными источниками, а также определение индикаторных показателей влияния эмиссий факельных установок сжигания попутного нефтяного газа объектов ТЭК.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования загрязнения снежного покрова проводились в субарктических и арктических районах ЯНАО. Климат этой территории характеризуется среднегодовой температурой -8°C и количеством осадков 450 мм, устойчивым снежным покровом с октября по май. Отбор проб снега проводился в апреле 2018 и 2019 гг., в период максимального снегонакопления перед началом таяния. Была отобрана 51 проба снега, все пробы пронумерованы по меридиану с севера на юг и нанесены на карту (рис. 1). Координаты и описание представлены в табл. 1. Выбирались места различной интенсивности техногенного воздействия локальных и региональных источников, а именно:

- вблизи факельных установок сжигания попутного нефтяного газа на разном удалении от установок (150 и 300 м, 1 и 1,5 км) (GF1–GF4);
- вблизи факельных установок сжигания попутного нефтяного газа крупнейших объектов ТЭК центральных районов ЯНАО, расположенных южнее и восточнее Ямальского полуострова и реки Оби (пробы Yar1-2, Yar3-4; NUr1-2; Gub1-5; GF1-4, TSale1-2);
- вблизи автодорог (пробы Gub5 — 20 м от полотна, Gub3-4 — 100 м от дороги);
- в 20–30 км от городов Ноябрьск (Nbr1-2) и Новый Уренгой (NUr1-2), в черте города Надым (Ndm1-4), в 2–3 км от поселков Правохеттинский (PHet1-2) и Ягельный (Yag1-2), где значительно смешанное влияние пирогенных эмиссий антропогенного генезиса, нефтедобывающих установок, комплексов подготовки газа и компрессорных станций, бытовых отопительных систем населенных пунктов, транспортных сетей, свалок твердых коммунальных отходов (ТКО);
- в удаленном от техногенных выбросов арктическом районе, на территории полуострова Ямал (Ya1, Ya2, Ya6) и острова Белый (проба iBely), а также вблизи порта Сабетта (Ya3), поселков Тадибеяха (Ya4) и Бованенково (Ya5), где недавно началась разработка газовых месторождений.

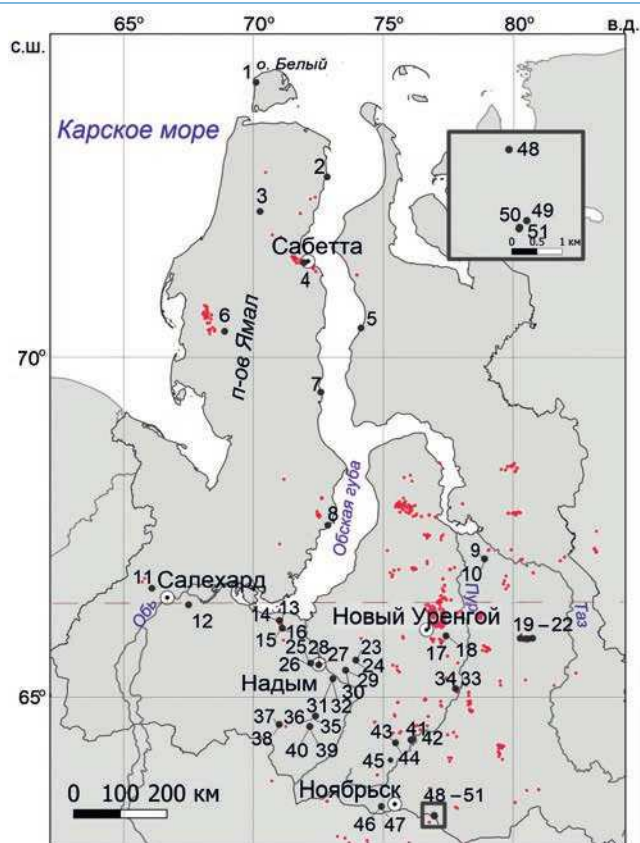


Рис. 1. Карта отбора проб снежного покрова на территории ЯНАО. Номера точек отбора соответствуют приведенным в табл. 1. Красными точками обозначены факелы сжигания природного газа на объектах ТЭК

Fig. 1. Map of snowpack sampling on the YNAO territory. The sampling point numbers correspond to Table 1. The red dots denote the natural gas flares at fuel and energy facilities

Местонахождения объектов ТЭК в период 2018–2019 гг. были определены по спутниковым данным аномального свечения в видимом и инфракрасном диапазоне, получаемым с использованием радиометра VIIRS информационной системой FIRMS [26] (см. рис. 1).

Пробы снега отбирали из прямоугольных шурфов площадью 150–1000 см² на всю глубину, исключая нижние 2–3 см на контакте с почвенным покровом, с помощью предварительно отмытого совка из химически стойкого полимерного материала. Во избежание загрязнения проб отбор производился с подветренной стороны в комбинезонах из безворсового материала и в полиэтиленовых перчатках. Методика отбора снега из шурфа обеспечивает получение пробы большого объема, что особенно важно в условиях низкой концентрации твердых частиц в удаленных районах [27], и была неоднократно опробована в природных зонах тайги и тундры [28–30]. Для количественных оценок и идентификации источников эмиссии более надежные результаты дает определение ПАУ в осадочном веществе [16].

Из пробы снега удаляли фрагменты высших растений, затем снег помещали в предварительно отмытые полимерные баки и доставляли в лабораторию. Из пробы талой воды отбирали при перемешивании аликвотные части объемом 1–2 л, которые фильтровали под вакуумом через предварительно взвешенные ядерные лавсановые фильтры с диаметром пор 0,45 мкм для дальнейшего определения концентрации твердых частиц ($C_{\text{тв}}$) и через предварительно прокаленные кварцевые фильтры Whatman QMA для изучения состава ПАУ. Таяние при комнатной температуре и последующая фильтрация позволили избежать значительных потерь компонентов твердой фракции проб снега [31].

Экстракцию ПАУ из высушенных кварцевых фильтров с осадком проводили хлороформом с использованием системы ускоренной автоматической экстракции субкритическими растворителями ASE 200 (Dionex). Растворитель отгоняли под вакуумом на роторном испарителе, концентрируя пробу до конечного объема 0,025–0,05 мл. Количественное определение ПАУ проводили после растворения пробы в ацетонитриле методом обратнофазной хроматографии высокого давления на жидкостном хроматографе Agilent 1260 (Agilent Technologies, USA) с флюориметрическим детектором и системой обработки данных ChemStation, HPChem; колонка — Zorbax Extend-C18, 5мкм, 4,6×150 мм, элюент — ацетонитрил-вода. В качестве стандарта использовали комплект аттестованных растворов ПАУ в ацетонитриле СОП 0118-03 ER-ПАН. Погрешность метода составляет 15 %.

Во взвеси снега определялось суммарное содержание десяти индивидуальных ПАУ: 3-ядерных — фенантрена, антрацена; 4-ядерных — флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, хризена; 5-ядерных — бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена, бенз(а)пирен и 6-ядерных — бенз(ghi)перилена. Количественное определение содержания 2–3-ядерных ПАУ с молекулярной массой меньше 178 не проводилось из-за крайне низкого их содержания в пробах. Рассчитывалось суммарное содержание высокомолекулярных (ВМ) 5–6-ядерных и низкомолекулярных (НМ) 3–4-ядерных ПАУ. Проведен сравнительный анализ профилей ПАУ (процентного содержания каждого индивидуального соединения от суммы всех ПАУ) для проб, отобранных вблизи определенных источников, а также в удаленных малонаселенных районах. Для анализа подобия проб твердой фракции снежного покрова по составу использован кластерный анализ, где мерой сходства служила величина $(1 - r)$, где r — коэффициент корреляции Пирсона, а расстояние между кластерами вычислялось методом минимума дисперсии с помощью алгоритма Уорда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарное содержание ПАУ

Проведенный анализ состава снежного покрова на территории ЯНАО позволяет оценить уровень загрязнений, накапливающихся в субарктических и арктических районах под действием промышленных выбросов и смешанных пирогенных эмиссий антропогенного генезиса. Концентрации твердых частиц $C_{\text{тв}}$ в талой воде (твердой фракции снега), характеризующие количество взвешенного вещества в местах отбора проб, изменялись от 0,2 до 28 мг/л (см. табл.). Значительное превышение $C_{\text{тв}}$ в 10 и более раз относительно среднего наблюдается только для наиболее загрязненных мест отбора, расположенных рядом с факельными установками на объектах ТЭК в пробах GF2 и GF3 и на расстоянии менее 20 м от автомагистрали (Gub5).

Таблица

Table

Концентрации твердой фракции снега и состав ПАУ (НМ — низкомолекулярных и ВМ — высокомолекулярных) в снеге различных районов ЯНАО

Concentration of the solid fraction and PAH composition (high and low-molecular weight) in the snowpack of different YNAO regions

№ станции	Обозначение	N°	E°	Расстояние до источника, км			С _{тв} , мг/л	НМ ПАУ, нг/мг	ВМ ПАУ, нг/мг
				Населенный пункт	Дорога	Месторождение			
1	iBely	73,34	70,09	Сабетта, 255	—	Южно-Тамбейское, 270	1,0	0,0	0,23
2	Ya1	72,25	72,83	Сабетта, 105	—	Южно-Тамбейское, 150	0,2	0,0	1,4
3	Ya2	71,84	70,25	Сабетта, 90	—	Южно-Тамбейское, 105	0,7	0,0	0,8
4	Ya3	71,22	71,95	Сабетта, 6	1	Южно-Тамбейское, 6	1,1	3,9	1,5
5	Ya4	70,39	74,14	Тадибейха, 0,5	—	Южно-Тамбейское, 120	0,2	0,0	0,6
6	Ya5	70,34	68,88	Бованенково, 0,16	2,5	Бованенковское, 10	1,0	1,7	0,7
7	Ya6	69,54	72,59	Сабетта, 190	—	Южно-Тамбейское, 212	0,5	0,3	0,7
9	Taz1	67,17	78,90	Тазовский, 32	0,5	Заполярье, 41	0,3	10,8	5,5
10	Taz2	67,17	78,90	Тазовский, 32	0,5	Заполярье, 41	0,4	13,3	7,0
11	Harp	66,72	66,08	Харп, 13	0,2	Ярудейское, 230	0,5	0,6	1,5
12	Slh	66,47	67,49	Салехард, 16	0,2	Ярудейское, 165	0,3	0,8	4,5
13	Yar1	66,23	71,00	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 3,5	1,5	5,3	1,7
14	Yar2	66,23	71,00	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 3,5	1,0	3,7	1,0
15	Yar3	66,11	71,11	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 10	1,1	3,5	0,8
16	Yar4	66,11	71,11	Надым, 100	0,3	Ярудейское, 10	0,8	7,1	1,3
17	NUr1	65,98	77,42	Новый Уренгой, 32	1,1	Ново-Уренгойское, 8	0,4	17,0	4,7
18	NUr2	65,98	77,41	Новый Уренгой, 32	1,1	Ново-Уренгойское, 8	0,6	11,9	5,1
23	Pang1	65,60	73,94	Пангоды, 37	0,5	Медвежье, 40	0,8	8,0	1,7
24	Pang2	65,60	73,94	Пангоды, 37	0,5	Медвежье, 40	0,5	10,1	1,5
25	Ndm1	65,55	72,20	Надым, 15	0,5	Ярудейское, 72	0,6	4,2	3,4
26	Ndm2	65,55	72,20	Надым, 15	0,5	Ярудейское, 72	1,4	0,5	1,8
27	Ndm3	65,53	72,51	Надым, 0,1	0,1	Ярудейское, 95	1,0	11,2	4,6
28	Ndm4	65,52	72,51	Надым, 0,5	0,5	Ярудейское, 95	1,6	3,1	1,6
29	PHet1	65,44	73,55	Правохеттинский, 3	0,5	Ново-Уренгойское, 146	1,0	7,2	0,8

Окончание таблицы
End of the table

№ станции	Обозначение	N°	E°	Расстояние до источника, км			С _{пр} , мг/л	НМ ПАУ, нг/мг	ВМ ПАУ, нг/мг
				Населенный пункт	Дорога	Месторождение			
30	PHe2	65,44	73,55	Правохеттинский, 3	0,6	Ново-Уренгойское, 146	0,6	9,6	1,4
32	Ndm6	65,30	73,06	Надым, 35	0,8	Ярудейское, 134	0,6	15,3	4,4
33	TSale1	65,14	77,78	Тарко-Сале, 25	0,8	Западно-Таркосалинское, 5,8	0,7	6,6	4,2
34	TSale2	65,14	77,78	Тарко-Сале, 25	0,8	Западно-Таркосалинское, 5,8	0,8	3,2	2,3
35	Yag1	64,69	72,38	Ягельный, 2	1	Средне-Хулымское, 58	0,7	6,6	2,7
36	Yag2	64,69	72,38	Ягельный, 2	1	Средне-Хулымское, 58	0,5	21,5	4,9
37	Long1	64,55	70,99	Лонтоган, 26	0,5	Средне-Хулымское, 12	0,8	18,6	5,0
38	Long2	64,55	70,99	Лонтоган, 26	0,5	Средне-Хулымское, 12	0,5	26,6	4,4
39	Yag3	64,52	72,17	Ягельный, 23	0,5	Средне-Хулымское, 44	0,6	12,8	4,6
40	Yag4	64,52	72,17	Ягельный, 23	0,5	Средне-Хулымское, 44	0,4	11,6	3,3
41	Gub1	64,30	76,11	Губкинский, 23	0,5	Аркатойский, 0,5	1,0	18,2	3,8
42	Gub2	64,30	76,11	Губкинский, 23	0,5	Аркатойский, 0,4	1,0	4,5	4,1
43	Gub3	64,29	76,06	Губкинский, 26	0,1	Аркатойский, 3,5	0,9	12,1	3,8
44	Gub4	64,29	76,06	Губкинский, 26	0,1	Аркатойский, 3,5	2,3	4,7	1,4
45	Gub5	64,25	75,47	Губкинский, 50	0,02	Аркатойский у, 21	28,0	4,4	1,9
46	Nbr1	63,15	74,92	Ноябрьск, 24	0,5	Новотодний, 92	0,8	10,1	4,7
47	Nbr2	63,15	74,92	Ноябрьск, 24	0,5	Новотодний, 92	0,9	7,6	5,5
48	GF4	63,00	76,33	Ноябрьск, 75	0,3	Факел ПНГ, 1,5	1,2	87,8	56,8
49	GF1	62,97	76,33	Ноябрьск, 75	1,1	Факел ПНГ, 0,1	1,4	10,7	4,9
50	GF2	62,97	76,33	Ноябрьск, 75	1,2	Факел ПНГ, 0,015	20,0	22,5	124
51	GF3	62,97	76,33	Ноябрьск, 75	1,2	Факел ПНГ, 0,03	13,8	53,9	41,9

На полуострове Ямал с низким уровнем техногенной нагрузки (кроме Ya3 и Ya5) НМ ПАУ оказались ниже чувствительности метода определения, а ВМ ПАУ обнаружены при концентрациях 0,28 нг/мг (см. табл.). В районах, расположенных южнее и восточнее Ямальского полуострова и р. Оби, твердая фракция снега обогащена НМ ПАУ, что указывает на высокий вклад локальных источников и ближнего переноса [16].

Суммарное содержание ПАУ в твердой фракции снежного покрова отражает влияние техногенных источников. Общим признаком проб, отобранных в малонаселенной арктической зоне на полуострове Ямал (Ya1-2, Ya4,6) и острове Белый (iBely), является относительно невысокое содержание ПАУ (0,3–1,4 нг/мг). В районах разработки новых газовых месторождений: вблизи порта Сабетта (Ya3) и поселка Бованенково (Ya5) — содержание ПАУ повышается до 2–5 нг/мг. Подобные величины наблюдались также в зонах антропогенного влияния городов: Харп (Harp), Салехард (Slh) и Надым (Ndm1, Ndm2,4). Высокие, более 15 нг/мг, значения были зафиксированы вблизи автомобильных дорог (Gub3, Ndm3), полигона ТБО (Yag2) и компрессорной станции (Ndm6).

Распределение полей аэрозольного загрязнения снежного покрова вокруг нефтегазовых факелов определяется турбулентным режимом ветра в этой области [24]. Самым высоким содержанием (350 нг/мг) характеризуется проба GF1, отобранная на расстоянии менее 100 м от факельной установки сжигания ПНГ. На расстоянии более 1 км от того же объекта в пробе GF4 содержание ПАУ падает до 144 нг/мг. Σ10ПАУ на расстоянии 3,5–10 км от месторождений Западно-Таркосалинского (TSale1,2) и Ярудейского (Yar1,4) варьируется в диапазоне 5–10 нг/мг. На сходном расстоянии от Ново-Уренгойского (NUr1,2) и Средне-Хулымского (Long1,2) месторождений содержание ПАУ в 2–3 раза выше из-за разницы в преобладающем направлении ветра в месте отбора. Тазовский район оказывается в зоне влияния атмосферного переноса эмиссий крупного газового месторождения Заполярное, расположенного на 41 км южнее, что приводит к накоплению ПАУ до 20 нг/мг в пробах Taz1,2 (см. табл.).

Состав ПАУ

Процентное содержание индивидуальных соединений от суммы всех ПАУ вблизи источников эмиссий определяет их профиль (рис. 2). Профиль ПАУ проб GF2, GF3 и GF4, отобранных вблизи факельных установок, выражается в высокой доле пирена (25–30 %), бенз(ghi)перилена (20–25 %), бенз(а)пирена (5 %) при относительно низком содержании фенантрена и флуорантена (рис. 2a). Такой состав ПАУ характерен для источников бытовых пирогенных эмиссий [17, 32].

В пробах Gub3-5, отобранных рядом с автодорогами Сургут–Салехард и Муравленко–Губкинский и находящихся на больших расстояниях (26–50 км) от месторождения Губкинское, снижается доля бенз(ghi)перилена и повышается доля бенз(b)флуорантена (рис. 2б). Доминирование фенантрена в твердой фазе транспортных выхлопов характерно для бензиновых и дизельных двигателей [18]. Высокое содержание фенантрена и флуорантена, а также преобладание среди ВМ ПАУ бенз(b)флуорантена типично для выхлопов автомобильного транспорта и выбросов мазутных котельных [16]. Подобный профиль ПАУ определен на расстояниях порядка 100 км от Ярудейского (Ndm3) и Ново-Уренгойского месторождений (Phet2), где кроме дальнего переноса влияют эмиссии близкорасположенных поселков, что выражается в повышенном вкладе в состав ПАУ таких соединений, как флуорантен и пирен (рис. 2в). В горо-

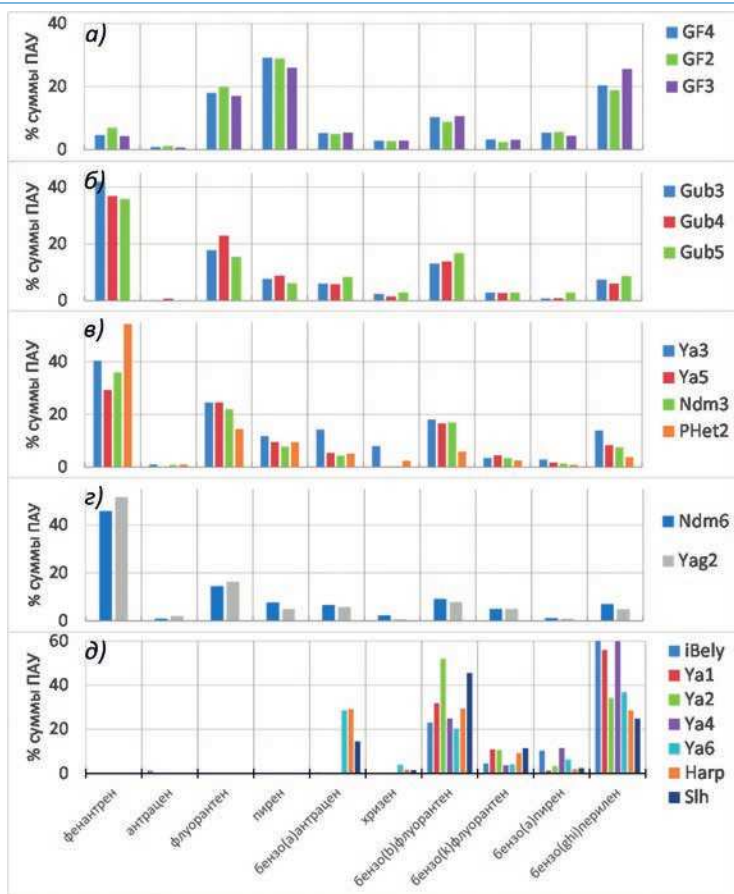


Рис. 2. Состав ПАУ твердой фракции снежного покрова.

а) — в зоне интенсивного действия факелов сжигания газа; б) — рядом с автодорогами Сургут–Салехард и Муравленко–Губкинский; в) — около населенных пунктов Надым, Правохеттинский, Сабетта, Бованенково; з) — около компрессорной станции и полигона ТКО; д) — на о. Белый, полуострове Ямал и на территории Обской губы

Fig. 2. PAH profiles of the snowpack solid fraction.

а) in the region of gas flare impact; б) near Surgut-Salekhard and Muravlenko-Gubkinsky highways; в) near Nadym, Pravokhetinsky, Sabetta, Bovanenkovo settlements, з) near a compressor station and solid waste landfill, and д) on Bely island, Yamal Peninsula and Ob Bay territory

дах одним из основных источников полиаренов является транспорт, но его влияние диагностируется слабее из-за наличия значительного количества городских эмиссий, включая отопительные системы различной крупности. Для городских территорий характерна высокая неоднородность накопления загрязнений в снеге, подобно полученным для пробы Ndm3, отобранной в г. Надым (рис. 2в), где на состав ПАУ влияет наличие множественных смешанных источников загрязнения. Высокое содержание фенантрена может определяться не только транспортной активностью, но и работой дизельных генераторов и сжиганием бытовых отходов [33].

Появление в составе ПАУ высоких концентраций фенантрена и антрацена характерно для мест отбора проб Ya3 и Ya5 рядом с недавно освоенным Южно-Тай-

бейским газовым и Бованенковским газоконденсатным месторождениями (рис. 2в). Эти пробы характеризуются увеличенной индустриальной нагрузкой на фоне общего низкого уровня загрязнения снежного покрова района и близостью населенных пунктов. Рядом с компрессорной станцией Ndm6 и полигоном ТКО Yag2 получено наиболее заметное преобладание фенантрена — до 50 % от суммы ПАУ (рис. 2г).

В зоне с низким уровнем техногенной нагрузки характерно практически полное отсутствие 3- и 4-ядерных ПАУ (рис. 2д). Содержание высокомолекулярных ПАУ в местах отбора проб на острове Белый и на полуострове Ямал (кроме Ya3 и Ya5)

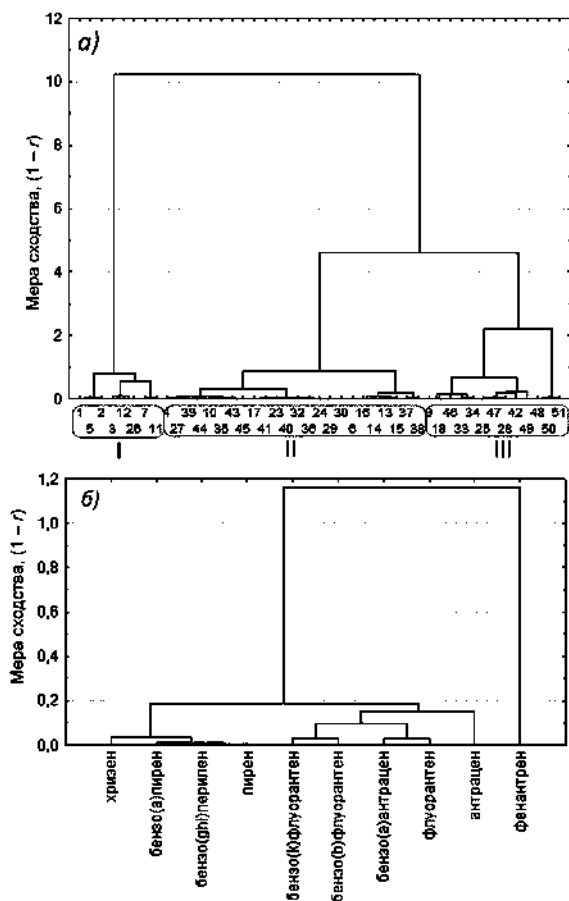


Рис. 3. Группировки ПАУ по результатам кластерного анализа индивидуальных соединений, мера сходства корреляционного анализа $(1 - r)$ с кластеризацией *а)* состава ПАУ по местам пробоотбора и *б)* индивидуальных ПАУ. Классификация мест пробоотбора: I — удаленные от источников, II — находящиеся под влиянием многих источников техногенных эмиссий, III — под влиянием факельных эмиссий. Цифры на оси x означают номера мест отбора, указанных в табл. 1

Fig. 3. PAH grouping based on cluster analysis, linkage distance of cluster analysis based on *a)* PAH composition in snow sampling sites, I — remote from sources, II) mixed impact of numerous technogenic emissions, and III) under gas flaring emissions (the numbers on the axis x denote sites of sampling indicated in Tabl.1, and *б)* individual PAHs.

составляет 70–100 % преимущественно за счет вклада бенз(b)флуорантена и бенз(ghi)перилена. Общими признаками для этих мест является удаленность от источников интенсивных эмиссий хозяйственной деятельности центрального района ЯНАО и объектов ТЭК. Высокое содержание бенз(ghi)перилена в снеге для территорий, отдаленных от техногенных источников полиаренов, отмечено в работах [34, 35]. 4-ядерные ПАУ бенз(a)антрацен и хризен присутствуют в пробах Hap₉ и Slh, расположенных ближе к индустриальным территориям Обской губы (рис. 2d).

Характерные особенности ПАУ в твердой фракции снежного покрова определяются результатами кластерного анализа (рис. 3). По составу ПАУ все места отбора объединяются в три кластера: в первом (I) группируются отобранные в удаленных малонаселенных районах, второй (II) включает места, находящиеся под влиянием смешанных пирогенных эмиссий антропогенного генезиса, источниками которых могут являться сжигание угля и мазута в котлах мелких и крупных отопительных систем, выхлопы автотранспорта, выбросы работающих генераторов и компрессорных станций, сжигание древесины и бытового мусора в жилом секторе (рис. 3a). Остальные места отбора представляют третий (III) кластер наиболее заметного влияния факельных эмиссий в районах высокой техногенной нагрузки, расположенных южнее и восточнее Ямальского полуострова и реки Оби, где наблюдается более высокая плотность объектов ТЭК (см. рис. 1).

При проведении анализа по индивидуальным ПАУ в кластер объединяются пирен, бенз(ghi)перилен и бенз(a)пирен, концентрации которых в снеге в зоне действия факельных эмиссий максимальны (рис. 3b). Бензфлуорантен и флуорантен объединяются в другой кластер, что указывает на их поступление из источников, отличных от выбросов факелов. Наименее связанным с другими ПАУ оказался фенантрен, на концентрацию которого может влиять не только тип источника, но и процессы трансформации.

Показателем значительного влияния эмиссий факельных установок, определяющим группу (1), является доминирование 4-ядерных при относительно невысоком содержании 3-ядерных полиаренов (рис. 4). При ослаблении факельных эмиссий по мере удаления от объектов ТЭК наблюдается изменение относительного содержания суммы ПАУ. Для группы (2) с заметным влиянием факельных эмиссий в составе ПАУ наблюдается высокая доля 4-ядерных соединений. К этой группе относятся пробы, отобранные на расстоянии 1–12 км от Ново-Уренгойского, Западно-Таркосалинского, Средне-Хулымского и Аркатойского газоконденсатных месторождений. На загрязненность проб Ya3 и Ya5 на полуострове Ямал влияют эмиссии Бованенковского и Южно-Тамбейского месторождений. Для группы (3) определяется слабое влияние факельных эмиссий объектов ТЭК, при этом в накоплении ПАУ играет роль дальний перенос, что выражается в снижении доли 4-ядерных полиаренов по сравнению с 5, 6-ядерными. Среди проб этой же группы находятся Taz1 и Taz2, отобранные на расстоянии 41 км от месторождения Заполярное. Места отбора группы (4), отнесенные к зоне влияния смешанных антропогенных эмиссий, объединяет доминирование в твердых выпадениях 3-ядерных ПАУ. Для слабого техногенного воздействия преимущественно в удаленных арктических регионах для группы (5) характерна высокая, вплоть до 100 %, доля высокомолекулярных 5, 6-ядерных ПАУ. Таким образом, суммарное содержание и состав ПАУ в твердой фракции снежных проб двухлетнего отбора, проведенного на различных расстояниях от объектов нефтегазодобывающего комплекса, у автодорог, вблизи населенных пунктов и в удаленных арктических районах, отражают геопространственное распределение техногенных эмиссий.

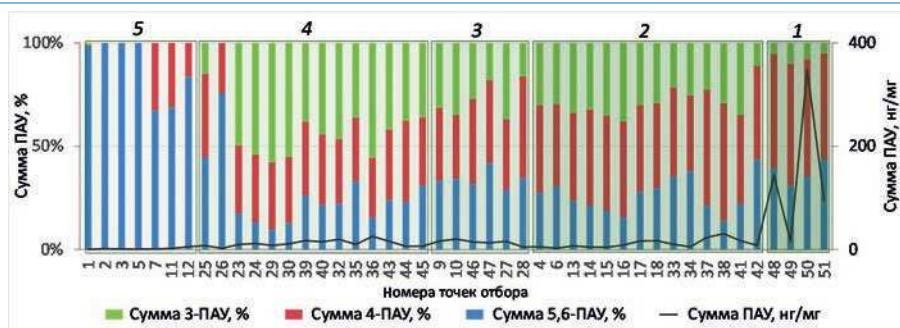


Рис. 4. Вклад суммы 3-, 4- и 5-, 6-ядерных ПАУ в их суммарное содержание: 1) влияние факельных выбросов; 2) заметное влияние факельных выбросов; 3) слабое влияние факельных выбросов; 4) влияние смешанных эмиссий и 5) слабое техногенное воздействие. Кривой отмечена сумма ПАУ (нг/мг) твердой фракции снега

Fig. 4. Percentage contribution of the sum of 3, 4 and 5, 6-nucleus PAHs to the total content of PAHs in snow sampled at sites 1) near gas flares; under 2) a noticeable impact of gas flare emissions and 3) weak impact of flare emissions as well as under 4) mixed source impact and 5) weak technogenic impact. The line presents the sum of PAHs

Индикаторные показатели ПАУ

Проведенный поиск количественных закономерностей и взаимосвязей между концентрациями индивидуальных ПАУ дает возможность определить индикаторные показатели. В расчетах индикаторных показателей ПАУ используют разные соотношения НМ и ВМ ПАУ и для полиаренов с разным числом колец [9, 10, 16, 19]. Среди НМ ПАУ отношение концентраций 4-ядерных флуорантен к пирену является более чувствительным индикатором источника поступления полиаренов в промышленных районах по сравнению с отношением 3-ядерных изомеров фенантрена к антрацену, так как пара флуорантен и пирен более стабильна в широком диапазоне концентраций в аэрозольных эмиссиях различных источников [17]. Величины индексов для пирогенных источников определяются типом сжигаемого топлива [19]. Так, отношение бенз(а)пирена к бенз(ghi)перилу ниже 0,6 указывает на выбросы автотранспорта, а выше 0,6 — на стационарные источники [19].

Поскольку в профиле состава ПАУ снежного покрова под влиянием факельных эмиссий доминируют пирен и бенз(ghi)перил, они используются в качестве соединений, определяющих характерные для данного источника соотношения НМ и ВМ ПАУ. Для определения индикаторных показателей, которые наилучшим образом описывают изменения состава ПАУ в твердой фракции снега при снижении вклада факельных эмиссий, рассчитывали отношения разных ВМ ПАУ. Наилучшая корреляция была получена для бинарных индикаторных показателей: отношения флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилу. Были выделены группы, для которых состав полиаренов определяется степенью влияния источника факельного сжигания (рис. 5). Оба индикаторных соотношения имеют низкие значения $\sim 0,6$ вблизи факельных установок объектов ТЭК (группа 1). При ослаблении влияния факельных эмиссий (группа 2) и увеличении расстояния до месторождения и объектов ТЭК отношение флуорантена к пирену повышается до значений порядка 1 за счет вклада других пирогенных источников поступления ПАУ. Одновременно для высокомолекулярных ПАУ в составе снега снижается доля бенз(ghi)периле-

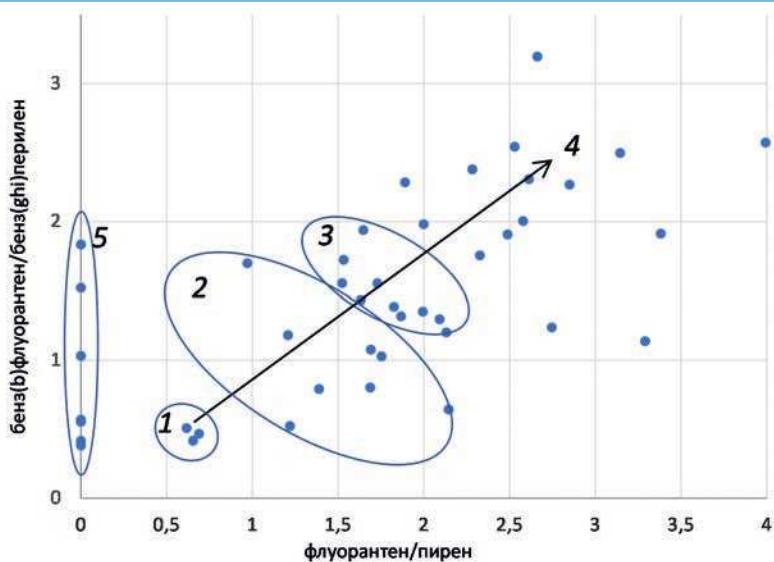


Рис. 5. Индикаторные показатели ПАУ в пробах твердой фракции снега, отобранных в местах: 1) влияния факельных выбросов; 2) заметного влияния факельных выбросов; 3) слабого влияния факельных выбросов; 4) смешанного воздействия и 5) слабого техногенного воздействия. Стрелкой показано изменение индикаторных показателей при снижении вклада факельных эмиссий

Fig. 5. Diagnostic indicators of PAHs in snow showing 1) the impact of gas flaring; 2) noticeable impact of gas flaring; 3) weak impact of gas flaring; 4) mixed source impact, and 5) weak technogenic impact. The arrow shows the indicator change with a decrease in flare emissions contribution

на, а отношение бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену повышается. В местах, отнесенных к области влияния смешанных эмиссий (группа 4), величины обоих индикаторных соотношений превышают 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для центральных районов ЯНАО содержание и состав ПАУ в твердой фракции снежного покрова определяются наличием загрязнения, сформированного действием источников техногенных эмиссий, в том числе эмиссий факельного сжигания попутного газа. Высокая плотность источников приводит к накоплению преимущественно низкомолекулярных ПАУ. Влияние выбросов факельных установок отличается от других типов эмиссий преобладанием пирена, бенз(ghi)перилена и бенз(a)пирена, суммарное содержание ПАУ в твердой фракции снега вблизи источника увеличивается до 350 нг/мг. Отношения флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену при значениях 0,6 идентифицируют влияние эмиссий факельных установок сжигания попутного газа. По мере удаления от объектов ТЭК и приближения к автодорогам и населенным пунктам повышается доля бенз(b)флуорантена, фенантрена и флуорантена. При ослаблении влияния факельных эмиссий наблюдается изменение относительного содержания суммы ПАУ, снижается доля 4-ядерных полиаренов по сравнению с 5-, 6-ядерными. Отношение флуорантена к пирену и бенз(b)флуорантена к бенз(ghi)перилену в местах влияния смешанных эмиссий превышает 2. Снежный покров удаленных арктических районов находится под воздействием переноса техногенных эмиссий. Состав ПАУ на территории полуострова Ямал и острове Белый

характеризуется низким, не более 2 нг/мг, суммарным содержанием ПАУ, профиль которого представлен высокомолекулярными 5–6-ядерными полиаренами. Появление в составе твердой фракции снега 3-, 4-ядерных ПАУ в районах освоения новых месторождений зоны указывает на повышенный уровень техногенной нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы в качестве значимых показателей возрастающего влияния развивающихся объектов ТЭК на экологию арктической части Западной Сибири.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-60-084, а также в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Funding. The work was carried out with the financial support of RFFI in the framework of project No. 18-05-60-084. The study was carried out as part of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes”.

Благодарности. Авторы выражают благодарность канд. геол.-минерал. наук А.Н. Новигатскому (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН) за обучение методике отбора проб.

Acknowledgments. The authors thank A.N. Novigatsky (P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences) for providing a method for snow cover sampling.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2019 году. URL: <https://dprg.yanao.ru/documents/active/74512/> (дата обращения 30.01.2021).
2. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в ЯНАО // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2012. № 4. С. 86–100.
3. Кобелев В.О., Поповичева О.Б., Шинкарук Е.В., Агбалян Е.В., Колесников Р.А., Новигатский А.Н. Кислотность атмосферных осадков зимнего периода на территории районов Ямало-Ненецкого автономного округа с различной антропогенной нагрузкой // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1 (102). С. 81–88.
4. Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. V. 192. P. 215–229. doi: 10.1007/s10661-020-8179-4
5. Ravindra K., Mittal A.K., Van Grieken R. Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review // Reviews on Environmental Health. 2001. V. 16. P. 169–189. doi: 10.1515/REVEH.2001.16.3.169
6. Baek S.O., Field R.A., Goldstone M.E., Kirk P.W., Lester J.N., Perry R. A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, fate and behavior // Water, Air and Soil Pollution. 1991. V. 60. P. 279–300. doi:10.1007/BF00282628
7. Kokovkin V.V., Raputa V.F., Morozov S.V., Yaroslavl'tseva T.V. Polyaromatic hydrocarbons in the vicinity of the major highways of Novosibirsk // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. № 24. P. 491–497. doi: 10.15372/KhUR20160409

8. Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V., Yaroslavl'tseva T.V. Organic carbon in the city territories of the south of West Siberia // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016. Т. 24. С. 483–489.
9. Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Лобанов А.А. Индикационное значение соотношений полициклических ароматических углеводородов в системе снег-почва при разных условиях землепользования // *Вестник Московского университета. Сер. 5: География*. 2017. № 5. С. 24–31.
10. Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S. Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 490. P. 36–39. doi:10.1134/S1028334X20010031
11. Dat N.-D., Chang M.B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 609. P. 682–693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.204
12. Gouin T., Wilkinson D., Hummel S., Meyer B., Culley A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in air and snow from Fairbanks, Alaska // *Atmospheric Pollution Research*. 2010. V. 1. P. 9–15. doi: 10.5094/APR.2010.002
13. Barbante C., Spolaor A., Cairns W.R., Boutron C. Man's footprint on the Arctic environment as revealed by analysis of ice and snow // *Earth Sci. Rev.* 2017. № 168. P. 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.010>.
14. Abramova A., Chernianskii S., Marchenko N., Terskaya E. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow particulates around Longyearbyen and Barentsburg settlements, Spitsbergen // *Polar Rec. (Gr. Brit)*. 2016. V. 52. P. 645–659. <https://doi.org/10.1017/S0032247416000243>.
15. Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P. Organic compounds and suspended particulate matter in snow of high latitude areas (Arctic and Antarctic) // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 9. P. 928. doi: 10.3390/atmos11090928
16. Semenov M.Yu., Marinaite I.I. Using the end-member mixing approach to apportion sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in various environmental compartments // *Environmental Earth Sciences*. 2016. V. 75. № 3. P. 207–218. doi: 10.1007/s12665-015-4969-3
17. Stogiannidis E., Laane R. Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: An overview of possibilities // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2015. V. 234. P. 49–133. doi: 10.1007/978-3-319-10638-0_2
18. Khalili N.R., Schefft P.A., Holsen T.M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions // *Atmospheric Environment*. 1995. V. 29. P. 533–542. doi: 10.1016/1352-2310(94)00275-P
19. Tobiszewski M., Namiesnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environmental Pollution*. 2012. V. 162. P. 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025
20. Глобальное партнерство Всемирного банка по сокращению сжигания газа в факелах (GGFR). URL: <https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction#7> (дата обращения 20.09.2021).
21. Huang K., Fu J., Prikhodko V., Storey J., Romanov A., Hodson E., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Research*. 2015. V. 120. P. 11306–11333. doi: 10.1002/2015JD023358
22. Яценко Н.Г., Сваровская Л.И., Алексеева М.Н. Оценка экологического риска сжигания попутного нефтяного газа в Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 6. С. 560–566.
23. Popovicheva O., Timofeev M., Persiantseva N., Jefferson M.A., Johnson M., Rogak S.N., Baldelli A. Microstructure and chemical composition of particles from small-scale gas flaring // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. V. 19. № 10. P. 2205–2221. doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0177
24. Рипута В.Ф. Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестности нефтегазового факела // *Вестник НГУ. Сер.: Математика, механика, информатика*. 2013. Т. 13. № 3. С. 96–102.

25. Manousakas M., Popovicheva O., Evangeliou N., Diapoulis E., Sitnikov N., Shonija N., Eleftheriadis K. Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova // *Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology*. 2020. V. 72. P. 1–14. doi.org/10.1080/16000889.2020.1803708
26. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csizsar I.A. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 143. P. 85–96. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.008
27. Новизатский А.Н., Лисицын А.П. Концентрация, состав и потоки рассеянного осадочного вещества в снежно-ледовом покрове околополюсного района Арктики // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 3. С. 449–453.
28. Jaffe D., Cerundolo B., Rickers J., Stolzberg R., Baklanov A. Deposition of sulfate and heavy metals on the Kola Peninsula // *Science of the Total Environment*. 1995. V. 160–161. P. 127–134. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04350-A.
29. Zdanowicz C., Zheng J., Klimenko E., Outridge P.M. Mercury and other trace metals in the seasonal snowpack across the subarctic taiga-tundra ecotone, Northwest Territories, Canada // *Applied Geochemistry*. 2017. V. 82. P. 63–78. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.04.011.
30. Pomeroy J.W., Davies T.D., Jones H.G., Marsh P., Peters N.E., Tranter M. Transformations of snow chemistry in the boreal forest: Accumulation and volatilization // *Hydrological Processes*. 1999. V. 13. № 14–15. P. 2257–2273.
31. Zavgorodnyaya Yu.A., Chikidova A.L., Biryukov M.V., Demin V.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate depositions and urban soils of Moscow, Russia // *Journal of Soils and Sediments*. 2019. V. 19. P. 3155–3165. doi: 10.1007/s11368-018-2067-3
32. Василевич М.И., Безносиков В.А., Габов Д.Н. Полициклические ароматические углеводороды в снеговом покрове фоновых территорий таежной зоны европейского северо-востока России. // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2014. № 4. С. 337–343.
33. Hsu W.T., Liu M.C., Hung P.C., Chang S.H., Chang M.B. PAH emissions from coal combustion and waste incineration // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. V. 318. P. 32–40. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.038
34. Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S. Input and behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable, fallow, and forest soils of the taiga zone (Tver Oblast) // *Eurasian Soil Science*. 2017. V. 50. № 3. P. 296–304. doi: 10.1134/S1064229317030139
35. Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S. Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 490. P. 36–39. doi: 10.1134/S1028334X20010031

REFERENCES

1. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Yamalo-Nenetskom avtonomnom okruge v 2019 godu*. Report on the environmental situation in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug in 2019. Available at: https://dpr.yanao.ru/documents/active/74512/ (accessed 30.01.2021).
2. Opekunov A.J., Opekunova M.G., Kukushkin S.U., Ganul A.G. Assessment of the ecological state of the natural environment of oil and gas production areas in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Vestnik SPbGU*. Bulletin of St. Petersburg State University. 2012, 7 (4): 86–100. [In Russian].
3. Kobelev V.O., Popovicheva O.B., Shinkaruk E.V., Bagbaljan E.V., Kolesnikov R.A., Novigatskij A.N. Acidity of atmospheric precipitation of the winter period in the areas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug with various anthropogenic loads. *Nauchnyy vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*. Scientific bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. 2019, 1 (102): 81–88. [In Russian].
4. Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and

industrial emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020, 192: 215–229. doi: 10.1007/s10661-020-8179-4

5. Ravindra K., Mittal A.K., Van Grieken R. Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Reviews on Environmental Health*. 2001, 16: 169–189. doi: 10.1515/REVEH.2001.16.3.169

6. Baek S.O., Field R.A., Goldstone M.E., Kirk P.W., Lester J.N., Perry R. A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, fate and behavior. *Water, Air and Soil Pollution*. 1991, 60: 279–300. doi: 10.1007/BF00282628

7. Kokovkin V.V., Raputa V.F., Morozov S.V., Yaroslavl'tseva T.V. Polyaromatic Hydrocarbons in the Vicinity of the Major Highways of Novosibirsk. *Himia v interesah ustojchivogo razvitija*. Chemistry for sustainable development. 2016, 24: 491–497. doi: 10.15372/KhUR20160409. [In Russian].

8. Raputa V.F., Kokovkin V.V., Morozov S.V., Yaroslavl'tseva T.V. Organic carbon in the city territories of the south of West Siberia. *Himia v interesah ustojchivogo razvitija*. Chemistry for sustainable development. 2016, 24: 483–489. doi: 10.15372/KhUR20160408. [In Russian].

9. Zhidkin A.P., Gennadiyev A.N., Lobanov A.A. Indication value of ratios of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow-soil system under different land use conditions. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografija*. Bulletin of Moscow University. Series Geography. 2017, 5: 24–31. [In Russian].

10. Gennadiyev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S. Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system. *Doklady Earth Sciences*. 2020, 490: 36–39. doi: 10.1134/S1028334X20010031

11. Dat N.-D., Chang M.B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Science of the Total Environment*. 2017, 609: 682–693. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.204

12. Gouin T., Wilkinson D., Hummel S., Meyer B., Culley A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in air and snow from Fairbanks, Alaska. *Atmospheric Pollution Research*. 2010, 1: 9–15. doi: 10.5094/APR.2010.002

13. Barbante C., Spolaor A., Cairns W.R., Boutron C. Man's footprint on the Arctic environment as revealed by analysis of ice and snow. *Earth Sci. Rev.* 2017, 168: 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.010>.

14. Abramova A., Chernianskii S., Marchenko N., Terskaya E. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow particulates around Longyearbyen and Barentsburg settlements, Spitsbergen. *Polar Rec. (Gr. Brit)*. 2016, 52: 645–659. <https://doi.org/10.1017/S0032247416000243>.

15. Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P. Organic compounds and suspended particulate matter in snow of High Latitude Areas (Arctic and Antarctic). *Atmosphere*. 2020, 11 (9): 928. doi: 10.3390/atmos11090928

16. Semenov M.Yu., Marinaite I.I. Using the end-member mixing approach to apportion sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in various environmental compartments. *Environmental Earth Sciences*. 2016, 75 (3): 207–218. doi: 10.1007/s12665-015-4969-3

17. Stogiannidis E., Laane R. Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular indices: An overview of possibilities. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2015, 234: 49–133. doi: 10.1007/978-3-319-10638-0_2

18. Khalili N.R., Schefft P.A., Holsen T.M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions. *Atmospheric Environment*. 1995, 29: 533–542. doi: 10.1016/1352-2310(94)00275-P

19. Tobiszewski M., Namiesnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution*. 2012, 162: 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025

20. Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). Available at: <https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction#7> (accessed 20.09.2021).

21. Huang K., Fu J., Prikhodko V., Storey J., Romanov A., Hodson E., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation. *J. Geophys. Research*. 2015, 120: 11306–11333. doi: 10.1002/2015JD023358
22. Jazshenko N.G., Svarovskaja L.I., Alekseeva M.N. Environmental risk assessment of associated petroleum gas combustion in Western Siberia. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and ocean optics. 2014, 27 (6): 560–566. [In Russian].
23. Popovicheva O., Timofeev M., Persiantseva N., Jefferson M.A., Johnson M., Rogak S.N., Baldelli A. Microstructure and chemical composition of particles from small-scale gas flaring. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, 19 (10): 22050–2221. doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0177
24. Raputa V.F. Experimental and numerical studies of aerosol impurities in the vicinity of the oil and gas flare. *Vestnik NGU. Ser. Matematika, mehanika, informatika*. Bulletin of NSU. Series: Mathematics, Mechanics, Computer Science. 2013, 13 (3): 96–102. [In Russian].
25. Manousakas M., Popovicheva O., Evangelidou N., Diapouli E., Sitnikov N., Shonija N., Eleftheriadis K. Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova. *Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology*. 2020, 72: 1–14. doi.org/10.1080/16000889.2020.1803708
26. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csizsar I.A. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*. 2014, 143: 85–96. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.008
27. Novigatsky A.N., Lisitzin A.P. Concentration, composition, and fluxes of dispersed sedimentary material in the snow and ice cover of the Polar Arctic. *Oceanology*. 2019, 59 (3): 406–410. <https://doi.org/10.1134/S0001437019030159>
28. Jaffe D., Cerundolo B., Rickers J., Stolzberg R., Baklanov A. Deposition of sulfate and heavy metals on the Kola Peninsula. *Science of The Total Environment*. 1995, 160–161: 127–134. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04350-A](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04350-A).
29. Zdanowicz C., Zheng J., Klimenko E., Outridge P.M. Mercury and other trace metals in the seasonal snowpack across the subarctic taiga-tundra ecotone, Northwest Territories, Canada. *Applied Geochemistry*. 2017, 82: P. 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.04.011>.
30. Pomeroy J.W., Davies T.D., Jones H.G., Marsh P., Peters N.E., Tranter M. Transformations of snow chemistry in the boreal forest: Accumulation and volatilization. *Hydrological Processes*. 1999, 13 (14–15): 2257–2273.
31. Zavgorodnyaya Yu.A., Chikidova A.L., Biryukov M.V., Demin V.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particulate depositions and urban soils of Moscow, Russia. *Journal of Soils and Sediments*. 2019, 19: 3155–3165. doi: 10.1007/s11368-018-2067-3
32. Vasilevich M.I., Beznosikov B.A., Gabov D.H. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of the background areas of the taiga zone of the European northeast of Russia. *Geoekologia. Inzhenernaya geologiya. Gidrologiya. Geokriologiya. Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2014, 4: 337–343. [In Russian].
33. Hsu W.T., Liu M.C., Hung P.C., Chang S.H., Chang M.B. PAH emissions from coal combustion and waste incineration. *Journal of Hazardous Materials*. 2016, 318: 32–40. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.038
34. Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S. Input and behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable, fallow, and forest soils of the taiga zone (Tver Oblast). *Eurasian Soil Science*. 2017, 50 (3): 296–304. doi: 10.1134/S1064229317030139
35. Gennadiev A.N., Zhidkin A.P., Koshovskii T.S. Factors and trends in the formation of natural–technogenic associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow–soil system. *Doklady Earth Sciences*. 2020, 490: 36–39. doi: 10.1134/S1028334X20010031

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ОКЕАНОМ В АРКТИКЕ НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Г.В. СУРКОВА*, В.А. РОМАНЕНКО

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

**galina_surkova@mail.ru*

Резюме

Исследована современная пространственная структура очагов турбулентного теплообмена над Баренцевым и Карским морями, в последние десятилетия она не претерпела существенных изменений по сравнению с серединой и второй половиной XX в. Показано, что в пределах акватории Баренцева моря пространственная изменчивость зимой в 5–10 и более раз может превышать летние значения. Определено, что годовые суммы потоков тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в 3–4 и в 5–6 раз, для потоков H и LE соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз.

Показано, что за период 1979–2018 гг. однонаправленные изменения незначительны, но значимы декадные колебания. Выявлено, что многолетние изменения суммарных турбулентных потоков над акваториями Баренцева и Карского морей довольно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов. Наибольшая реакция полей потоков тепла на изменения атмосферы характерна для изменений индексов NAO и SCAND, и их максимум локализован в районе Мурманского и Нордкапского течений. В летнее время аномалии полей всех величин выражены крайне слабо.

Ключевые слова: Арктика, Баренцево море, Карское море, океан и атмосфера, турбулентный теплообмен.

Для цитирования: Суркова Г.В., Романенко В.А. Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>.

Поступила 17.08.2021

После переработки 17.09.2021

Принята 19.09.2021

CLIMATE CHANGE AND HEAT EXCHANGE BETWEEN ATMOSPHERE AND OCEAN IN THE ARCTIC BASED ON DATA FROM THE BARENTS AND THE KARA SEA

GALINA V. SURKOVA*, VICTOR A. ROMANENKO

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**galina_surkova@mail.ru*

Summary

The paper investigates the current regime of turbulent heat exchange with the atmosphere over the Barents and Kara Seas, as well as its spatial, seasonal and temporal variability (1979–2018). It is shown that over the past decades, the areas of the location of the centers of maximum energy exchange between the sea surface and the atmosphere have not changed significantly in comparison with the middle and second half of the XX century. It was revealed that the greatest seasonal and synoptic variability of heat fluxes is typical of the central and western parts of the Barents Sea. It was found that both indicators of variability in the cold season are 2–5 and more times higher than in the warm season, and the spatial heterogeneity of the indicators of variability in winter is about twice as large as in summer. Quantitative estimates have shown that, within the Barents Sea, the spatial variability of fluxes in winter may be 5–10 times or more higher than the summer values. Above the Kara Sea, the greatest heterogeneity in the fluxes field is typical of the autumn and early winter seasons. It has been found that the annual sums of heat fluxes from the surface of the Barents Sea exceed the values for the Kara Sea, on average, 3–4 and 5–6 times, for sensible and latent heat fluxes, respectively, and in some years may differ tens of times. For the period under study, a single trend of the integral fluxes over the water area and their annual magnitude is not expressed, although there are multi-year decadal fluctuations. It is shown that, despite the significant difference in the thermal regime of the Barents and Kara seas and the lower atmosphere above them, the interannual changes in the total turbulent flows are quite well synchronized, which indicates the commonality of large-scale hydrometeorological processes in these seas, which affect the energy exchange between the seas and the atmosphere.

Keywords: Arctic, Barents Sea, Kara Sea, ocean and atmosphere, turbulent heat transfer.

For Citation: *Surkova G.V., Romanenko V.A.* Climate change and heat exchange between atmosphere and ocean in the Arctic based on data from the Barents and the Kara sea. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 280–292. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>.

Received 17.08.2021

Revised 17.09.2021

Accepted 19.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

Регион западного сектора Российской Арктики, в частности Баренцева и Карского морей, стратегически важен для нашей страны. Здесь активно ведется хозяйственная деятельность и развито судоходство. Этому способствует то, что Баренцево море не замерзает даже в самые суровые годы благодаря теплым морским течениям из Атлантики, но их влияние ослабевает с запада на восток. Архипелаг Новая Земля является естественной преградой для проникновения теплых вод в Карское море, однако влияние атлантических воздушных масс распространяется до восточных окраин Карского моря.

Перераспределение тепла между океаном и атмосферой осуществляется за счет турбулентных потоков явного и скрытого тепла. Их интенсивность влияет на усиление и ослабление циклонической деятельности в арктическом регионе, на адвекцию тепла и влаги. Аномалии температуры поверхности океана и потоков тепла влияют на активность западного переноса, наибольшая теплоотдача наблюдается обычно в тыловых частях циклонов, когда происходит адвекция сухого холодного воздуха и возникают наибольшие градиенты температуры суша — океан [1].

Пространственно-временные особенности полей потоков тепла, изменчивости и многолетних трендов в данном регионе многие десятилетия остаются объектом пристального изучения. Их исследование позволяет дополнить существующие знания об энергетике климатической системы в целом, факторах формирования общей циркуляции и региональных особенностях климата Арктики с точки зрения фундаментальной науки. В прикладном аспекте эти сведения позволяют уточнять влияние

изменений теплообмена между океаном и атмосферой на формирование опасных гидрометеорологических явлений в этом регионе, что в конечном счете позволяет разрабатывать стратегии минимизации наносимого ими ущерба.

Изучением потоков тепла над Арктическим бассейном занимались многие годы. В справочнике [2] представлено обобщение многолетних исследований пространственного распределения турбулентных потоков в Баренцевом и Карском морях. Работы последнего десятилетия дополняют эти исследования. В частности, в статьях К.А. Калавиччи [3], А.А. Сизова [4], И.В. Полякова [5] рассматривается крупномасштабный процесс взаимодействия атмосферы и океана в атлантическом секторе Арктики, сделан вывод о взаимосвязи турбулентных потоков тепла, площади ледяного покрова и характере атмосферной циркуляции, исследована связь с процессом «атлантизации» — ослаблением стратификации в океане, сокращением ледяного покрова в западных акваториях морей Российской Арктики, подверженных влиянию теплых вод Атлантики.

В настоящей работе представлены результаты исследования современной пространственной, временной и многолетней изменчивости турбулентных потоков явного тепла H и скрытого тепла LE в западном секторе Российской Арктики на основе современных данных реанализа, формирующегося с использованием ретроспективного численного моделирования процессов в атмосфере и океане и позволяющего выполнить количественные оценки гидрометеорологических показателей в тех районах, где данные наблюдений отсутствуют или же не позволяют выстроить многолетние ряды. Кроме того, для выявления связи потоков тепла и атмосферного давления с синоптическими условиями над данной акваторией были исследованы связи аномалий полей потоков тепла и атмосферного давления с индексами общей циркуляции атмосферы (ОЦА).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходного материала для расчетов были использованы данные о потоках H и LE между морем и атмосферой и атмосферном давлении на уровне моря по результатам реанализа Era-Interim [6; <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>] за период 1979–2018 гг. для территории 65–83° с.ш., 20–110° в.д. с пространственным разрешением $0,125 \times 0,125$ градусов по широте и долготе за каждые 6 ч. Расчет потоков в модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, на основе которой готовится реанализ ERA-Interim, выполняется с использованием аэродинамических балк-формул [7]. Выполненные в работе [8] сравнительные оценки разных реанализов показали хорошее соответствие модельных результатов по турбулентным потокам тепла реанализа ERA-Interim с данными независимых наблюдений. На основе данных реанализа были рассчитаны суммарные месячные и годовые потоки тепла.

Для анализа пространственной и многолетней изменчивости суммарных за месяц потоков тепла были построены диаграммы размаха («ящик с усами»). Диаграмма показывает медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы. Расстояние между верхней и нижней границами «ящика» позволяет определить разброс данных — это первый и третий квартили, соответствующие 25-му и 75-му процентиллям. Линия в середине — медиана, или 50-й процентиль. Концы «усов» — края статистически значимой выборки, определяемые формулами 1 и 2.

$$X1 = Q1 - k(Q3 - Q1) \quad (1)$$

$$X2 = Q3 + k(Q3 - Q1), \quad (2)$$

где $X1$ — нижняя граница «уса», $X2$ — верхняя граница «уса», $Q1$ — первый квартиль, $Q3$ — третий квартиль, k — коэффициент, равный 1,5 [9].

Для анализа многолетних изменений интегральных потоков H и LE были построены их многолетние ходы за период исследования, и при помощи линейной аппроксимации были рассчитаны их декадные тренды. Для статистической оценки связи потоков H и LE между морями были построены диаграммы рассеяния отдельно для каждого потока.

Для выявления связи потоков тепла с синоптическими условиями над данной акваторией были исследованы индексы общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и на основе данных по давлению рассчитаны среднемноголетние, среднесезонные и среднемесячные поля атмосферного давления на уровне моря, их временная изменчивость для исследуемой акватории. В работе использовались следующие индексы ОЦА: североатлантической осцилляции (NAO), арктической осцилляции (АО), скандинавской осцилляции (SCAND). Их средние месячные планетарные значения за период с 1979 по 2016 г. были получены по данным Национального управления океанических и атмосферных исследований США [<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections>].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Сравнение особенностей пространственного распределения потоков тепла (рис. 1) с предыдущими более ранними оценками, обобщенными по результатам многолетних исследований в [2], показывает сохранение общих закономерностей расположения очагов максимальной и минимальной теплоотдачи. Можно отметить следующие пространственные детали в распределении потоков тепла. Наибольшие потоки как H , так и LE наблюдаются над южной частью Баренцева моря, в особенности над теплыми Нордкапским и Мурманским течениями, наименьшие — над севером Баренцева моря и над Карским морем в целом, поскольку данные акватории большую часть года покрыты сплошным льдом, над которым согласно экспедиционным исследованиям, например, в работе И.А. Репиной и соавторов [10], потоки тепла минимальны над сплошным льдом, значительно больше над тонким льдом с разводьями и больше всего над открытой водой.

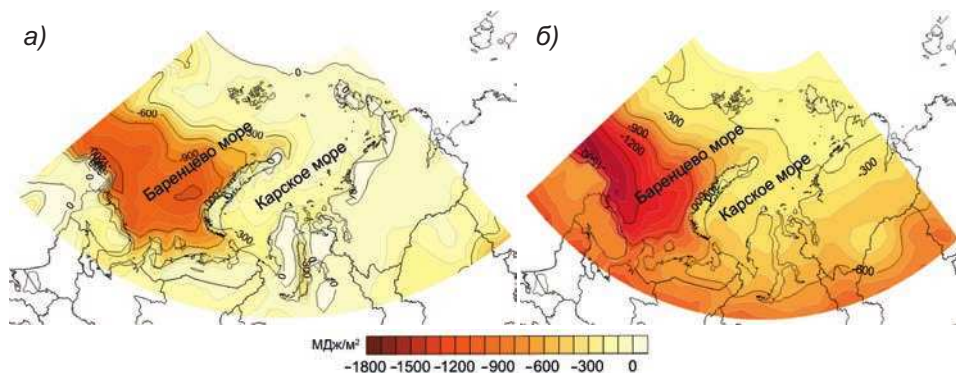


Рис. 1. Средняя годовая сумма потока явного тепла (а) и скрытого тепла (б), МДж/м²

Fig. 1. Average annual sum of sensible (a) and latent heat fluxes (b), MJ/m²

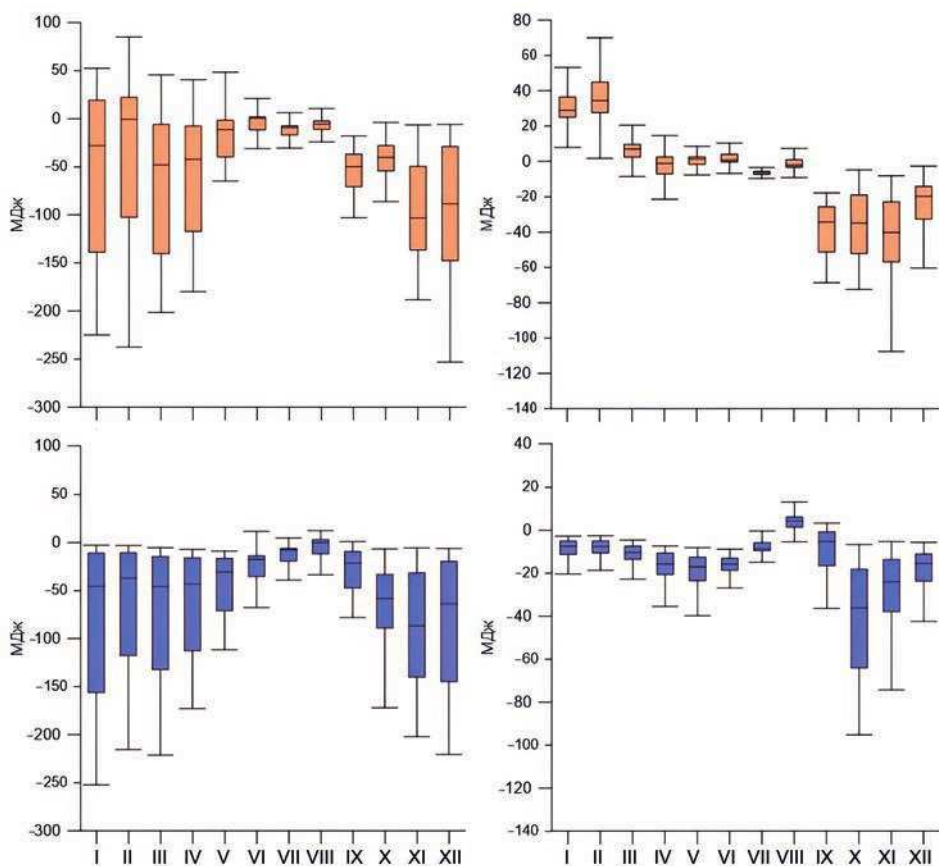


Рис. 2. Сезонный ход пространственной изменчивости потока H (наверху) и LE (внизу) на акватории Баренцева (слева) и Карского (справа) морей

Fig. 2. Seasonal changes in the spatial variability of the sensible (top) and latent heat fluxes of (bottom) in the Barents (left) and Kara (right) seas

Пространственная изменчивость турбулентных потоков (рис. 2) в Баренцевом море с января по май значительно больше, чем в Карском. Это объясняется тем, что в эти месяцы Карское море практически полностью покрыто льдом, что затрудняет теплообмен с атмосферой. В сентябре–ноябре значительная часть поверхности Карского моря освобождается ото льда, что усиливает теплообмен с атмосферой над свободной водой, поэтому пространственная изменчивость потоков выше (до $-40\ldots -60$ МДж/мес.). Направленность слабого потока H в данном море в декабре и январе из атмосферы к океану объясняется инверсионным распределением температуры воздуха в приземном слое в условиях полярной ночи. Для Баренцева моря наиболее высокая пространственная изменчивость величины турбулентных потоков характерна в декабре–марте вследствие больших различий вертикального градиента температуры в приземном слое атмосферы между теплой южной частью моря и его холодной северной частью, большую часть года покрытой льдом. Летом и осенью разница между 25-м и 75-м перцентилями на диаграммах размаха H и LE (рис. 2) незначительна, следовательно, пространственная изменчивость потоков H и LE в это

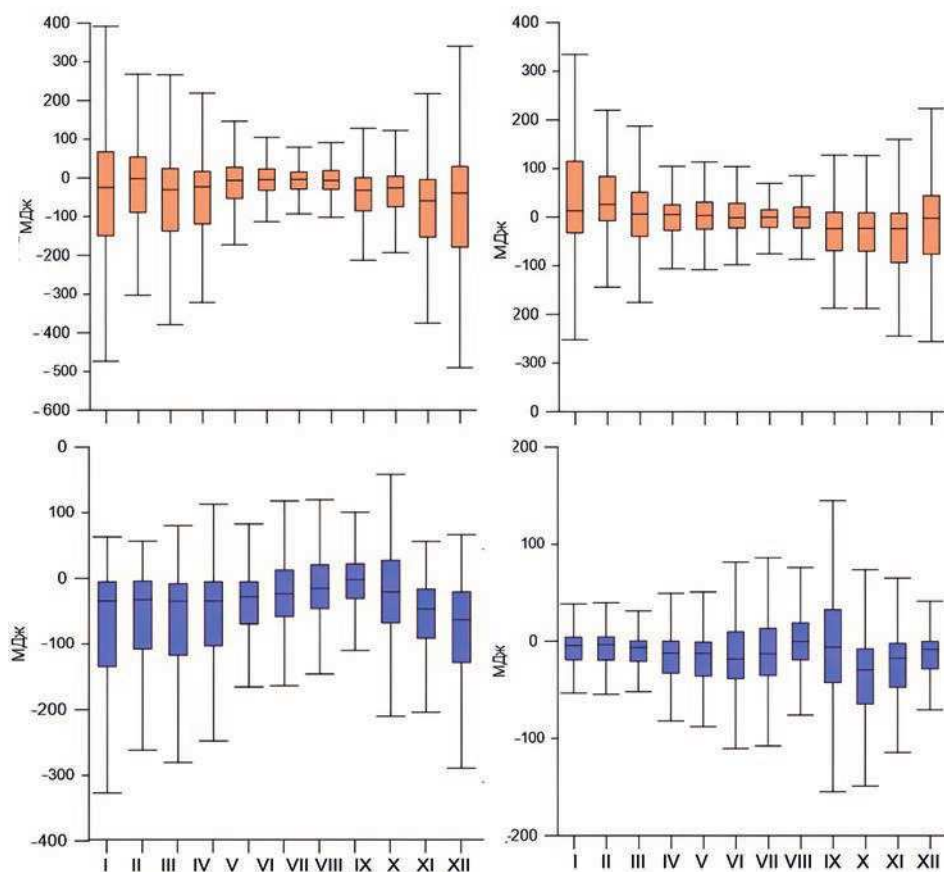


Рис. 3. Сезонный ход многолетней изменчивости потока H (наверху) и LE (внизу) на акватории Баренцева (слева) и Карского (справа) морей

Fig. 3. Seasonal changes in the long-term variability of the sensible (top) and latent heat fluxes of (bottom) in the Barents (left) and Kara (right) seas

время года в Баренцевом море невелика, что можно объяснить большей однородностью по пространству вертикального градиента температуры.

Рассмотрим многолетнюю изменчивость потоков (рис. 3). С течением времени потоки менялись довольно значительно для всех месяцев года, однако разница в изменчивости между теплым и холодным полугодиями довольно велика. Такая временная изменчивость объясняется тем, что акватория Баренцева моря расположена в зоне высокой циклонической активности, которая в наибольшей степени проявляется в холодное время года. В теплые годы с частыми и глубокими циклонами потоки турбулентного тепла наиболее велики, так как в тыловых зонах североатлантических циклонов возникают большие вертикальные градиенты температур и, следовательно, возрастают потоки тепла [1]. В наиболее холодные годы, когда большая часть моря покрывается ледяным покровом, потоки тепла небольшие. В Карском море ситуация иная. Здесь временная изменчивость потоков явного тепла невелика, поскольку в течение года над акваторией часто формируются и разрушаются температурные инверсии. Из-за доминирования в течение года туманной погоды невелика и изменчивость

потоков скрытого тепла. Многолетняя изменчивость турбулентных потоков в Карском море мало различается между месяцами, поскольку синоптическая обстановка над данным морем более однородна в течение года по сравнению с Баренцевым морем. Однако изменчивость потока явного тепла на порядок больше изменчивости потока скрытого тепла, так как море большую часть года покрыто льдом.

Для изучения многолетних изменений и процесса «атлантизации» были рассчитаны и построены многолетние изменения потоков явного и скрытого тепла для Баренцева и Карского морей (рис. 4). Данные графики отражают высокую временную изменчивость суммарных потоков за рассматриваемый период, особенно потока явного тепла (рис. 4а). В наибольшей степени она характерна для Баренцева моря, над которым от года в год синоптическая ситуация нестабильна. Над Карским морем многолетние изменения потоков в несколько раз меньше, что объясняется меньшими их значениями по сравнению с Баренцевым морем. С 1989 по 2000 г. наблюдался положительный тренд суммарного потока явного тепла для обоих морей с коэффициентом детерминации (квадрат коэффициента линейной корреляции) R^2 , равным 0,89 и 0,83 соответственно. Увеличению потока явного тепла из атмосферы к океану способствовал более быстрый рост температуры воздуха в течение данного десятилетия в приземном слое над океаном по сравнению с ростом температуры поверхности океана (ТПО) за данный период времени. Однако с 2000 по 2010 г. наблюдался отрицательный линейный тренд потока явного тепла с коэффициентом детерминации R^2 , равным 0,80 для Баренцева моря и 0,77 для Карского моря, вызванный паузой в глобальном потеплении. Причина данной паузы в работах [11, 12, 13, 14] объясняется активным накоплением тепла в данном десятилетии в глубинных частях океана, при этом рост температуры поверхности не наблюдался. Вследствие этого сократилась разница между температурой приповерхностного слоя воздуха и ТПО, суммарный поток явного тепла уменьшился. С 2014 по 2018 г. отдача тепла морской поверхностью вновь несколько уменьшается по сравнению с предыдущим десятилетием. Потеря тепла морями за счет испарения на протяжении всего периода демонстрирует заметные межгодовые колебания (рис. 4б), долгосрочные тренды невелики. Но, как и для потока явного тепла, можно отметить определенные колебания с периодом порядка 10 лет и уменьшение испарения в последнее десятилетие и в Баренцевом, и в Карском морях.

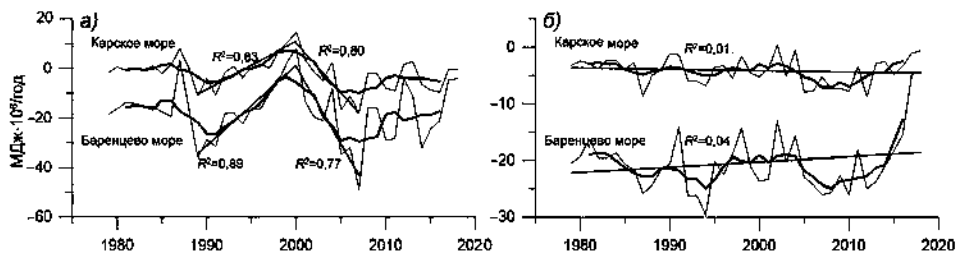


Рис. 4. Ежегодные изменения суммарного потока явного тепла (а) и потока скрытого тепла (б) над акваториями морей (тонкая линия), скользящая средняя (интервал сглаживания 5 лет), линии регрессии и соответствующий им коэффициент детерминации R^2 (прямые линии)

Fig. 4. Long-term changes in the total of sensible (a) and latent heat fluxes (b) over the seas (fine line), running average (window width 5 years), regression line and the corresponding coefficient of determination R^2 (straight line).

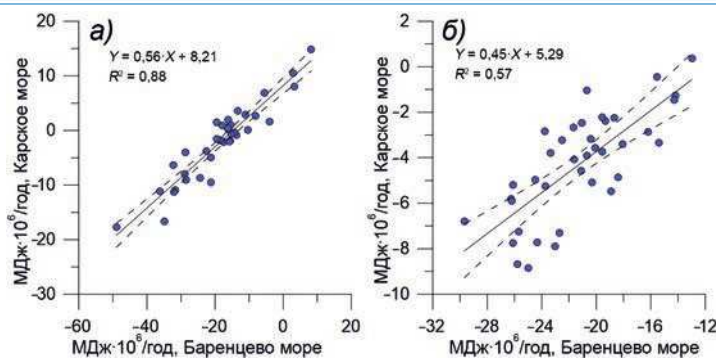


Рис. 5. Диаграмма рассеяния для годовых сумм интегральных по акватории Баренцева и Карского морей потока явного тепла (а) и потока скрытого тепла (б). Сплошной линией показана линейная аппроксимация, пунктир — 95 % доверительный интервал

Fig. 5. Scattering plot for the integral over the area of the Barents and Kara seas annual sum of heat (а) and sensible (б) fluxes. The solid line — the linear approximate, the dotted line — 95 % confidence interval

Показано, что многолетние изменения суммарных потоков тепла над Карским морем сравнительно невелики, они значительно менее выражены, чем над Баренцевым морем, тем не менее на графиках прослеживается связь в многолетнем ходе потоков явного и скрытого тепла между данными морями. Для статистической оценки этой связи была построена диаграмма рассеяния (рис. 5). Мы видим, что коэффициент детерминации R^2 линейной аппроксимации диаграммы рассеяния интегральных сумм потока явного тепла равен 0,88, потока скрытого тепла — 0,57, что отражает высокую связь изменчивости многолетних изменений их интегральных сумм между Баренцевым и Карским морями. Данная связь объясняется активной циклонической деятельностью в западном секторе Российской Арктики и доминированием воздушных потоков западного направления. Это свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов в этих морях, влияющих на энергообмен между морями и атмосферой.

Рассматриваемая территория в зимнее полугодие характеризуется большим горизонтальным контрастом атмосферного давления на уровне моря. Даже средняя многолетняя картина свидетельствует, что над Баренцевым морем, в особенности над его юго-западной частью, расположена область низкого давления, генетически связанная с атлантическими циклонами. К востоку давление растет и достигает максимума на юго-востоке. Сравнительно высокие значения давления в зимнее время здесь объясняются влиянием Сибирского антициклона, отроги которого зимой могут распространяться далеко на север и запад, достигая Карского моря. Весной Сибирский антициклон разрушается, и давление над восточной частью понижается, в то же время Исландский минимум ослабевает и усиливается влияние Азорского максимума, что сопровождается небольшим ростом давления над Баренцевым морем. В летнее время среднее поле давления над рассматриваемой территорией характеризуется относительной однородностью. Хотя ежедневная циклоническая деятельность приносит значительную изменчивость в характер погоды. Для выявления связи потоков тепла и атмосферного давления с синоптическими условиями над акваторией Баренцева и Карского морей были исследованы аномалии полей

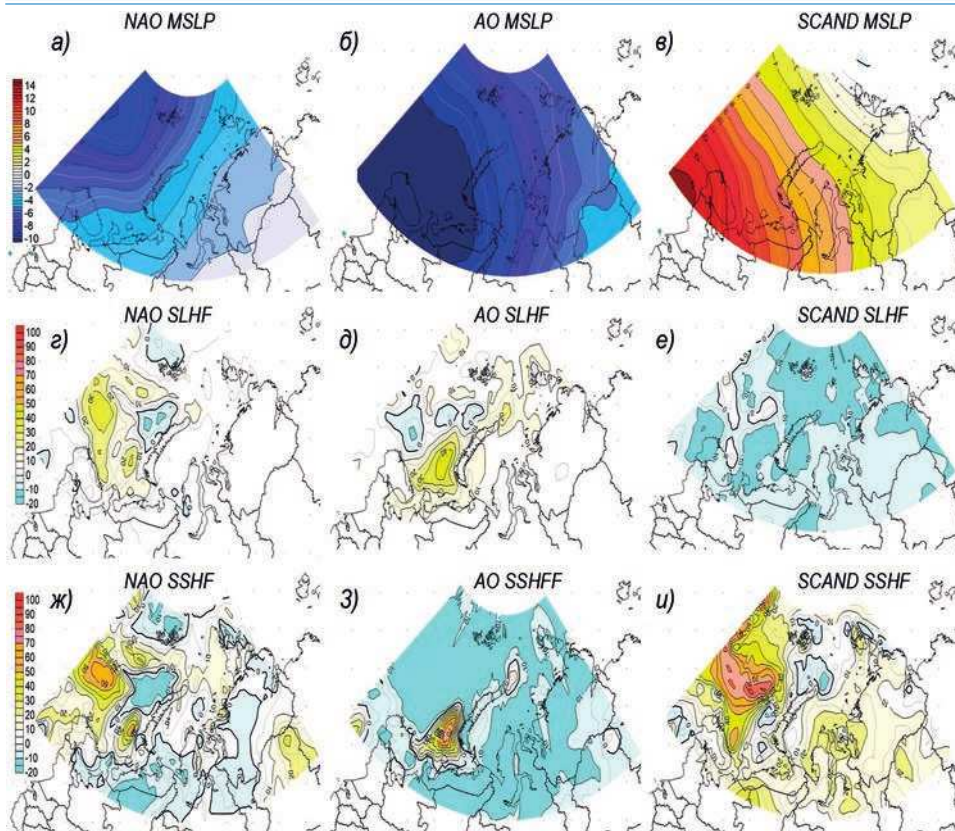


Рис. 6. Разность аномалий полей атмосферного давления и потоков тепла положительной и отрицательной фазы для февраля. Слева направо по фазам NAO, AO, SCAND. Сверху вниз — по полям давления, поток LE , поток H

Fig. 6. Difference of anomalies of fields of atmospheric pressure and heat fluxes of positive and negative phases for February. From left to right by phases NAO, AO, SCAND. From top to bottom — by fields of pressure, LE , H

атмосферного давления и потоков тепла для положительной и отрицательной фазы индексов ОЦА. Рассмотрим композитные карты разности аномалий полей атмосферного давления и потоков тепла для положительной и отрицательной фаз всех трех индексов ОЦА в зимний период. На рис. 6 представлены разности их аномалий для февраля. Наибольшая отрицательная разность характерна для индексов NAO и AO ($-8... -10$ гПа) (рис. 6а, б). Это объясняется высокой контрастностью реакции поля давления на фазу циркуляционного индекса, а также близостью данного района к среднемугодовому зимнему положению Исландского минимума, в связи с чем здесь чаще всего наблюдаются пониженные величины атмосферного давления и преобладают их отрицательные аномалии. Для индекса SCAND (рис. 6в) характерна иная ситуация. Поскольку SCAND характеризуется антициклонической циркуляцией над Скандинавией, то над юго-западными районами Баренцева моря наблюдается положительная, максимально большая разность фаз атмосферного давления, и она постепенно уменьшается при удалении от Скандинавского п-ова,

в связи с уменьшением повторяемости блокирующих антициклонов, формирующихся над Скандинавией и северо-западом России.

Рассмотрим разность аномалий полей турбулентных потоков тепла (рис. 6г–и). Как для потока H , так и для потока LE для всех трех индексов характерны следующие закономерности. Наибольшая положительная разность наблюдается над югом Баренцева моря в районе протекания Нордкапского и Мурманского течений, а также над побережьем о. Южный архипелага Новая Земля. При этом наибольшие аномалии характерны для потока H и достигают значений 90–100 для индекса SCAND (рис. 6и). Во всех остальных районах аномалии либо не выражены, либо крайне малы (0–10). Над Карским морем аномалии потоков тепла также практически не наблюдаются. Большие величины разности аномалий для всех трех индексов над южной частью Баренцева моря объясняются высокими показателями турбулентных потоков тепла над данным регионом и их наиболее высокой временной сезонной и синоптической изменчивостью здесь из-за активной циклонической деятельности зимой. Разность аномалий потока LE меньше таковой для потока H примерно в 2 раза, поскольку меньше абсолютные величины данного потока.

В летний период разности аномалий полей атмосферного давления и потоков тепла для положительной и отрицательной фаз всех трех индексов ОЦА незначительные. Это объясняется тем, что в данном сезоне абсолютные величины потоков тепла и их временная изменчивость существенно меньше, зимой. Кроме того, в летние месяцы траектории циклонов с Атлантики расположены немного севернее, и давление в их центрах повышается, в то же время Азорский антициклон усиливается, зона струйного течения смещается южнее, приток атлантического воздуха в район Баренцева моря ослабевает. Все это ведет к большей однородности полей атмосферного давления и потоков тепла летом по сравнению с зимой.

ВЫВОДЫ

1. Пространственная структура очагов максимальной и минимальной теплоотдачи над Баренцевым и Карским морями в последние десятилетия не претерпела существенных изменений по сравнению с серединой и второй половиной XX в.

2. Выявлены современные сезонные особенности пространственной изменчивости потоков H и LE , в частности, показано, что в пределах акватории Баренцева моря эта величина зимой в 5–10 и более раз может превышать летние значения, что обусловлено контрастностью температуры воды по пространству за счет теплых течений. Над Карским морем наибольшая неоднородность в поле потоков характерна для осеннего и начала зимнего сезонов.

3. Определено, что годовые суммы потоков тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в 3–4 и в 5–6 раз, для потоков H и LE соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз.

4. За период 1979–2018 гг. единый тренд интегральной по акватории годовой величины потоков H и LE статистически незначим. Тем не менее присутствуют направленные декадные изменения, в том числе наиболее явно выражены уменьшение потоков H на протяжении 1990-х гг., увеличение их в первом десятилетии XXI в. и вновь уменьшение в 2010-е гг., показано, что уменьшение турбулентных потоков происходит на фоне ослабления широтного переноса в атмосфере и увеличения площади морского льда.

5. Показано, что, несмотря на существенную разницу суммарных за год потоков тепла от поверхности Баренцева и Карского морей в атмосферу, межгодовые

изменения довольно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов в этих морях, влияющих на турбулентный энергообмен между морями и атмосферой.

6. Наибольшие аномалии полей атмосферного давления зимой характерны для индексов NAO и АО, и в наибольшей степени они характерны для Баренцева моря. Наибольшие аномалии полей потоков тепла характерны для индексов NAO и SCAND, и их максимум локализован в районе Мурманского и Нордкапского течений. В летнее время аномалии полей всех величин выражены крайне слабо.

Конфликт интересов. Отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-60083).

Благодарности. Авторы признательны коллегам, выполняющим работы по этой тематике в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Competing interests. Authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project 18-05-60083).

Acknowledgments. The authors are grateful for the support of colleagues working on this topic within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тилинина Н.Д.* Циклоническая активность Северного полушария и ее роль в формировании режимов взаимодействия океана и атмосферы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2016. 150 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева и др. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
3. *Калавиччи К.А., Башмачников И.Л.* К механизму положительной обратной связи долгосрочной изменчивости конвергенции океанических и атмосферных потоков тепла и площади ледяного покрова в Баренцевом море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 171–181.
4. *Сизов А.А., Михайлова Н.В., Баянкина Т.М.* Режимы крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана в Норвежском и Баренцевом морях // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 5. С. 615–618.
5. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. V. 356. P. 285–291.
6. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balsameda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Baljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimbeger L., Heally S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P, Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597.

7. Zhou C., Wang K. Evaluation of surface fluxes in ERA-Interim using flux tower data // *Journal of Climate*. 2016. V. 29. P. 1573–1582.
8. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic // *Journal of Climate*. 2014. V. 27. P. 2588–2606.
9. Benjamini Y. Opening the Box of a Boxplot // *The American Statistician journal*. 1988. V. 42. № 4. P. 257–262.
10. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // *Метеорологические и геофизические исследования. Сер. Вклад России в Международный полярный год 2007/08*. М.; СПб.: Paulsen AARI, 2011. С. 236–250.
11. Changyu Li, Jianping Huang, Yongli He, Dongdong Li, Lei Ding. Atmospheric warming slowdown during 1998–2013 associated with increasing ocean heat content // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019. V. 36. Is. 11. P. 1188–1202.
12. Chen X.Y., Tung K.K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // *Science*. 2014. V. 345. № 6199. P. 897–903.
13. Josey S.A. Air-sea fluxes of heat, freshwater and momentum // *Operational Oceanography in the 21st Century* / A. Schiller and G. B. Brassington, Eds. Dordrecht: Springer, 2011. P. 155–184. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0332-2_6.
14. Аксенов П.В., Иванов В.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64. № 1. С. 42–54.

REFERENCES

1. Tilinina N.D. *Tsiklonicheskaya aktivnost' severnogo polushariya i ee rol' v formirovanii rezhimov vzaimodeistviya okeana i atmosfery: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kand. fiz.-mat.nauk*. Cyclonic activity of the Northern Hemisphere and its role in the formation of modes of interaction between the ocean and the atmosphere: Dis. ... Cand. physical-mat. sciences. Moscow, 2016. 150 p. [In Russian].
2. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR*. Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. T. 1. The Barents Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions. F.S. Terzieva (Eds). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p. [In Russian].
3. Kalavichchi K.A., Bashmachnikov I.L. To the mechanism of positive feedback of long-term variability of the convergence of oceanic and atmospheric heat fluxes and the area of ice cover in the Barents Sea. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana*. *Izvestiya RAN. Physics of the atmosphere and ocean*. 2019, 55 (6): 171–181. [In Russian].
4. Sizov A.A., Mikhaylova N.V., Bayankina T.M. Regimes of large-scale interaction of the atmosphere and the ocean in the Norwegian and Barents seas. *Doklady Akademii Nauk*. *Proceed. Academy of Sciences*. 2019, 484 (5): 615–618. [In Russian].
5. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356: 285–291.
6. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balsameda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Baljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimbeger L., Heally S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P, Tavalato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011, 137: 553–597.

7. Zhou C., Wang K. Evaluation of surface fluxes in ERA-Interim using flux tower data. *Journal of Climate*. 2016, 29: 1573–1582.
8. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *J. Climate*. 2016, 27: 2588–2606.
9. Benjamini Y. Opening the Box of a Boxplot. *The American Statistician journal*. 1988, 42 (4): 257–262.
10. Repina I.A., Artamonov A.Yu., Smirnov A.S., Chechin D.G. Investigation of the interaction of the ocean and the atmosphere in polar regions within the framework of the international polar year. *Meteorological and Geophysical Research. Ser. Russia's contribution to the International Polar Year*. 2007/08. Moscow; St. Petersburg: Paulsen AARI, 2011: 236–250. [In Russian].
11. Changyu Li, Jianping Huang, Yongli He, Dongdong Li, Lei Ding. Atmospheric warming slowdown during 1998–2013 associated with increasing ocean heat content. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2019, 36 (11): 1188–1202.
12. Chen X.Y., Tung K.K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*. 2014, 345 (6199): 897–903.
13. Josey S.A. Air-sea fluxes of heat, freshwater and momentum. *Operational Oceanography in the 21st Century*. A. Schiller and G. B. Brassington, Eds. Dordrecht: Springer, 2011: 155–184. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0332-2_6.
14. Aksenov P.V., Ivanov V.V. “Atlantification” as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42–54. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54>. [In Russian].

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>

УДК 556.5



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПРИТОКА К ОЗЕРАМ АНТАРКТИЧЕСКОГО ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНА

М.Р. КУЗНЕЦОВА^{1*}, Г.В. ПРЯХИНА¹, С.Д. ГРИГОРЬЕВА^{1,2}, Э.Р. КИНЬЯБАЕВА¹

¹ — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*rotefliege@mail.ru

Резюме

Объектами исследования являются 11 водоемов антарктического оазиса Холмы Ларсеманн. Работа выполнена по материалам сезонных работ 63 — 65-й РАЭ: используются наблюдения за уровнем воды озер, аэрофотосъемки БПЛА, маршрутные обследования, приведены результаты выделения границ водосборных площадей озер. Наиболее значимыми выявленными факторами, определяющими формирование притока воды к озерам, являются метеорологические условия (количество твердых осадков, ветровой режим, температура воздуха), наличие многолетних снежников и ледниковых участков на водосборах, прорыв верхнего в системе озера. Сезонно-талый слой рыхлых отложений регулирует склоновый сток по мере протаивания и промерзания. Особенностью оазиса является то, что на формирование стока практически не влияют растительный покров и антропогенная деятельность.

Ключевые слова: озера антарктических оазисов, полуостров Брокнес, формирование стока, Холмы Ларсеманн.

Для цитирования: Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р. Факторы формирования поверхностного притока к озерам антарктического оазиса Холмы Ларсеманн // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 293–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.

Поступила 05.07.2021

После переработки 03.09.2021

Принята 13.09.2021

FORMATION FACTORS OF SURFACE INFLOW TO ANTARCTIC LAKES OF THE LARSEMANN HILLS OASIS

MARIIA R. KUZNETSOVA^{1*}, GALINA V. PRIAKHINA¹, SVETLANA D. GRIGOREVA^{1,2},
ELVIRA R. KINIABAEVA¹

¹ — St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Summary

The study aims to identify formation factors of water inflow to the Antarctic lakes of the Larsemann Hills oasis (East Antarctica). The objects of study are 11 lakes of the oasis. The analysis was performed based on the expeditionary data of the Russian Antarctic Expedition (RAE): 63rd season (23 December 2017 – 3 February 2018), 64th season (12 January 2019 – 27 February 2019), 65th season (2 November 2019 – 24 March 2020). Data of lakes water level observations, aerial photography of the unmanned aerial vehicle (UAV) and route surveys are given, the results of identifying the boundaries of the lakes catchments are presented. The factors that determine the formation of water inflow to the lakes in this region were identified based on the analysis of the materials. The most significant are the meteorological conditions, the presence of perennial snowfields and glacial areas in the catchments, and the presence of lakes that can cause outburst flood. The seasonally thawed layer also has an impact on the formation of the inflow to the lakes. The vegetation cover is not so important for inflow formation in this region due to the physical and geographical conditions. As for anthropogenic activity, it mainly affects the environmental situation of the catchments and water quality, while the anthropogenic influence on the formation of water inflow to the lakes in the oasis is limited to the territories of polar stations. The factors identified should be taken into account in the further study of hydrological processes, the creation of models that describe them, and the organization of field observations.

Keywords: Antarctic oasis lakes, Broknes Peninsula, Larsemann Hills, runoff formation.

For Citation: Kuznetsova M.R., Priakhina G.V., Grigoreva S.D., Kiniabaeva E.R. Formation factors of surface inflow to antarctic lakes of the Larsemann Hills oasis. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 293–309 [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.

Received 05.07.2021

Revised 03.09.2021

Accepted 13.09.2021

ВВЕДЕНИЕ

Формирование притока к водоему представляет собой сложный, многофакторный процесс, который зависит как от общих физико-географических особенностей района, так и от локальных условий в конкретном водосборном бассейне. К основным факторам относят климатические условия и характер подстилающей поверхности: рельеф, геологическое строение, почвы, растительность и т. д. В качестве интегральной характеристики процессов, протекающих на водосборе озера и в самом водном объекте, а также факторов, на них влияющих, рассматривается уровень воды.

Изучение региональных особенностей процессов формирования притока к озерам антарктических оазисов является одной из задач гидрологии как науки в рамках исследования гидрологического режима полярных территорий. Это продиктовано особыми физико-географическими условиями исследуемых объектов.

Гидрографическая сеть территорий антарктических оазисов представлена, как правило, непромерзающими озерами и временными водотоками, существующими только в течение теплого периода года [1]. Приток воды к озерам формируется за счет таяния ледников и снежников, расположенных на их водосборах в летний период, ограниченный 2–3 месяцами. Поступление талой воды в водоемы происходит в основном в процессе склонового стока, а также по руслам временных водотоков. Эти особенности отмечены исследователями для различных оазисов, например для оазиса Бангера [2, 3], оазиса Ширмахера [3–5], территорий Сухих Долин Мак-Мердо [6], оазиса Холмы Ларсеманн [7, 8].

В рамках настоящей статьи предлагается рассмотреть факторы, влияющие на формирование притока воды к озерам оазиса Холмы Ларсеманн. Систематическое

изучение территории этого оазиса осуществляется с 1980-х гг. как отечественными, так и зарубежными специалистами в различных областях [3]: в геологии [9–11], геокриологии [12], почвоведении [13–15], экологии [16–22], гидрохимии [23], палеолимнологии [24] и палеоклиматологии [25], гляциологии и геофизики [26, 27]. Общее физико-географическое описание оазиса и особенности антропогенной деятельности представлены в заключительном отчете XXXVII Консультативного совещания по Договору об Антарктике (КСДА) [28]. В ходе гидрологических исследований получены данные о строении озерных котловин [13, 29–31], водном балансе [32], термическом, уровне и гидрохимическом режимах водоемов [13, 29, 32, 33], времени водообмена [34], а также прорывных явлениях [32, 35]. Опубликованные материалы всесторонних исследований оазиса Холмы Ларсеманн, а также собственные результаты наблюдений позволяют выделить основные факторы, влияющие на формирование притока к озерам данного оазиса. Это представляет интерес в рамках развития теоретических представлений о природных процессах Антарктики, а также будет полезным при адаптации методик гидрологических расчетов для данного региона.

РАЙОН РАБОТ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оазис Холмы Ларсеманн расположен на побережье залива Прюдс моря Содружества. Он занимает площадь около 40 км²: два больших полуострова — Сторнес и Брокнес, 4 мыса и около 130 островов [28]. Климат на территории оазиса довольно мягкий. Согласно данным метеостанции Прогресс, среднегодовая температура воздуха составляет –9,8 °С, средняя температура воздуха теплого периода (с декабря по февраль) около 0 °С, при абсолютном максимуме +9,3 °С. Среднемесячные зимние температуры воздуха изменяются от –15 до –18 °С, при абсолютном минимуме –38,0 °С [11, 30].

На территории преобладают ветра восточного и северо-восточного направления (среднегодовая скорость около 6,7 м/с). Характерной особенностью является формирование холодных кatabатических (стоковых) ветров, скоростью более 10 м/с [11, 30].

Годовое количество суммарной солнечной радиации составляет около 3000–3200 МДж/м². При этом более половины этой величины поступает в теплый сезон — с ноября по февраль, способствуя активному снеготаянию.

Осадки в течение года выпадают преимущественно в твердом виде. Средне-многолетнее значение составляет 250 мм в водном эквиваленте снега [30].

Территория претерпела несколько структурных деформаций; горные породы представлены различными видами гнейсов [9]. Выходы скальных пород перекрыты обломочным материалом.

Для оазиса характерно чередование возвышенностей и пологих понижений типа долин, вытянутых в направлении с юго-запада на северо-восток. Холмы часто образуют подобие хребтов протяженностью несколько сотен метров. На п-ове Брокнес их высота в среднем достигает 100–120 м; наибольшая высота на полуострове 148,7 м над уровнем моря [36]. При движении с северо-востока на юг и юго-запад возрастают средние абсолютные высоты территории (от 60 до 100 м над уровнем моря), увеличивается и расчлененность рельефа (перепады высот от 50 до 80 м).

Характерной особенностью территории оазиса является наличие навесных снежников, образующихся на подветренных склонах. Большинство из них являются многолетними. Южная часть оазиса частично перекрыта ледником. Отдельные вы-

ходы скальных пород — нунатаки — обеспечивают перепады высот до 30 м. Пологое и обширное понижение приурочено к полностью перекрытому льдом озеру Болдер.

На всей территории оазиса представлено более 150 водоемов [30]. В настоящей работе рассмотрены 11 озер восточной части полуострова Брокнес. Их водосборные территории различаются по площади, рельефу, площадям снежно-ледовых участков, наличию временных водотоков (рис. 1, табл. 1).

Наименьшую площадь имеет водосбор бессточного озера Лоу, представленный выходами скальных пород, перекрытых рыхлыми отложениями; здесь располагается

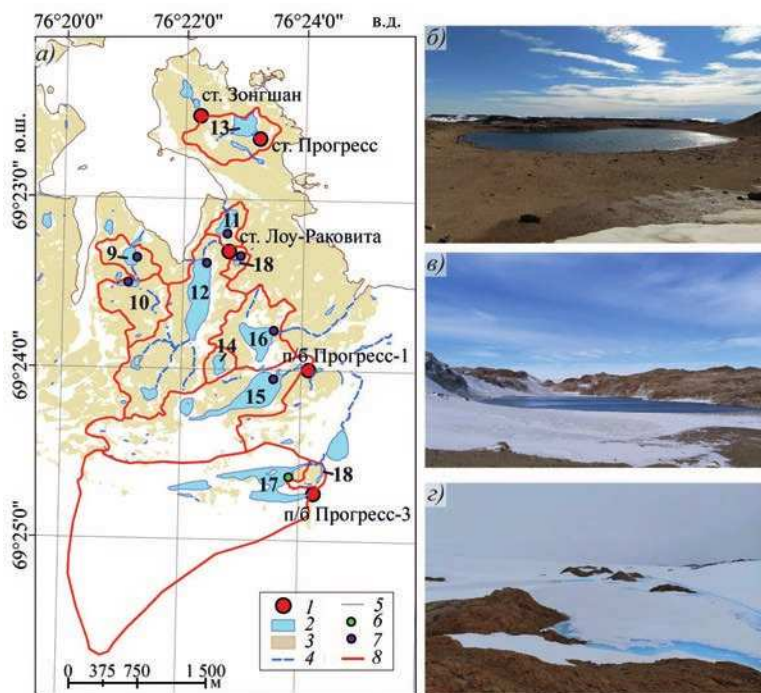


Рис. 1. Водосборы озер полуострова Брокнес: а) — карта-схема водосборов, б) — оз. Лоу, в) — оз. Скандретт, з) — оз. Болдер.

1 — станции и полевые базы, 2 — озера*, 3 — скальные породы и грунты, 4 — временные водотоки, 5 — береговая линия; 6 — речный водомерный пост, 7 — свайный водомерный пост, 8 — границы водосборов; 9 — оз. Дискашн, 10 — оз. LH-59, 11 — оз. Рейд, 12 — оз. Скандретт, 13 — оз. Степпед, 14 — оз. LH-73, 15 — оз. Прогресс, 16 — оз. Сибторп, 17 — оз. Болдер, 18 — оз. Ледяное, 19 — оз. Лоу

Fig. 1. Lake catchments of Broknes Peninsula: а) — schematic map of catchments, б) — Low Lake, в) — Scandrett Lake, з) — Boulder Lake.

1 — stations and field bases, 2 — lakes*, 3 — rocks and soils, 4 — temporary streams, 5 — coastline; 6 — gauge station with a rod, 7 — gauge station with a pile, 8 — boundaries of catchments; 9 — Discussion Lake, 10 — LH-59 Lake, 11 — Reid Lake, 12 — Scandrett Lake, 13 — Stepped Lake, 14 — LH-73 Lake, 15 — Progress Lake, 16 — Sibthorpe Lake, 17 — Boulder Lake, 18 — Ledyanoe Lake, 19 — Low Lake

* Названия водоемов приведены в соответствии с топографической картой [36]. Для водоемов, названия которых на карте не указаны, использованы названия из атласа озер [30]: LH-59, LH-73. Озеро Ледяное — временное название безымянного водоема, отсутствующего в атласе озер [31]

* The names of lakes are given in accordance with the topographic map [36]. For lakes whose names are not shown on the map, names from the atlas of lakes were used [30]: LH-59, LH-73. Lake Ledyanoe is the temporary name of a lake that was not considered in the atlas of lakes [31].

Площади снежников на водосборах рассматриваемых озер полуострова Брокнес

Table 1

Snowfields area on the catchments of catchments of the Broknes Peninsula lakes considered

Озеро	Площадь водосбора, м ²	Площадь снежников (27–28.12.2019), м ²	Доля снежников, % от площади водосбора
Лоу	34290	1413	4
ЛН-59	364536	47377	13
Сибторп	554946	330303	60
Прогресс	1241171	733964	59
ЛН-73	66553	13476	20
Рейд	87290	13456	15
Скандретт	1127510	274026	24
Дискашн	173420	56618	33
Степпед	349945	54298	16

Примечание: на водосборе озера Прогресс представлены снежники и участок ледника.

один небольшой снежник. На водосборе озера ЛН-73 также находится только один многолетний снежник, подпруживающий озеро и выполняющий функцию естественной снежно-ледовой плотины. Водосборы озера Степпед и Рейд характеризуются небольшими перепадами высот до 30 м, относительно пологими склонами и наличием нескольких (около 5) многолетних снежников. Значительную долю водосбора озера Сибторп занимают многолетние снежники, в то время как на сравнимом по величине водосборе озера ЛН-59 снежники занимают гораздо меньшую площадь. Крупные водосборы отличаются более расчлененным рельефом, большими площадями многолетних снежников. Например, на водосборе сточного озера Скандретт перепады высот составляют до 100 м, характерно наличие крутых, почти отвесных склонов, два прорывающихся озера и около 6 временных водотоков, имеющих выраженное русло. Меньший перепад высот (около 80 м) отмечается на еще более крупном водосборе озера Прогресс, который помимо снежников содержит участок ледника. Сравнительно небольшой водосбор озера Дискашн, обладающий расчлененным рельефом и перепадами высот до 50 м, включает в себя, однако, несколько отвесных склонов, образующих небольшое ущелье. В процессе прорыва могут участвовать несколько озер, образуя на этот момент системы водоемов: например, ЛН-59 — Дискашн, ЛН-73 — Прогресс — Сибторп. Водосборы озера Болдер и Ледяное расположены непосредственно на леднике; к настоящему моменту границы их водосборов определены исходя из поверхностного рельефа ледника, уточнение их положения является одной из задач дальнейших исследований оазиса; в связи с этим указанные объекты не были включены в табл. 1.

На карте-схеме водосборов (см. рис. 1а) также отмечены временные водотоки — тип водных объектов, широко распространенный в пределах оазиса. Ручьи, вытекающие из озер, имеют выраженное русло, существуют на протяжении 1–3 месяцев теплого сезона (рис. 2а). В солнечные дни на склонах можно наблюдать микроручейковую сеть, образованную в результате интенсивного таяния (рис. 2б). В оазисе также встречаются переувлажненные участки склонов, вероятно связанные с процессами протаивания многолетней мерзлоты и выходом воды на поверхность (рис. 2в).



Рис. 2. Поверхностный сток. а) — ручей из озера Сибторп, б) — талые воды, в) — переувлажненный склон

Fig. 2. Surface runoff. а) — the stream of Sibthorpe Lake, б) — melt water, в) — a very wet slope

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье использованы материалы, полученные авторами в ходе сезонных полевых работ 63–65-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в районе станции Прогресс (2017–2020 гг.). В них вошли данные наблюдений на уровневых водомерных постах на 8 озерах, маршрутные гидрографические описания водосборов 11 озер, серии аэрофотоснимков территории, полученные в течение сезона 65-й РАЭ с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа ZALA 421-08M. Полученные снимки использовались при построении ортофотоплана. Для привязки снимков на площади съемки были заблаговременно размещены опознавательные знаки, планово-высотные координаты которых были определены при помощи DGPS-комплекса EFT M2 (ООО «Эффективные технологии», Россия) (точность определения в режиме RTK в плане $8 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$, по высоте $5 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$). Полученный ортофотоплан был использован при анализе распределения снежного покрова по территории и определении его площадей на водосборах озер (табл. 1). Построение ортофотоплана, вычисление площадей водосборов и снежников осуществлялось в программе ArcGIS 10.1. Измерения уровня воды озер выполнялись на свайных и речных водомерных постах (см. рис. 1а). Посты на озерах LH-59 и Лоу были организованы в 2019–2020 гг., а посты на остальных водоемах — в предыдущие два года. Ежегодно перед началом наблюдений проводилась реорганизация постов: проверка состояния свай и рек, определение их плановых и высотных координат (последнее выполнялось при помощи уже упомянутой выше DGPS-аппаратуры с указанной точностью). Измерение уровня на водомерных постах производилось 1 раз в сутки с интервалом 1–2 суток, при отсутствии выраженной динамики уровня интервал увеличивали до 3–5 суток; в период прорыва частоту измерений увеличивали до 1 измерения в 5 минут. Не удалось зафиксировать максимальный уровень озера LH-59 в декабре 2019 г., поскольку его прорыв произошел в ночное время. На озерах Дискашн и Прогресс в 2019–2020 гг. для получения детальных данных о ходе уровня воды дополнительно был использован автоматический регистратор уровня воды «Гидрометрика-502» (интервал записи измерений 10 минут); при этом для проверки корректности данных, полученных по уровнемеру, наблюдения за уровнем воды на свайных постах продолжались. Границы водосборов на предполевом этапе работ были определены по изолиниям рельефа топографической карты [36]. Затем выделенные контуры были скорректированы с учетом фактических полевых обследований водосборов озер. Этим объясняются некоторые отличия от границ, приведенных на упомянутой топографической карте. Для анализа метеорологических характеристик использованы данные метеостанции Прогресс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.**ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ К ОЗЕРАМ**

Метеорологические условия. Климат исследуемого региона определяет сезонность формирования стока: в холодный период года (с марта по ноябрь) происходит накопление твердых осадков, а в теплый период (с декабря по февраль) в результате таяния снега, снежников и ледника образуются талые воды и формируется приток к водоемам. Метеорологические условия год от года изменяются, они оказывают влияние на стокообразование преимущественно через процессы образования и разрушения сезонного снежного покрова и таяния многолетних снежников и ледников.

Количество твердых осадков, выпадающих с марта по ноябрь и формирующих устойчивый снежный покров, во многом определяет величину объема притока к озерам. Например, зимой 2017 г. выпало около 270 мм снега в водном эквиваленте, а в последующие 2 года в 1,7 раза меньше. Это повлияло на наполнение озерных котловин: максимальные уровни воды в прорывающихся озерах в теплый период 2017–2018 гг. (летний сезон 63-й РАЭ) оказались выше, чем в 64-й и 65-й летние сезоны (2018–2020 гг.) (табл. 2).

Таблица 2

Максимальные уровни воды рассматриваемых озер полуострова Брокнес

Table 2

Maximum water levels of the Broknes Peninsula lakes considered

Период уровней наблюдений	Уровень воды, см над «0» графика (дата)			Осадки за предшествующий холодный период (февраль–декабрь), мм (год)
	Дискашн	Прогресс	Сибторп	
63-я РАЭ (23.12.2017–03.02.2018)	151 (17.01.2018)	131 (06.02.2018)	85 (06.02.2018)	270 (2017)
64-я РАЭ (12.01–27.02.2019)	—	94 (14.01.2019)	37 (14.01.2019)	158 (2018)
65-я РАЭ (08.12.2019–24.03.2020 гг.)	87 (19.12.2019)	89 (06.01.2020)	30 (06.01.2020)	156 (2019)

Примечание: наполнение озер Прогресс и Сибторп после окончания мониторинга в летний сезон 2017/18 г. продолжалось, приведены наибольшие наблюдаемые уровни. Отметка «0» графика озера Дискашн составляет 2,5 м над уровнем моря, отметка «0» графика озера озер Прогресс и Сибторп составляет 58,0 м над уровнем моря.

Особенности ветрового режима оазиса влияют на перераспределение выпадающих осадков по территории: за счет действия постоянных и часто сильных ветров одного и того же направления (преимущественно северного или северо-восточного), кататических ветров [11, 30], а также особенностей орографии снег сдувается с возвышенностей и накапливается в низинах и ущельях. Таким образом, сплошной снежный покров в оазисе не формируется. Анализ снимков БПЛА показал, что до начала таяния в середине ноября 2019 г. площадь снежного покрова на водосборах исследуемых озер (за исключением расположенных на леднике Болдер и Ледяное) не превышала 60 %. Эта региональная особенность делает невозможным применение к территории оазиса понятия «дата схода снежного покрова» — «день, когда покрытость открытой местности снегом снижается до 50 %» [37].

Влияние температур воздуха на стокообразование наиболее существенно в период разрушения снежного покрова — с декабря по февраль. Температура воздуха в течение суток принимает как положительные, так и отрицательные значения, поэтому величина средней суточной температуры может быть ниже 0°C , то есть устойчивый переход среднесуточных температур через 0°C не наступает. Поэтому в данном случае как период активного таяния и формирования притока можно рассматривать период, когда максимальные значения суточной температуры воздуха ежедневно превышают 0°C . Согласно графикам хода максимальных и среднесуточных температур воздуха (рис. 3а, б, в), в течение последних трех лет происходило смещение сроков появления дней с положительными максимальными температурами. Так, в 63-й летний сезон (2017/18) основной период таяния начался 17 декабря 2017 г., на следующий год (64-й летний сезон, 2018/19) — 8 декабря 2018 г., а в 65-й летний сезон (2019/20) еще раньше — 23 ноября 2019 г. Это обусловило более раннее наполнение водоемов, сопровождающееся повышением уровня воды, и более ранние сроки прорывов озер (рис. 3г, д).

Например, прорыв оз. Дискашн в летний сезон 63-й РАЭ произошел 22 января, а в 65-й летний сезон — 19 декабря, т. е. на месяц раньше. На оз. Сибторп в 64-й и 65-й сезоны прорывы произошли 14 и 6 января соответственно. Прорыв оз. Дискашн в 64-й летний сезон произошел до прибытия отряда в период до 14 января, а прорыв оз. Сибторп в 63-й летний сезон — после окончания сезонных работ, т. е. после 6 февраля, что подтверждает выявленную тенденцию смещения дат прорывов в указанные три года.

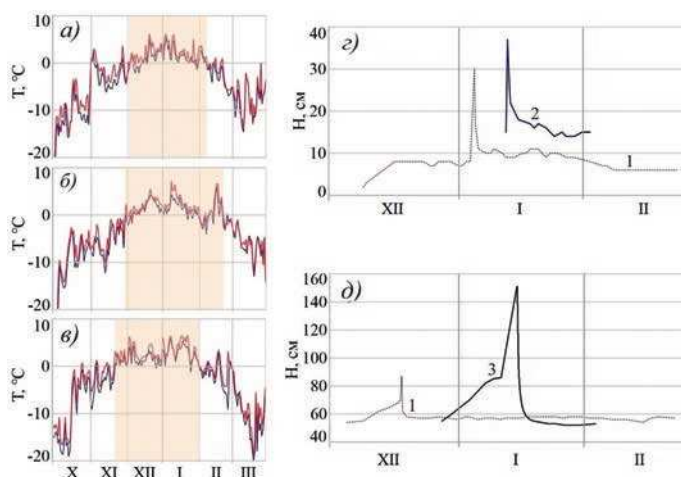


Рис. 3. Температуры воздуха и сезонный ход уровня воды озер.

Ход максимальных и среднесуточных температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за период с октября по март: а) — 2017–2018 гг., б) — 2018–2019 гг., в) — 2019–2020 гг.; ход уровня воды над «0» графика: г) — оз. Сибторп, д) — оз. Дискашн; 1 — 2019–2020 гг., 2 — 2018–2019 гг., 3 — 2017–2018 гг. Цветом выделен теплый период. За «0» графика для оз. Сибторп принята отметка 58 м над уровнем моря, для оз. Дискашн 2 м над уровнем моря

Fig. 3. Air temperature and seasonal changes of lakes water level.

Changes of maximum and average daily air temperature ($^{\circ}\text{C}$) during the period from October to March: а) — 2017–2018, б) — 2018–2019, в) — 2019–2020; changes of lakes water level above level of zero: г) — Sibthorpe Lake, д) — Discussion Lake; 1 — 2019–2020, 2 — 2018–2019, 3 — 2017–2018. Warm period is highlighted in color. Level of zero is 58 m above sea level for Sibthorpe Lake, 2 m above sea level for Discussion Lake

Рельеф. Рельеф оказывает лишь косвенное воздействие на формирование притока к озерам. Это происходит за счет влияния на распределение осадков и создание особых микроклиматических условий на отдельных водосборах. Кроме того, строение гидрографической сети (очевидно, что положение озер приурочено к понижениям в рельефе [15]), границы и размеры водосборных территорий определяются этим фактором. Кроме того, холмистый рельеф способствует формированию навейных снежников при ветровом перераспределении снега по территории.

Сезонно-талый слой. Рыхлые отложения, перекрывающих выходы скальных пород оазиса, регулируют поверхностный склоновый сток по мере оттаивания и промерзания. Почвенный покров района имеет мощность менее 10 см и представлен лишь на отдельных участках [12, 15]. Глубина сезонного протаивания зависит от экспозиции склона, вида отложений, увлажненности, а также наличия мхов и лишайников на их поверхности. Мощность деятельного слоя к окончанию периода таяния составляет от 0,4 до 0,9 м, хотя в некоторых случаях может достигать и 1,1 м.

Оттаившие рыхлые отложения могут обеспечивать перевод поверхностного стока в грунтовый за счет фильтрации вод: например, потоки талых вод снежников часто фильтруются, прерываясь на середине склона (см. рис. 2б) и продолжая свое движение уже под поверхностью — в виде грунтового стока. Таким образом, на некоторых участках возможен грунтовый сток в озера по подошве сезонно-талого слоя. Дополнительное поступление влаги, формирующей приток к озерам оазиса, происходит за счет таяния «высокольдистых грунтов» [15].

Снежники. Особым фактором формирования притока к водоемам являются многолетние навейные снежники: они обеспечивают поступление талых вод на протяжении всего теплого периода. Особенно хорошо это видно на примере бессточного озера Лоу. Так, в летний сезон 65-й РАЭ (2019/20) основное количество сезонного снега стаяло к концу декабря. Однако к водоему продолжал поступать приток, сформированный талыми водами снежника (в том числе при таянии его фирново-ледовой части), что обусловило продолжительный рост уровня воды (рис. 4).

Площадь снежников в течение последних десятилетий увеличивается [16, 18]. По состоянию на 27–28.12.2019 г. (см. табл. 1) доля снежников на водосборах озер составляла от нескольких процентов (4 % на водосборе озера Лоу) до половины площади водосбора и более (60 % на водосборе озера Сибторп).

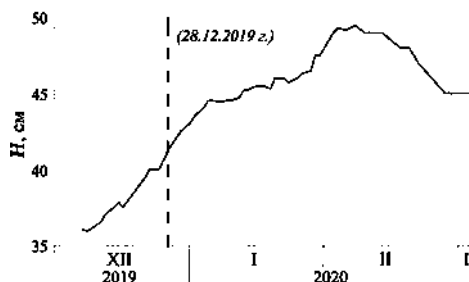


Рис. 4. Озеро Лоу: сезонный ход уровня воды.

28.12.2020 — сход большей части сезонного снега. Отметка «0» графика озера Лоу составляет 60 м над уровнем моря

Fig. 4. Low Lake: seasonal changes of Low Lake water level.

28.12.2020 — loss of seasonal snow cover. Level of zero is 60 m above sea level for Low Lake

Прорывные водоемы. Некоторые снежники подпруживают водоемы, выполняют роль природных дамб. В случае прорыва такого озера происходит сброс накопленной воды в расположенный ниже водоем или в бухту, причем разрушение дамбы сопровождается образованием канала стока.

При прорывах могут образовываться системы (каскады) озер. В таких случаях после прорыва в нижний водоем системы вода поступает уже не только с собственного водосбора, но и дополнительно с водосбора верхнего прорвавшегося озера — в виде руслового притока по сформировавшемуся каналу стока.

Наличие в каскаде озер прорывоопасного водоема отражается на гидрологическом режиме всех водных объектов системы. Прорыв выше расположенного водоема означает быстрое, почти единовременное поступление значительных объемов воды в нижний водоем каскада — т. е. значительное поступление притока. Это отражается на изменении хода уровня воды озер. Например, уровень озера Сибторп, имевшего сток в течение всего теплого сезона 65-й РАЭ (декабрь 2019 г. — февраль 2020 г.), являлся достаточно стабильным. Однако прорыв расположенного выше озера Прогресс приводит к резкому увеличению отметки его водной поверхности (рис. 5а, б). Аналогичная ситуация наблюдалась в январе 2013 г. [32].

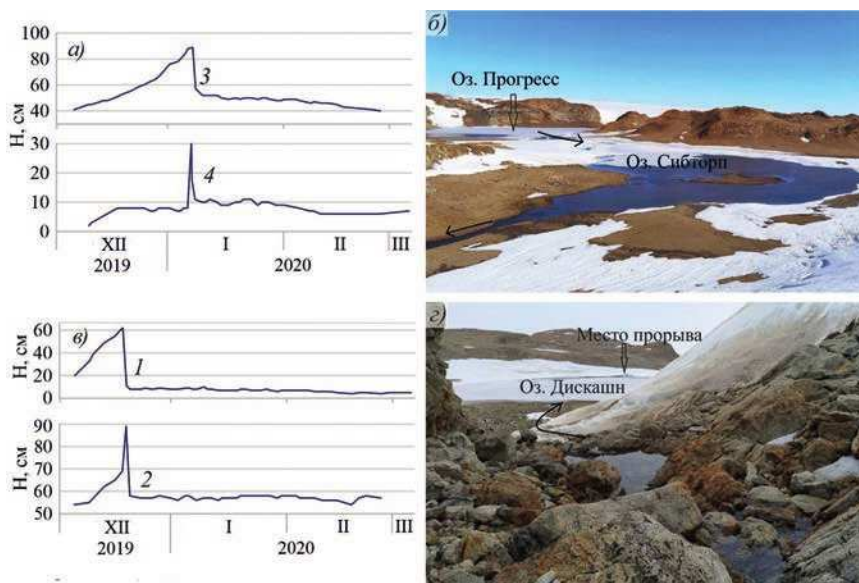


Рис. 5. Системы прорывающихся озер: а) — ход уровня воды системы озер Прогресс — Сибторп, б) — общий вид системы озер Прогресс — Сибторп, в) — ход уровня воды системы озер LH-59 — Дискашн, г) — путь перетока воды из оз. LH-59 в оз. Дискашн.

Графики хода уровня воды озер: 1 — LH-59, 2 — Дискашн, 3 — Прогресс, 4 — Сибторп. Отметка «0» графика озера LH-59 составляет 19,0 м над уровнем моря, отметка «0» графика озера Дискашн составляет 2,5 м над уровнем моря, отметка «0» графика озер Прогресс и Сибторп составляет 58,0 м над уровнем моря

Fig. 5. System of lakes with risks of outburst flood: а) — water level changes of lake system Progress — Sibthorpe, б) — general view of the system Progress — Sibthorpe, в) — water level changes of lake system LH-59 — Discussion, г) — water flow path from LH-59 Lake to Discussion Lake.

Charts showing changes of water level of lakes: 1 — LH-59, 2 — Discussion, 3 — Discussion, 4 — Sibthorpe. Level of zero is 19.0 m above sea level for LH-59 Lake, 2.5 m above sea level for Discussion Lake, 58.0 m above sea level for Progress and Sibthorpe

Кроме того, подобное поступление притока в нижерасположенный водоем может стать триггерным импульсом его собственного прорыва. Это видно на примере системы озер ЛН-59 — Дискашн. Озеро Дискашн является прорывающимся водоемом, что отмечалось зарубежными авторами [8]; в течение последних трех лет прорывы происходили ежегодно. Предположение о прорывах озера ЛН-59 было выдвинуто по косвенным признакам [27]. Параллельные наблюдения за уровнем режимом обоих водоемов были выполнены в 2019–2020 гг. (рис. 5в, г) с применением автоматического регистратора уровней. Интенсивный приток в озеро Дискашн обусловил быстрое наполнение водоема, которое всего за несколько часов спровоцировало разрушение снежной плотины, формирование канала стока и поступление озерной воды в бухту Нелла. Таким образом, быстрое поступление притока в водоем привело к сбросу части озерной воды.

Ледник. Основным источником питания ледниковых водоемов в течение всего теплого периода года является жидкий сток, формирующийся на леднике Долк, обеспечивая, в том числе, дополнительный приток к озерам, расположенным в краевой части. Фирновая часть ледника, расположенная в южной части оазиса [10], частично представлена на водосборах озер Прогресс и Сибторп и почти полностью занимает территории водосборов ледниковых озер Болдер и Ледяное (см. рис. 1а). Наполнение озера Болдер происходило в течение последних трех лет за счет таяния сезонного снега и талых ледниковых вод. Оно завершилось прорывом 8 января 2020 г., сопровождавшимся формированием открытого канала стока, переполнением и прорывом озера Ледяное (10.01.2020 г.), поступлением воды в провал у п/б Прогресс-1 (11.01.2020 г.) и его наполнением в течение последующих двух недель. Сток из озера Болдер осуществлялся до конца теплого сезона. Объем в наиболее активный период прорыва (с 8 по 11 января 2020 г.), оцененный по измеренным значениям расходов воды, составил 82 850 м³. Ранее водоем уже прорывался — 29 января 2017 г., что спровоцировало формирование провала в западной части ледника Долк [35, 38]. Масштабность этих событий позволяет судить о значительном объеме притока талых ледниковых вод, поступивших в озеро в период его наполнения.

Растительный покров. Растительность оазиса представлена преимущественно лишайниками, мхами и водорослями [12, 19]. Они не образуют сплошного растительного покрова, поэтому такие процессы, как перехват осадков и транспирация, значительного влияния на формирование притока воды к озерам не оказывают.

Антропогенная деятельность. Несмотря на то, что деятельность человека на территории оазиса ограничена Договором об Антарктике, его присутствие в оазисе заметно для окружающей среды, что отмечалось еще в 1990-е гг. [18]. В ряде работ обсуждается воздействие на изменение химического состава и качества воды озер [16, 20, 22]. Однако преобразование поверхности водосборов — строительство зданий, выравнивание площадок, которое могло бы повлиять на характеристики водного режима, — осуществляется только в пределах станций; гидротехнические сооружения в оазисе отсутствуют, сток с водосборов искусственно не регулируется. В последние годы ведутся строительные работы на территории китайской станции Зонг-Шан (водосбор озера ЛН-69), а на российской станции Прогресс (водосбор озера Степед) преобразование территории, наоборот, не осуществляется. Отметим, что озеро Степед используется в целях водоснабжения станции Прогресс; его объем, оцененный перед установкой насосной станции в феврале 2012 г., составил порядка

40,5 тыс. м³ [7], а в январе 2019 года порядка 41,1 тыс. м³. Масштабных строительных работ на водосборе за этот период не проводилось — серьезное влияние на формирование притока отсутствовало, при этом объем озера почти не изменился. Таким образом, влияние человека на процессы формирования притока к озерам в целом на территории оазиса незначительно, однако этот фактор необходимо анализировать при рассмотрении водосборов, на которых расположены полярные станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ собственных полевых материалов и литературных источников позволил выявить наиболее значимые факторы формирования притока к антарктическим водоемам оазиса Холмы Ларсеманн: метеорологические характеристики конкретного года, наличие многолетних снежников и ледниковых участков на водосборах, а в ряде случаев — и верхнего прорывоопасного водоема. Такие факторы, как растительный покров и антропогенная деятельность, обычно играющие значительную роль при рассмотрении процессов формирования стока других регионов, в данном случае практически не влияют на них в силу отсутствия сплошного растительного покрова и ограничений хозяйственной деятельности на территории оазиса. Однако в дальнейшем роль деятельности человека как фактора формирования притока будет возрастать: в первую очередь это обстоятельство важно для территорий водосборов, где расположены полярные станции. Расширение их инфраструктуры — строительство новых зданий, вертолетных площадок и др. — потребует преобразования территорий. В этой связи количественные оценки объемов воды, поступающих к озерам, с учетом всех особенностей этого процесса необходимы для решения прикладных гидрологических задач, в первую очередь водохозяйственных расчетов: российская станция Прогресс и китайская станция Зонг-Шан используют для водообеспечения расположенные рядом водоемы Степпед и LH-69 соответственно. Не менее важной задачей является расчет скорости наполнения прорывоопасных водоемов для своевременного прогнозирования этих событий.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00343 А.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность помощнику начальника сезонной 65-й РАЭ А.В. Миракину за помощь в организации и выполнении полевых работ, а также коллегам А.С. Борониной и А.А. Четверовой за предоставленные материалы.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The work was carried out with the financial support of the RFBR grant No 20-05-00343.

Acknowledgments. The authors are deeply grateful to A.V. Mirakin, assistant head of the seasonal 65th RAE, for help in field work organization and performance, as well as to the colleagues Boronina A.S. and Chetverova A.A. for the data provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и значение термина // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 103. С. 25–29.
2. Научно-технический отчет об исследовании бассейна озера Фигурное в оазисе Бангера (Восточная Антарктида). Ленинград. 1988. 120 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О 3032.

3. Сократова И.Н. Антарктические оазисы: История и результаты исследований. СПб.: ГНЦ РФ АНИИ, 2010. 274 с.
4. Научно-технический отчет 52-й Российской антарктической экспедиции (сезонный состав). Т. 1. Антарктида, ноябрь 2006 г. — май 2007 г. 2007. 237 с. // Госфонд ФГБУ «АНИИ». Инв. № О 3640.
5. Симонов И.М. Оазисы Восточной Антарктиды / Под ред. канд. геогр. наук Кручинина Ю.А. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
6. Dugan H.A. Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes. Chicago, Illinois, 2014. 109 p.
7. Научно-технический отчет выполнения программы сезонных гидроэкологических работ на станции Прогресс в период сезона 57 РАЭ. Антарктида, оазис Холмы Ларсеманн 2011–2012. 2012. 27 с. // Госфонд ФГБУ «АНИИ». Инв. № О 3802.
8. Burgess J.S., Spatez A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica // Antarctic Science. 1994. № 6 (4). P. 491–495.
9. Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // Australian Journal of Earth Sciences. 1989. V. 36. P. 219–241. doi: 10.1080/08120098908729483
10. Kiernan K., Gore D. B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica // Antarctic Science. 2009. V. 21. № 4. P. 373–382. doi: 10.1017/S0954102009002028
11. Zong S., Ren L., Wu M. Grenville-age metamorphism in the Larsemann Hills: P-T evolution of the felsic orthogneiss in the Broknes Peninsula, East Antarctica // International Geology Review. 2020. V. 63. № 7. P. 866–881. doi: 10.1080/00206814.2020.1734973
12. Абрамов А.А., Слеттен Р.С., Ривкина Е.М., Миронов В.А., Гиличинский Д.А. Геокриологические условия Антарктиды // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 3. С. 3–19.
13. Отчет сезонной 61-й Российской антарктической экспедиции. Т. 2. О выполнении научных программ. Антарктика. 2016. 492 с. // Госфонд ФГБУ «АНИИ». Инв. № О-3932.
14. Абакумов Е.В., Крыленков В.А. Почвы Антарктиды // Природа. 2011. № 3. С. 58–62.
15. Мергелов Н.С. Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1027–1045. doi: 10.7868/S0032180X14090093
16. Отчет о выполнении программы ландшафтно-экологического мониторинга, район станции «Прогресс», период 43-й РАЭ (сезон). Санкт-Петербург. 1998. 31 с. // Госфонд ФГБУ «АНИИ». Инв. № О-3310.
17. Sabbe K., Hodgson D. A., Verleyen E., Taton A., Wilmotte A., Vanhoutte K., Vyverman W. Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic lakes // Freshwater Biology. 2004. V. 49. P. 296–319.
18. Burgess J.S., Spate A.P., Norman F.I. Environmental Impacts of Station Development in the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica // Journal of Environmental Management. 1992. V. 36. P. 287–299.
19. Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica // Climate Change. 2015. V. 1. № 3. P. 174–183.
20. Нигаматзянова Г.Р., Федорова И.В. Оценка экологического состояния озер оазисов Холмов Ларсеманн и Ширмахера (Восточная Антарктида) // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 140–144.
21. Шаров А.Н., Толстиков А.В. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды // Региональная экология. 2018. Т. 53. № 3. С. 5–14. doi: 10.30694/1026-5600-2018-3-5-14

22. Bhardwaj L., Sharma S., Ranjan A., Jindal T. Persistent organic pollutants in lakes of Broknes peninsula at Larsemann Hills area, East Antarctica // *Ecotoxicology*. 2019. № 28. P. 589–596. doi: 10.1007/s10646-019-02045-x
23. Asthana R., Shrivastava P.K., Srivastava H. B. Beg M.J., Kumar P. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica // *Advances in Polar Science*. 2013. V. 24. № 4. P. 281–295. doi: 10.3724/SP.J.1085.2013.00281
24. Демидов Н.Э., Веркулич С.Р., Занина О.В., Караевская Е.С., Пушина З.В., Ривкина Е.М., Шмелев Д.Г. Конечная морена и озерно-лагунные отложения в разрезе четвертичных отложений оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. Т. 97. № 3. С. 79–90.
25. Liu X., Sun L., Xie Z. Yin X., Zhu R., Wang Y. Preliminary record of the historical seabird population in the Larsemann Hills, East Antarctica, from geochemical analyses of Mochou Lake sediments // *Boreas*. 2007. V. 36. P. 182–197. doi: 10.1080/03009480600991789
26. Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // *Лед и снег*. 2014. № 4 (128). С. 95–106.
27. Григорьева С.Д., Четверова А.А., Рыжова Е.В., Дешевых Г.А., Попов С.В. Гидрологические и геофизические инженерные изыскания в районе станции Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) в сезон 64-й РАЭ // *Российские полярные исследования*. 2019. № 2. С. 23–28.
28. Заключительный отчет XXXVII Консультативного совещания по договору об Антарктике. / Том II. Бразилиа, Бразилия. 28 апреля – 7 мая 2014 г. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике. 2014. 476 с.
29. Отчет о выполнении научных программ, технических заданий и логистических операций сезонной 57-й Российской антарктической экспедиции. Т. 2. Экспедиционные работы и натурные исследования по действующей федеральной программе в сезон 57-й РАЭ. Антарктида – Санкт-Петербург, ноябрь 2011 – июнь 2012. 2012. 425 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3804.
30. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An Atlas of the Lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Kingston, Tas.: Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, 1990. 173 p.
31. Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Гидрологическая характеристика озер восточной части полуострова Брокнес, Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 1. С. 39–48. doi: 10.15356/2076-6739-2019-1-39-48
32. Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017. V. 69. № 1. P. 1317202. doi: 10.1080/16000870.2017.1317202
33. Филатов Н. Н., Георгиев А. П., Ефремова Т. В. Назарова Л. Е., Пальшин Н. И., Руховец Л. А., Толстиков А. В., Шаров А.Н. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 444. № 5. С. 554–557.
34. Shevnina E., Kourzeneva E., Dvornikov Y., Fedorova I. Retention time of lakes in the Larsemann Hills oasis, East Antarctica // *The Cryosphere*. 2021. V. 15. № 6. P. 2667–2682. doi: 10.5194/tc-15-2667-2021
35. Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида), в 2017–2018 гг. // *Геориск*. 2018. Т. 12. № 3. С. 56–67.
36. Broknes peninsula, Larsemann Hills: environmental management map. URL: https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display_map.cfm?map_id=13135 (дата обращения: 17.06.2021).

37. Алексеев В.Р., Волков Н.В., Втюрин Б.И., Втюрина Е.А., Гросвальд М.Г., Донченко Р.В., Дюнин А.К., Канаев Л.А., Котляков В.М., Кренке А.Н., Лосев К.С., Перов В.Ф., Цуриков В.Л. Гляциологический словарь / Под ред. Котлякова В.М. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
38. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dălk Glacier, East Antarctica // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432

REFERENCES

1. Sokratova I.N. Antarctic oases: history and meaning of the term. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Materials of glaciological researches. 2007, 103: 25–29. [In Russian].
2. *Nauchno-tekhnicheskii otchet ob issledovanii basseina ozera Figurnogo v oazise Bangera (Vostochnaia Antarktida)*. Scientific and technical report on the study of the Figurnoye lake basin in the Bungee oasis (East Antarctica). Leningrad. 1988: 120 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3032. [In Russian].
3. Sokratova I.N. *Antarkticheskie oazisy: Istoriia i rezul'taty issledovaniy*. Antarctic oases: History and results of the study. St. Petersburg: State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, 2010: 274 p. [In Russian].
4. *Nauchno-tekhnicheskii otchet 52-i RAE (sezonnii sostav)*. Scientific and technical report of the 52nd RAE (seasonal membership). V.1. Antarctica, November 2006 — May 2007. 2007: 237 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3640. [In Russian].
5. Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoi Antarktidy*. Oases of East Antarctica. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971: 176 p. [In Russian].
6. Dugan H.A. *Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes*. Chicago, Illinois, 2014: 109 p.
7. *Nauchno-tekhnicheskii otchet vypolneniia programm sezonnogo gidroekologicheskikh rabot nastantsii Progress v period sezona 57 RAE*. Scientific and technical report on the implementation of programs for seasonal hydroecological work at Progress station during the season of the 57th RAE. Antarctica, Larsemann Hills oasis, 2011–2012. 2012: 27 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3802. [In Russian].
8. Burgess J.S., Spatez A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica. *Antarctic Science*. 1994, 6 (4): 491–495.
9. Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal of Earth Sciences*. 1989, 36: 219–241. doi: 10.1080/08120098908729483
10. Kiernan K., Gore D. B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*. 2009: 21 (4): 373–382. doi: 10.1017/S0954102009002028
11. Zong S., Ren L., Wu M. Grenville-age metamorphism in the Larsemann Hills: P-T evolution of the felsic orthogneiss in the Broknes Peninsula, East Antarctica. *International Geology Review*. 2020. 63 (7): 866–881. doi: 10.1080/00206814.2020.1734973
12. Abramov A.A., Sletten R.S., Rivkina E.M., Mironov V.A., Gilichinskii D.A. Geocryological conditions of Antarctica. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2011, 3 (15): 3–19. [In Russian].
13. *Otchet sezonnoi 61-i Rossiiskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii. Report of the seasonal 61st Russian Antarctic Expedition*. T. 2. About the implementation of scientific programs. Antarctica. 2016: 492 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3932. [In Russian].
14. Abakumov E.V., Krylenkov V.A. *Pochvy Antarktidy*. Antarctica soils. *Priroda*. Nature. 2011, 3: 58–62. [In Russian].

15. Mergelov N.S. Soils of wet valleys in Larsemann Hills and Vestvoll oases (Princess Elisabeth Land, East Antarctic). *Pochvovedenie*. Soil Science. 2014, 9: 1027–1045. doi: 10.7868/S0032180X14090093. [In Russian].
16. *Otchet o vypolnenii programmy landshaftno-ekologicheskogo monitoring, raion stantsii «Progress», period 43 RAE (sezon)*. Report on the implementation of the program of landscape-ecological monitoring of the area of the Progress station, period of the 43rd RAE (season). St. Petersburg. 1998: 31 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3310. [In Russian].
17. Sabbe K., Hodgson D. A., Verleyen E., Taton A., Wilmotte A., Vanhoutte K., Vyverman W. Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic lakes. *Freshwater Biology*. 2004, 49: 296–319.
18. Burgess J.S., Spate A.P., Norman F.I. Environmental Impacts of Station Development in the Larsemann Hills, Princess Elisabeth Land, Antarctica. *Journal of Environmental Management*. 1992, 36: 287–299.
19. Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica. *Climate Change*. 2015, 1 (3): 174–183.
20. Nigamatzyanova G.R., Fedorova I.V. Assessment of the ecological state of the Larsemann Hills and the Shirmacher Oases lakes (East Antarctica). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*. Advances in current natural sciences. 2015, 12: 140–144. [In Russian].
21. Sharov A.N., Tolstikov A.V. Ecological problems of the lakes of East Antarctica. *Regional'naia ekologiia*. Regional ecology. 2018, 53 (3): 5–14. doi: 10.30694/1026-5600-2018-3-5-14. [In Russian].
22. Bhardwaj L., Sharma S., Ranjan A., Jindal T. Persistent organic pollutants in lakes of Broknes peninsula at Larsemann Hills area, East Antarctica. *Ecotoxicology*. 2019, 28: 589–596. doi: 10.1007/s10646-019-02045-x
23. Asthana R., Shrivastava P. K., Srivastava H. B., Beg M. J., Kumar P. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica. *Advances in Polar Science*. 2013, 24 (4): 281–295. doi: 10.3724/SP.J.1085.2013.00281
24. Demidov N.E., Verkulich S.R., Zanina O.V., Karaevskaia E.S., Pushina Z.V., Rivkina E.M., Shmelev D.G. The end moraine and lacustrine-marine sediments in the cross-section of quaternary deposits of the Larsemann Hills, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 97 (3): 79–90. [In Russian].
25. Liu X., Sun L., Xie Z., Yin X., Zhu R., Wang Y. Preliminary record of the historical seabird population in the Larsemann Hills, East Antarctica, from geochemical analyses of Mochou Lake sediments. *Boreas*. 2007, 36: 182–197. doi: 10.1080/03009480600991789
26. Popov S.V., Eberlein L. Investigation of snow-firn thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 128 (4): 95–106. [In Russian].
27. Grigor'eva S.D., Chetverova A.A., Ryzhova E.V., Deshevyykh G.A., Popov S.V. Hydrological and geophysical investigations at the area of the Progress Station (Larsemann Hills, East Antarctica) during the field season of the 64th RAE. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Research. 2019, 2: 23–28. [In Russian].
28. *Zakliuchitel'nyi otchet XXXVII Konsul'tativnogo soveshchaniia po dogovoru ob Antarktike*. Final Report of the Thirty-seventh Antarctic Treaty Consultative Meeting. V. 2. Brasilia, Brasil. 28 April – 7 May 2014. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2014: 476. [In Russian].
29. *Otchet o vypolnenii nauchnykh programm, tekhnicheskikh zadaniy i logisticheskikh operatsii sezonnoi 57-i Rossiiskoi antarkticheskoi ekspeditsii. T. 2: Ekspeditsionnye raboty i naturnye issledovaniia po deistvuiushchei federal'noi programme v sezon 57 RAE*. Report on the implementation of scientific programs, technical assignments and logistic operations of the seasonal 57th Russian Antarctic expedition. V. 2. Expeditionary work and field research under the current federal program during the season of the 57th RAE. Antarctica – St. Petersburg, November 2011 – June 2012. 2012: 425 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3804. [In Russian].

30. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An Atlas of the Lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Kingston, Tas.: Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, 1990: 173 p.
31. Boronina A.S., Popov S.V., Priakhina G.V. Hydrological characteristics of lakes in the eastern part of the Broknes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 1 (59): 39–48. doi: 10.15356/2076-6739-2019-1-39-48. [In Russian].
32. Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017, 69 (1): 1317202. doi: 10.1080/16000870.2017.1317202
33. Filatov N.N., Georgiev A.P., Efremova T.V., Nazarova L.E., Pal'shin N.I., Rukhovets L.A., Tolstikov A.V., Sharov A.N. Reaction of lakes of East Fennoscandia and East Antarctica to climate changes. *Doklady Akademii nauk. Reports of Academy of Sciences*. 2012, 5 (444): 554–557. [In Russian].
34. Shevnina E., Kourzeneva E., Dvornikov Y., Fedorova I. Retention time of lakes in the Larsemann Hills oasis, East Antarctica. *The Cryosphere*. 2021, 15 (6): 2667–2682. doi: 10.5194/tc-15-2667-2021
35. Popov S.V., Boronina A.S., Priakhina G.V., Grigor'eva S.D., Sukhanova A.A., Tiurin S.V. Breakthroughs of glacial and subglacial lakes at the Larsemann Hills (East Antarctica) in 2017–2018. *Georisk. Georisk*. 2018, 3 (12): 56–67. [In Russian].
36. Broknes peninsula, Larsemann Hills: environmental management map. Available at: https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display_map.cfm?map_id=13135 (accessed 17.06.2021).
37. Alekseev V.R., Volkov N.V., Vtiurin B.I., Vtiurina E.A., Grosval'd M.G., Donchenko R.V., Diunin A.K., Kanaev L.A., Kotliakov V.M., Krenke A.N., Losev K.S., Perov V.F., Tsurikov V.L. *Gliatsiologicheskii slovar'.* Dictionary of glaciology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
38. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 3 (57): 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432. [In Russian].

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

В журнале публикуются статьи по тематике исследований полярных областей, а также научные сообщения теоретического, методического, экспериментального и прикладного характера, тематические обзоры (по заказу редакции), критические статьи и рецензии, библиографические сводки, хроника научной жизни. Тексты статей должны быть на русском или английском языке. Принимаются статьи, ранее не опубликованные и не находящиеся на рассмотрении в других изданиях.

Все материалы направляются в редакцию в электронном виде он-лайн через личный электронный кабинет автора на сайте журнала <https://www.aaresearch.science>. Авторы должны представить текст статьи со вставленными рисунками, а также отдельно оригинальные файлы рисунков (см. требования к рисункам), Акт экспертизы о возможности публикации статьи в открытой печати и файл 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, таблиц не более 6. Текст набирается в формате Microsoft Word. Параметры набора: шрифт Times New Roman, кегль 12, интервал 1,5. Страницы в статье нумеруются.

Все поступающие материалы проходят проверку на отсутствие заимствований в соответствии с этическими правилами публикаций.

Все статьи проходят двойное рецензирование.

Публикация в нашем журнале полностью бесплатна.

Структура статьи

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 и ее (их) адрес; 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. При этом имена авторов даются полностью, отчество сокращенно. 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).

Аннотация на русском языке и Summary должны быть структурированными, т.е. отражать кратко проблему исследования и ее состояние, цель работы, методы, результаты и заключение.

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 нужно поместить следующую информацию на двух языках: Конфликт интересов/Competing interests; Финансирование/Funding; Благодарности/Acknowledgments. Желательно также указать вклад авторов в работы — Вклад авторов/Authors contribution. В разделе Финансирование необходимо указать источник финансовой поддержки, способствовавший выполнению этой работы (гранты фондов, программы и т.д.), в Благодарностях можно поместить благодарность лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи.

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/PNG/PSD, в векторных — CDR, AI, EPS и в формате XLS (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 подрисуночных 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. Номер и наименование таблицы (два отдельных абзаца) приводятся на русском и английском языках. Заголовок таблицы не должен превышать ДВУХ строк.

Таблицы и графы должны иметь заголовки, сокращения слов в таблицах не допускаются. Таблицы набираются, как и текст, в формате Word шрифтом 9 пт. Если у таблицы есть примечание, оно тоже приводится на двух языках. 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 рекомендуется набирать 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 «Литература») 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. Количество источников должно быть не менее 10. Обращаем внимание на недопустимость включения в список литературы изданий, выпущенных без ISSN- или ISBN-кодов (этим часто грешат сборники материалов конференций (тезисы или доклады), а также авторефератов диссертаций и диссертаций, архивных и фондовых материалов, научно-технических отчетов, учебников и учебных пособий, ГОСТов, распоряжений и пр. Количество ссылок на научно-популярные издания должно быть минимальным.

Количество самоцитирований должно быть не более 10–12 % от общего количества ссылок на оригинальные источники.

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».

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», который обязателен для ознакомления при подготовке материалов статьи.

Об Аннотациях. Редакция рекомендует всем авторам ознакомиться с Рекомендациями по оформлению аннотаций на английском языке, которые являются для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований.