

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и методология

- Евсеев А.В., Красовская Т.М., Тикунов В.С.* Конфликты природопользования в Арктической зоне РФ: методология выявления и картографирования..... 5
- Иванов В.В., Архипкин В.С., Лемешко Е.М., Мысленков С.А., Смирнов А.В., Суркова Г.В., Тузов Ф.К., Чечин Д.Г., Шестакова А.А.* Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке..... 13
- Огородов С.А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С., Баранская А.В., Разумов С.О.* Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики..... 26

География и экология

- Малхазова С.М., Миронова В.А., Баймакова И.Х.* Природноочаговые болезни в Арктике в условиях меняющегося климата..... 43
- Голубева Е.И., Рис Г.У., Зимин М.В., Ковальчук М.Л., Тимохина Ю.И.* Динамика флористического состава и границ высотных поясов горных массивов Кольского полуострова в условиях антропогенного воздействия 58
- Еременко Е.А., Фузеина Ю.Н., Власов М.В., Ворошилов Е.В., Деркач А.А., Бредихин А.В.* Антропогенная трансформация рельефа населенных пунктов Нижнего Приобья 69

Методы исследований

- Платонов В.С., Мысленков С.А., Архипкин В.С., Кислов А.В.* Высокоразрешающее моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии..... 87
- Балдина Е.А., Ширшова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю.* Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова) по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам..... 107

Региональные исследования

- Романов А.А., Васеха Н.Д.* Зимняя авифауна морей северо-востока России..... 122
- Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ефимов В.А., Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е.* Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года..... 134

<i>Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Куприянов Д.А., Руденко О.В., Баталова В.А., Нагорная Е.Г.</i> Изменения природных условий западной части плато Путорана за последние 4000 лет.....	152
<i>Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А.</i> Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень	167

Краткие сообщения

<i>Дрегуло А.М., Петухов В.В., Бобылев Н.Г.</i> Эколого-климатические особенности утилизации отходов водоотведения в Арктической зоне России.....	180
--	-----

CONTENTS

Theory and methodology

Evseev A.V., Krasovskaya T.M., Tikunov V.S. Nature management conflicts in the Arctic zone of the Russian Federation: methodology of identification and mapping..... 5

Ivanov V.V., Arkhipkin V.S., Lemeshko Ye.M., Myslenkov S.A., Smirnov A.V., Surkova G.V., Tuzov F.K., Chechin D.G., Shestakova A.A. Changes in hydrometeorological conditions in the Barents Sea as an indicator of climatic trends in the Eurasian Arctic in the 21st century..... 13

Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel A.S., Baranskaya A.V., Razumov S.O. Changes of the hydrometeorological potential of thermoabrasion on the Russian Arctic sea coasts..... 26

Geography and ecology

Malkhazova S.M., Mironova V.A., Bashmakova I.Kh. Natural focal diseases in the Arctic under changing climate..... 43

Golubeva E.I., Rees W.G., Zimin M.V., Kovalchuk M.L., Timokhina Yu.I. Dynamics of floristic composition and boundaries of the altitude zones within mountain massifs of the Kola Peninsula under the anthropogenic impact 58

Eremenko E.A., Fuzeina Y.N., Vlasov M.V., Voroshilov E.V., Derkach A.A., Bredikhin A.V. Anthropogenic transformation of relief in settlements of the Lower Ob River region..... 69

Methods of studies

Platonov V.S., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S., Kislov A.V. High-resolution modeling of hydrometeorological fields over the Kara Sea coastal regions with irregular coastline..... 87

Baldina E.A., Shirshova V.Yu., Romanenko F.A., Lugovoi N.N., Zhdanova E.Yu. Dynamics of the coastline and surface condition of small Arctic islands (the Vize and Ushakov ones) on the multitemporal optical and radar images..... 107

Regional studies

Romanov A.A., Vasekha N.D. Spatial distribution of birds on the sea coasts of the north-east of Russia during the winter period..... 122

Magritsky D.V., Frolova N.L., Agafonova S.A., Efimov V.A., Vasilenko A.N., Sazonov A.A., Efimova L.E. Hydrological conditions at the mouth of the Kolyma River in summer 2019..... 134

Novenko E.Yu., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Rudenko O.V., Batalova V.A., Nagornaya E.G. Environmental changes in the western part of the Putorana Plateau over the past 4,000 years..... 152

Alabyan A.M., Vasilenko A.N., Demidenko N.A., Krylenko I.N., Panchenko E.D., Popryadukhin A.A. Tidal flow dynamics in the Pechora River delta during summer low water 167

Short communications

Dregulo A.M., Petukhov V.V., Bobylev N.G. Ecological and climatic features of recycling in the Arctic zone of Russia..... 180

Арктическая зона Российской Федерации – самая большая по площади среди арктических территорий других государств. Исторически на протяжении веков она играет значительную роль в становлении геополитических и экономических интересов страны. Расширяющееся освоение ресурсов Арктики способствовало развитию и накоплению фундаментальных знаний о взаимном влиянии различных компонентов арктической природной среды, их значимости для климатической системы Земли в целом, появлению новых прикладных технологий освоения этого региона.

Понимание на государственном и ведомственном уровне необходимости фундаментальных научных исследований в Российской Арктике в области изменения климата и последствий неизбежного при освоении региона антропогенного воздействия на природную среду послужило основанием для проведения ряда конкурсов международных и российских научных фондов и организаций, в рамках которых получили поддержку проекты географической направленности. Тематика исследований включала в себя изменения климата и водного баланса Арктики в первой половине XXI в., влияние природных и антропогенных воздействий на морские и наземные экосистемы Арктики, криосферные процессы и их значение для природопользования, социально-экономические и медико-экологические проблемы развития Российской Арктики.

В предлагаемом специальном выпуске журнала «Вестник Московского университета. Сер. 5. География» под одной обложкой собрана часть результатов таких проектов. Надеемся, что арктическая тематика в журнале будет и дальше одним из важных компонентов, дающим представление о наиболее актуальных фундаментальных и прикладных географических исследованиях этого региона.

Редакционная коллегия

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 504.062.2+912.43

**КОНФЛИКТЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ:
МЕТОДОЛОГИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ**
А.В. Евсеев¹, Т.М. Красовская², В.С. Тикунов³
¹⁻³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*
¹ *Кафедра рационального природопользования, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: avevseev@yandex.ru*
² *Кафедра физической географии мира и геоэкологии, проф., д-р геогр. наук; e-mail: krasovskt@yandex.ru*
³ *Лаборатория комплексного картографирования, проф., д-р геогр. наук; e-mail: vstikunov@yandex.ru*

Представлена методология выявления и картографирования конфликтов природопользования в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). Конфликт природопользования означает развитие кризиса в социоприродной системе, проявления которого в Арктической зоне разнообразны. Среди причин возникновения конфликтов одна из ведущих позиций принадлежит нерациональному хозяйственному освоению. Конфликты природопользования, возникающие при определенном сочетании природных и антропогенных факторов, территориально различаются, но имеют общие признаки. Они связаны с нерациональной (избыточной) эксплуатацией природного капитала, формируемого территориальными пулами экосистемных услуг. Определение пулов возможно с использованием методов ландшафтной экологии. Смена спектров наиболее востребованных экосистемных услуг определяется программами и уровнем экономического развития, а также мировоззренческими причинами, как этнокультурными, так и этическими (этика потребления в постиндустриальном обществе). Установлены наиболее востребованные экосистемные услуги в структуре природопользования опорных зон АЗРФ. При выявлении конфликтов природопользования используются мониторинговые данные, тематические карты разных масштабов, а также на основе исторических документов: ретроспективный анализ появления признаков деградации геосистем, сопряженный с развитием таких конфликтов. Наиболее часто конфликты природопользования связаны с эксплуатацией экосистемных услуг «всеобщего достояния», осуществляемой с утилитарных позиций каждого природопользователя, что не отвечает принятой стратегии устойчивого развития АЗРФ. Предложены общая модель и типовая матрица для выявления конфликтов природопользования, позволяющая обнаружить конкуренцию за эксплуатацию пулов экосистемных услуг, формируемых ландшафтной структурой территории. Определен алгоритм определения факторов динамики пулов экосистемных услуг. На основе анализа пространственных сочетаний наиболее важных для территории природных, социально-экономических и экологических факторов, осложняющих/облегчающих хозяйственное освоение территории, было проведено ее ранжирование с использованием специально разработанного алгоритма. Для целей картографирования создана классификация конфликтов, а также показаны способы их отображения на картах. Приведены результаты использования методологии для Ненецкой, Северо-Якутской и Мурманской опорных зон развития АЗРФ, включающие эколого-экономические оценки.

Ключевые слова: конфликт, экосистемные услуги, Арктика

ВВЕДЕНИЕ

Арктическая доктрина Российской Федерации, сформированная в недавнее время, определяет векторы Стратегии социально-экономического развития региона до 2035 г. [Стратегия..., 2020]. Она предусматривает ускоренное социально-экономическое развитие восьми «опорных зон»: Кольской, Архангельской, Ненецкой, Воркутинской, Ямало-Ненецкой, Таймыро-Туруханской, Северо-Якутской, Чукотской [Смирнова, 2016]. В этих зонах намечены эксплуатация месторождений полезных ископаемых, развитие транспортной инфраструктуры, включая Северный морской путь, модерни-

зация социальной инфраструктуры и т. д. Все это неизбежно приведет к усилению антропогенного воздействия на природную среду региона, выполняющую важнейшие функции регионального и глобального (по ряду параметров) экологического буфера. Арктическая доктрина декларирует хозяйственное освоение, отвечающее принципам устойчивого развития, что предполагает, среди прочего, своевременное выявление потенциальных конфликтов природопользования и разработку механизмов их предупреждения. Однако слабая методологическая база существенно осложняет этот процесс.

Среди причин возникновения конфликтов природопользования одна из ведущих позиций принадлежит хозяйственному освоению как новых, так и территорий с давно сложившейся структурой природопользования (староосвоенных). При этом практически всегда возникает риск развития острых социально-экологических проблем, связанных с ограниченным применением, либо отсутствием природосберегающих технологий, нарушениями природоохранного законодательства, недостаточными знаниями о преобразуемых ландшафтах и т. п., провоцирующих возникновение конфликтов природопользования. Конфликт природопользования означает развитие кризиса в социоприродной системе, проявления которого весьма разнообразны.

Конфликты природопользования, возникающие при определенном сочетании природных и антропогенных факторов, территориально различаются как по их типу (набору), так и по приоритетности в отношении устойчивого развития территорий. Однако при этом существуют и общие закономерности их формирования, связанные с нерациональной (избыточной) эксплуатацией природного капитала, формируемого территориальными пулами экосистемных услуг, что во многом предопределяет общий характер возникающих конфликтов. *Целью* настоящего исследования является разработка методологии выявления и картографирования конфликтов природопользования на основе изучения территориального пула экосистемных услуг в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) в целях обеспечения ее устойчивого развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование базируется на новейших разработках теории природопользования, экологической экономики и ландшафтной экологии [Бакланов, 2020; Бобровин, Резников, 2005; Burkhard et al., 2019; Kienast et al., 2019]. База данных сформирована на основе региональной статистики, научных публикаций, включая картографические издания, и натурных исследований. Для обработки полученной информации использовались методы системного геоэкологического анализа, эколого-экономические, картографические и математического моделирования.

Теоретические предпосылки исследования. Теоретическая база исследований конфликтов природопользования начала формироваться только в XXI в., когда стало очевидным развитие глобального социально-экологического кризиса, проявления которого они идентифицировали. Этому способствовали также возросшая активность междисциплинарных проблемных исследований, прогресс в

развитии ландшафтной экологии и экологической экономики, этнокультурного ландшафтоведения, теории природопользования, повышение роли системного анализа и приемов математического моделирования для достижения целей устойчивого развития [Boumans et al., 2002; Voinov et al., 2004].

Типология конфликтов природопользования на севере России была рассмотрена нами ранее [Красовская, Евсеев, 2004]. Остановимся на методологии выявления и прогнозирования конфликтов природопользования с акцентом на рассматриваемую территорию, которая определяет некоторые особенности формирования базы данных такого исследования, а также ее пространственно-временные характеристики.

Новая цивилизационная модель развития, основанная на достижении баланса материальных потребностей населения с несущей емкостью биосферы, нацеливает на рациональное использование не только ресурсной, но и средообразующей части природного капитала, включающей экосистемные услуги «всеобщего достояния»: регулирующие, поддерживающие, информационные. Их выявление и оценка существующих пулов базируется на общих подходах ландшафтной экологии [Bastian et al., 2015; Burkhard et al., 2014]. Заметим, что эксплуатация экосистемных услуг «всеобщего достояния» рассматривается чаще всего с утилитарных позиций каждого природопользователя (что далеко не всегда отвечает постулатам устойчивого развития) и формирует базу для развития конфликтов природопользования за их эксплуатацию.

Прогнозирование и выявление конфликтов природопользования требуют анализа его региональной структуры для определения претендентов на эксплуатацию экосистемных услуг, объемов и технологий потребления, а также его мировоззренческих установок, что позволяет прогнозировать и предотвращать возникновение социокультурных конфликтов природопользования. Смена спектров наиболее востребованных экосистемных услуг определяется программами и уровнем экономического развития, а также как этнокультурными, так и этическими (этика потребления в постиндустриальном обществе) мировоззренческими причинами [Лопатников, 2016; Jackson, 2009; Kienast et al., 2019]. В условиях определенных трудностей формирования базы данных характеристик природопользования для анализируемой территории особое значение приобретает ретроспективный анализ его развития, позволяющий на основании соответствующей исторической документации выделить этапы, каждый из которых характеризует определенный спектр и объем эксплуатируемых экосистемных услуг. Для этого анализируется динамика роста численности населения, площадей

освоенных территорий, регистрация сопутствующего истощения биоресурсов (утрата обеспечивающей экосистемной услуги), развития эрозионных процессов (ослабление регулирующей экосистемной услуги) и т. п., что характеризует появление конфликтов природопользования. [Красовская, 2008]. Заметим, что при ретроспективном анализе можно качественно и даже количественно (при наличии мониторинговых данных) оценить характер и объем изменения пулов некоторых экосистемных услуг, выявляя наличие/отсутствие признаков деградации, свидетельствующей об истощении их пулов.

Общая модель выявления и прогнозирования конфликтов природопользования. Использование изложенных выше теоретических подходов и накопленный нами практический опыт соответствующих исследований в АЗРФ позволили предложить общий алгоритм выявления конфликтов природопользования. Процедура основана на анализе ландшафтной структуры территории и ее социально-экономических характеристик. Ландшафтная структура определяет спектр экосистемных услуг и их пулы. Социально-экономические характеристики содержат анализ структуры ВРП для выявления ведущих отраслей экономики, эксплуатирующих экосистемные услуги, и типов расселения, за которым следует оценка объемов потребления определенных экосистемных услуг. Затем объемы пулов, востребованных на территории экосистемных услуг, сопоставляются с реальным их потреблением. Превышение объема потребления над имеющимся пулом свидетельствует о возникновении конфликта природопользования. Например, для выявления возможного изменения пулов экосистемных услуг, провоцирующего возникновение конфликтов природопользования, на проектируемой трассе «Карскомура» (Воркутинская и Ненецкая опорные зоны) анализировались следующие факторы: экономические, затрагивающие обеспечивающие услуги (биоресурсы, минеральное сырье и др.); социальные, способные изменить информационные услуги (чувство места, наследие и др.); природные, регулирующие и обеспечивающие услуги, связанные с изменением климата.

Выявление и прогнозирование потенциальных конфликтов природопользования в нашем исследовании предусматривали соотнесение положения опорных зон развития АЗРФ со структурным разнообразием ее природных экосистем и имеющимися пулами экосистемных услуг, природными рисками хозяйственного освоения, существующими типами природопользования, наличием «горячих точек» и импактных районов экологического значения, а также характеристиками хозяйственного воздействия. При этом получены результаты, изложенные ниже.

Приоритетными типами природопользования, которые получают развитие в опорных зонах, станут следующие: промышленное (добыча полезных ископаемых), транспортное, рекреационное (последнее в меньших масштабах, чем два первых). Селитебное природопользование будет сопутствующим. Эти типы природопользования будут развиваться как в районах пионерного освоения, так и староосвоенных, где они наложатся на уже существующие – промышленное, транспортное, природоохранное и традиционное природопользование коренных малочисленных народов Севера. Это создает конкурентные отношения за использование ряда экосистемных услуг, провоцируя конфликты природопользования. Было выявлено около 20 «горячих точек» потенциальных конфликтов природопользования, связанных с развитием промышленного (добыча полезных ископаемых) и транспортного природопользования (инфраструктура Северного морского пути, строительство новых железнодорожных веток и т. п.), а также с расширением селитебного природопользования в условиях неустойчивых к антропогенным воздействиям геосистем. Такие точки могут появиться в районе будущего порта Северного морского пути – Индиги, трассы железной дороги «Карскомур» (конкуренция транспортного и традиционного природопользований), в Анабарском, Усть-Янском и Приленском (Булуномском) кластерах экономического развития Северо-Якутской опорной зоны (промышленное, транспортное, традиционное, природоохранное, рекреационное природопользования), Печенгском районе Мурманской области (промышленное и природоохранное природопользование) и т. д.

Эксплуатация экосистемных услуг. Определение структуры природопользования позволило выявить наиболее востребованные экосистемные услуги при хозяйственном освоении региона (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Системный анализ ландшафтной структуры модельных территорий, определение спектров эксплуатируемых экосистемных услуг позволили на различных масштабных уровнях выявить ландшафты-доноры для Северо-Якутской, Ненецкой, Воркутинской, Мурманской опорных зон, определить в экономических показателях объем пулов ряда экосистемных услуг, а также определить факторы их динамики и предложить типовую матрицу для выявления конфликтов природопользования (табл. 2), структура которой использована при построении соответствующих карт разного масштаба [Экологический..., 2017; Evseev et al., 2019].

Наиболее востребованные экосистемные услуги в структуре природопользования опорных зон АЗРФ

Обеспечивающие	Поддерживающие	Регулирующие	Информационные
Минерально-сырьевые, биологические (охотничье-промысловые, пастбищные), пресной воды и др.	Ландшафтная структура, биогеохимический круговорот	Регулирование климата/ микроклимата, качества вод и воздуха, стока, эрозии, включая термоэрозию и др.	Духовные (сакральные), рекреационные, эстетические, чувство места, природное и культурное наследие

Таблица 2

Привязка пулов экосистемных услуг к ландшафтным выделам в дельте Лены (Северо-Якутская опорная зона) в типовой матрице анализа конфликтов природопользования (фрагмент)

Группы урочищ / экосистемные услуги	Нижние части склонов тундровые мохово-лишайниковые и кустарничковые	Межсопочные депрессии с заболоченной осоково-пушицевой мохово-кустарничковой тундрой	Подножья сопок тундровые		Заболоченные озерные котловины и долины рек с осоково-моховой и кустарничковой тундрой	Узкие долины рек с мохово-кустарничковой тундрой
			мохово-кустарничковые	мохово-лишайниковые с луговинами		
Регулирующие	+	+	+	+	+	+
Обеспечивающие	+	+	+	+	+	
Этнокультурные	–	+	+	+	+	–
Наиболее востребованные пулы		+	+	+	+	

Для трансграничной зоны потенциального конфликта природопользования, связанного с разработкой железистых кварцитов Бьорневатен (Норвегия), была проведена первичная оценка экономического ущерба от снижения пулов экосистемных услуг по депонированию углерода и фильтрации загрязненного воздуха лесами прилегающей территории Мурманской области, составившая 225 \$/га. Таким образом, показано экономическое значение монетизации пулов экосистемных услуг, необходимой для разрешения конфликтных ситуаций в природопользовании. На региональном уровне такие расчеты были выполнены для одной из территорий традиционного природопользования Ненецкой (рис. 1), а также Воркутинской опорных зон (водоочистные – 4–10 \$/га, этнокультурные – 0,7 \$/га и т. д.).

На основе системного анализа ландшафтной структуры модельных территорий, особенностей современной структуры природопользования на их территории и перспектив ее изменения в пространстве и времени, а также особенностей формирования ареалов развития конфликтов природопользования для целей картографирования были предложены классификация таких конфликтов и способы отображения их на карте:

- источник/ субъект конфликта: промышленное, лесохозяйственное, селитебное, рекреационное, транспортное и другие виды природопользования;
- арена развития конфликта: ландшафты региона;
- форма развития в пространстве: точечная, линейная, площадная;
- степень сложности: моно, парный, множественный;
- развитие конфликта во времени: потенциальный, реально существующий.

Для перспективного территориального планирования хозяйственного освоения АЗРФ с учетом возможностей развития конфликтов природопользования необходимо своевременное выявление пространственных сочетаний наиболее важных для территории природных, социально-экономических и экологических факторов, их провоцирующих. Среди них количественные показатели современного социально-экономического развития, экологической обстановки, развития неблагоприятных и опасных природных явлений, комфортности климата и тенденций его изменения и др. Заметим, что панархический характер формируемой природно-хозяйственной системы предопределяет процессы как препятствующие хозяйственному освоению, так и облегчающие его. Моделиро-

вание совокупного проявления таких процессов пока представляет собой сложную задачу [Dunbar, 1973]. Пространственные сочетания перечисленных факторов позволили провести ранжирование

АЗРФ для выявления приоритетных факторов, провоцирующих возникновение конфликтов природопользования, с использованием специального алгоритма [Тикун, 1997].

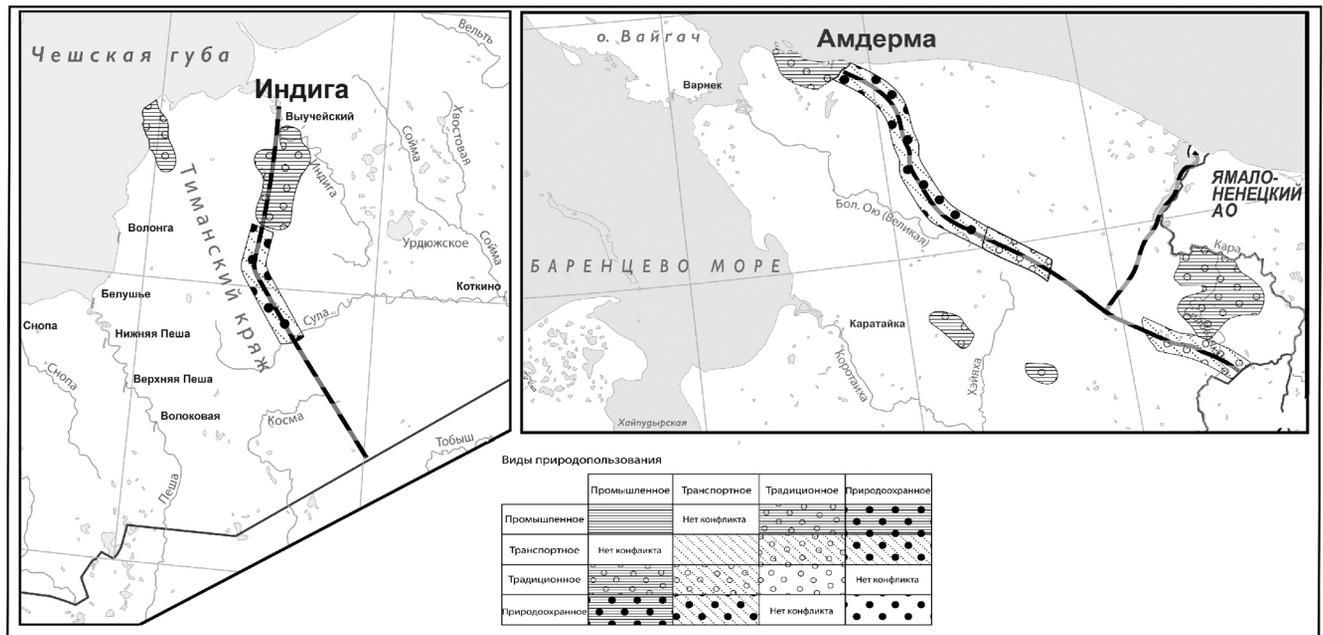


Рис. 1. Потенциальные конкурирующие виды природопользования в районах будущих транспортных терминалов в береговой зоне СЛО (Ненецкая опорная зона)

Fig. 1. Potential competing nature management types in the regions of future transport terminals in the coastal zone of the Arctic Ocean (the Nenets Advanced Development Zone)

Ранжирование проводилось на основе сравнения значений всех параметров, отнесенных к территориальным единицам, с условными значениями (x). Для ранжирования использовались евклидовы расстояния d – мера близости значений всех территориальных единиц к наихудшим значениям условного (x) по всему набору параметров

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_{kj})^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m,$$

где n – число территориальных единиц; m – число оцениваемых параметров; x – наихудшее значение для каждого оцениваемого параметра (социально-экономического, природного, экологического).

Реализация этого действия потребовала предварительной обработки массива данных методом главных компонент с целью ортогонализации и свертки системы параметров. Для удобства полученные данные векторного столбца d , представляющие оценочные характеристики, были дополнительно нормализованы. Используемый алгоритм также позволил выявить в оценке однородные тер-

риториальные группы. Процедура выделения этих групп была многовариантной и позволяла получить спектр однородных групп вариантов территориального распределения. Качество распределения оценивалось с использованием канонических коэффициентов корреляции, а также абсолютных и относительных коэффициентов гетерогенности.

По результатам ранжирования лучшие шансы на достижение целей устойчивого развития при хозяйственном освоении опорных зон оказались в европейской части АЗРФ по сравнению с Сибирью и Дальним Востоком. Природные факторы могут препятствовать этому процессу на основной территории Ненецкой и Чукотской опорных зон (резкий рост температур, разрушение устойчивости вечной мерзлоты и т. д.), а экологическая обстановка и наличие территорий традиционного природопользования коренных малочисленных народов осложняют освоение Воркутинской опорной зоны (% нарушенных земель, импактных зон, ООПТ и др.) и т. д. Результаты были визуализированы на карте с использованием метода цветового треугольника [Evseev et al., 2019].

ВЫВОДЫ

Разработанная методология и полученные с ее применением результаты могут быть использованы при осуществлении территориального планирования экономического развития опорных зон АЗРФ и принятия управленческих решений по оптимизации уже сложившейся структуры природопользования. Экосистемный подход для анализа конфликтов природопользования позволяет своевременно принимать меры по регулированию эксплуатации природного капитала территории с учетом интересов всех потребителей и необходимости сохранять экосистемные услуги «всеобщего достояния», обеспечивающие возможность устойчивого развития не только на региональном, но и на глобальном уровне. Включение этнокультурных и других информационных экосистемных услуг в программы регулирования важно для обеспечения социальной стабильности региона и сохранения его богатого природного и культурного наследия в процессе ускоренного социально-экономического развития территории. Возможность визуализации региональных оценок развития конфликтов природопользования и определяющих их факторов обеспечивает широкие возможности применения полученных результатов на практике.

Важной составляющей методологии является нацеленность на монетизацию стоимости эксплу-

атации экосистемных услуг, хотя базовая фактологическая информация для ее осуществления пока очень ограничена. Это означает необходимость расширения и углубления ландшафтно-экологических исследований АЗРФ. Создание банков данных такой информации предусмотрено Арктической доктриной России и программами ряда ее приарктических субъектов.

Разработка методологических подходов к выявлению конфликтов природопользования акцентирует внимание на панархическом характере социоприродных систем территории, выражающемся в одновременном развитии разнонаправленных в пространстве и времени природных, социально-экономических и экологических процессов. В связи с этим актуальной становится задача создания оптимальных моделей территориального развития с учетом этого фактора на основе интеграции ландшафтно-экологических и социально-экономических исследований с использованием методов математического моделирования.

Предложенная методология развивает теоретическую базу природопользования как активно формирующегося научного направления постнеклассического периода развития науки. Она может быть адаптирована для аналогичного анализа при хозяйственном освоении в иных природных и социально-экономических условиях.

Благодарности. Исследование проведено при поддержке грантов РФФИ № 18-05-00335, РФФИ № 20-47-01001, госбюджетной темы № 121040100322-8 «Анализ региональных геоэкологических проблем в условиях глобальных изменений окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакланов П.Я. Геосистемный подход в географических исследованиях // Тихоокеанская география. 2020. № 1. С. 7–12.
- Бобровин Ю.А., Резников В.Ф. Научные основания рационального природопользования и устойчивого развития региона: анализ подходов // Ползуновский вестник. 2005. № 4. С. 14–22.
- Красовская Т.М. Природопользование Севера России. М.: ЛКИ, 2008. 270 с.
- Красовская Т.М., Евсеев А.В. Современные конфликты природопользования на севере России / Проблемы гео-конфликтологии. М.: Пресс Соло, 2004. С. 276–294.
- Лопатников Д.Л. Грядущий глобальный постиндустриальный экологический переход // Мировое и национальное хозяйство. 2016. № 4. С. 1–10.
- Тикунев В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? Опыт формальных классификаций. М.; Смоленск: Изд-во Смоленского ун-та, 1997. 367 с.
- Экологический атлас России. М.: Феория, 510 с.
- Bastian O., Grunewald K., Khoroshev A.V. The significance of geosystem and landscape concepts for the assessment of ecosystem services: exemplified on a case study in Russia, *Landscape Ecology*, 2015, vol. 30, no. 7, p. 1145–1164.
- Boumans R., Costanza R., Farley J., Wilson M., Portela R., Rotmans J., Villa F., Grasso M. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model, *Ecological Economics*, 2002, vol. 41, p. 529–560.
- Burkhard B., Kandziora M., Ying Hou, Müller F. Ecosystem Service Potentials, Flows and Demands – Concepts for Spatial Localization, Indication and Quantification, *Landscape Online*, 2014, p. 1–32, DOI: 10.3097/LO.201434.
- Evseev A., Krasovskaya T., Tikunov V., Tikunova I. Planning Sustainable Economic Development in the Russian Arctic, *International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 357, 9 p., DOI: 10.3390/ijgi8080357.
- Jackson T. Prosperity without growth: economics for a finite planet, London, Earthscan, 2009, 264 p.
- Kienast F., Helfenstein J., Grêt-Regamey A., Haines-Young R., Potschin M. Ecosystem Services Under Pressure, *Landscape Series*, 2019, vol. 24, p. 91–101, DOI: 10.1007/978-94-024-1681-7_7.

Voinov A., Bromley L., Kirk E., Korchak A., Farley J., Moiseenko T., Krasovskaya T., Makarova Z., Megorski V., Selin V., Kharitonova G., Edson R. Understanding Human and Ecosystem Dynamics in the Kola Arctic: A Participatory Integrated Study, *Arctic*, 2004, vol. 7, no. 4, p. 376–388.

Электронные ресурсы

Смирнова О.О. Опорные зоны Арктики: проекты и перспективы // Доклад на форуме: Арктические про-

екты сегодня и завтра. Архангельск, 2016. URL: <http://sozvezdye-forum.ru> (дата обращения 20.12.2017).
Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. URL: www.garant.ru (дата обращения 15.12.2020).

Dunbar M.J. Stability and Fragility in Arctic Ecosystems. AINA Publications Server, p. 179–185, URL: <https://pubs.aina.ucalgary.ca/arctic/Arctic26-3-178.pdf> (дата обращения 20.01.2018).

Поступила в редакцию 04.02.2021

После доработки 05.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

NATURE MANAGEMENT CONFLICTS IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION: METHODOLOGY OF IDENTIFICATION AND MAPPING

A.V. Evseev¹, T.M. Krasovskaya², V.S. Tikunov³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Environmental Management, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: avevseev@yandex.ru*

² *Department of World Physical Geography and Geoecology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: krasovskttx@yandex.ru*

³ *Laboratory of Complex Mapping, Head of the Laboratory, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: vstikunov@yandex.ru*

The paper deals with methodology for identification and mapping of nature management conflicts in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF). A nature management conflict means crises in social-natural system; and their manifestations in the Arctic zone are various. An important cause of conflicts is inefficient economic development. Nature management conflicts result from certain combinations of environmental and anthropogenic factors and are spatially different. Nevertheless they have common features. They relate to excessive exploitation of natural capital formed by territorial pools of ecosystem services. Such pools may be revealed using landscape ecology methods. The change in the spectrum of the most demanded ecosystem services is determined by the programs and the level of economic development, as well as the ideological reasons, both ethno-cultural and ethical (i. e. the ethics of consumption in a post-industrial society). The most demanded ecosystem services in nature management of the advanced development zones in the AZRF were identified. Identification of nature management conflicts is based on monitoring data, thematic maps of different scales and also a retrospective analysis of geosystems degradation indicators associated with the development of such conflicts based on historical documents. The conflicts of nature management are more often linked to the pattern of the exploitation of ecosystem services, known as “The Tragedy of the Commons”, when their use is controlled by utilitarian interests of a stakeholder. This does not meet the sustainable development goals adopted by the AZRF development strategy. A general model and a standard matrix for identifying conflicts of nature management are proposed. These enable to identify competition for the exploitation of ecosystem services pools formed by a territorial landscape structure. An algorithm for determining the dynamics of ecosystem services pools is defined. Ranking of the territory was carried out based on the analysis of spatial combinations of the most important socio-economic, ecological and environmental factors that complicate or facilitate the economic development. A special algorithm was elaborated for this. A classification of conflicts has been developed for mapping purposes, as well as methods of their presentation on maps. The results of the methodology implementation including the ecological-economic assessment are presented for the Nenets, North Yakut, and Murmansk advanced development zones of the AZRF.

Keywords: conflict, ecosystem services, Arctic

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00335), the Russian Science Foundation (project no. 20-47-01001) and the state budget theme no. 121040100322-8 “Analysis of regional geocological problems under global environmental change”.

REFERENCES

- Baklanov P.Ya. Geosistemnyi podkhod v geograficheskikh issledovaniyakh [Geosystem approach in geographical studies], *Tikhookeanskaya geografiya*, 2020, no. 1, p. 7–12. (In Russian)
- Bastian O., Grunewald K., Khoroshev A.V. The significance of geosystem and landscape concepts for the assessment of ecosystem services: exemplified on a case study in Russia, *Landscape Ecology*, 2015, vol. 30, no. 7, p. 1145–1164.
- Bobrovin Yu.A., Reznikov V.F. Nauchnye osnovaniya ratsional'nogo prirodopol'zovaniya i ustoychivogo razvitiya regiona: analiz podkhodov [Scientific justification of rational nature management and regional sustainable development: analysis of approaches], *Polzunovskii vestnik*, 2005, no. 4, p. 14–22. (In Russian)
- Boumans R., Costanza R., Farley J., Wilson M., Portela R., Rotmans J., Villa F., Grasso M. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model, *Ecological Economics*, 2002, vol. 41, p. 529–560.
- Burkhard B., Kandziora M., Ying Hou, Müller F. Ecosystem Service Potentials, Flows and Demands – Concepts for Spatial Localization, Indication and Quantification, *Landscape Online*, 2014, p. 1–32, DOI: 10.3097/LO.201434.
- Ecologicheskij Atlas Rossii* [Ecological Atlas of Russia], Moscow, Feoria Publ., 2017, 510 p. (In Russian)
- Evseev A., Krasovskaya T., Tikunov V., Tikunova I. Planning Sustainable Economic Development in the Russian Arctic, *International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 357, 9 p., DOI: 10.3390/ijgi8080357.
- Jackson T. *Prosperity without growth: economics for a finite planet*, London, Earthscan, 2009, 264 p.
- Kienast F., Helfenstein J., Grêt-Regamey A., Haines-Young R., Potschin M. Ecosystem Services Under Pressure, *Landscape Series*, 2019, vol. 24, p. 91–101, DOI: 10.1007/978-94-024-1681-7_7.
- Krasovskaya T.M. *Prirodopol'zovanie Severa Rossii* [Nature management at the Russian North], Moscow, LKI Publ., 2008, 270 p. (In Russian)
- Krasovskaya T.M., Evseev A.V. [Modern nature management conflicts at the Russian North], *Problemy geokonfliktologii* [Problems of geoconflicts studies], Moscow, Press Solo Publ., 2004, p. 276–294. (In Russian)
- Tikunov V.S. *Klassifikatsii v geografii: renessans ili uvyadanie? (Opyt formal'nykh klassifikatsii)* [Classifications in geography: Renaissance or wasting away? (Experience in formal classifications)], Moscow, Smolensk, Smolensky Un-t Publ., 1997, 367 p. (In Russian)
- Voinov A., Bromley L., Kirk E., Korchak A., Farley J., Moiseenko T., Krasovskaya T., Makarova Z., Megorski V., Selin V., Kharitonova G., Edson R. Understanding Human and Ecosystem Dynamics in the Kola Arctic: A Participatory Integrated Study, *Arctic*, 2004, vol. 7, no. 4, p. 376–388.
- Web sources*
- Dunbar M.J. Stability and Fragility in Arctic Ecosystems. AINA Publications Server, p. 179–185, URL: <https://pubs.aina.ucalgary.ca/arctic/Arctic26-3-178.pdf> (access date 20.01.2018).
- Smirnova O.O. Support zones of the Arctic: projects and prospects, *Report at the forum: Arctic projects today and tomorrow*, Arkhangelsk, 2016, URL: <http://sozvezdye-forum.ru> (access date 20.12.2017).
- Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda* [Strategy of the Russian Federation development and ensuring of national security for the period till 2035], 2020, URL: <http://www.garant.ru> (access date 15.12.2020). (In Russian)

Received 04.02.2021

Revised 05.06.2021

Accepted 20.07.2021

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ КАК ИНДИКАТОР КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ В ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКЕ В XXI ВЕКЕ

В.В. Иванов¹, В.С. Архипкин², Е.М. Лемешко³, С.А. Мысленков⁴, А.В. Смирнов⁵,
Г.В. Суркова⁶, Ф.К. Тузов⁷, Д.Г. Чечин⁸, А.А. Шестакова⁹

^{1,2,4,6,7} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

^{1,5} Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, отдел взаимодействия океана и атмосферы

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ФИЦ «Морской гидрофизический институт», лаборатория гидрофизических подспутниковых исследований

⁴ Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, лаборатория экспериментальной физики океана; Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, отдел морских гидрологических прогнозов; океанолог

⁷ Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (ВНИИ ГОЧС) (Федеральный центр науки и высоких технологий), семьдесят второй научно-исследовательский отдел

^{8,9} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН», лаборатория взаимодействия атмосферы и океана

¹ Кафедра океанологии, вед. науч. сотр.; гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru

² Кафедра океанологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: victor.archipkin@gmail.com

³ Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

⁴ Кафедра океанологии, ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: stasoccean@gmail.com

⁵ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alexander.vic.smirnov@gmail.com

⁶ Кафедра метеорологии и климатологии, доц., д-р геогр. наук; e-mail: galina_surkova@mail.ru

⁷ Мл. науч. сотр. (МГУ); науч. сотр. (ВНИИ ГОЧС); e-mail: fedor-tuz@mail.ru

⁸ Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: chechin@ifaran.ru

⁹ Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: shestakova.aa.92@gmail.com

В настоящее время надежно установлено, что изменение климата в Арктике происходит значительно быстрее, чем в среднем по планете, вследствие так называемого эффекта «арктического усиления». Комплексный анализ современного состояния гидрометеорологических условий в Баренцевом море, результаты которого кратко обобщены в данной статье, позволил оценить генеральные направления происходящих изменений, которые в дальнейшем могут распространиться на лежащие восточнее окраинные моря Северного Ледовитого океана. На основе данных наблюдений, атмосферного и океанского реанализов и спутниковой информации исследованы гидрометеорологические условия в Баренцевом море при значительно сократившемся морском ледяном покрове. Фундаментальным выводом, полученным в результате выполненного анализа, является заключение о возможности активизации обратных связей в системе «океан – лед – атмосфера» вследствие генерального отступления ледовой кромки в Баренцевом море в северо-восточном направлении. Сокращение ледяного покрова в первую очередь влияет на характер энергообмена между океаном и атмосферой. Вследствие этого меняется режим формирования водных масс в направлении уменьшения роли ледяного покрова, возрастания роли горизонтальной адвекции и аккумуляции тепла в верхнем слое вод. Однако изменчивость потоков тепла модулируется комбинацией таких факторов, как атмосферная циркуляция и адвекция тепла в океане. Так как долгопериодные изменения в океане и атмосфере происходят не синхронно, прямой связи между изменением потоков тепла и площадью морского льда не наблюдается. Вследствие уменьшения площади морского льда с 2007 г. установлено значительное увеличение потоков скрытого тепла и, благодаря этому, суммарных потоков, тогда как потоки явного тепла, наоборот, уменьшились. Показано, что частота холодных вторжений над Баренцевым морем, также влияющих на потоки тепла, в основном определяется межгодовой изменчивостью повторяемости различных крупномасштабных мод циркуляции атмосферы и с площадью льда непосредственно не связана.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, гидрометеорологические условия, изменение климата, взаимодействие океана и атмосферы, морские течения, волны, водные массы, уровень моря

ВВЕДЕНИЕ

Если в конце 1990-х и даже начале 2000-х гг. климатические прогнозы сезонно безледного Се-

верного Ледовитого океана (СЛО) в конце XXI в. многими воспринимались со скепсисом, то после рекордного сокращения площади ледяного покро-

ва в 2007 г. отношение к таким сценариям заметно изменилось. Более того, устойчивое сохранение аномально низкой летней площади льда в период с 2007 г. по настоящее время заставило ученых-климатологов пересмотреть ожидаемые сроки перехода к сезонно безледному СЛО на существенно более ранние (в среднем к середине XXI в.) или даже раньше [Guarino et al., 2020]. С учетом этого, понимание и обоснованный прогноз изменений гидрометеорологического режима СЛО и его окраинных морей вследствие меняющихся ледовых условий является актуальным и важным. В таком контексте Баренцево море занимает особое место, поскольку в силу своего географического положения оно может рассматриваться как своего рода «ворота» Арктики, изменения в которых могут служить предвестником изменений, которые в дальнейшем охватят лежащие к востоку и северу регионы.

Результаты недавних отечественных и зарубежных исследований свидетельствуют о том, что наиболее резкие изменения в 2010-е гг. произошли в северной и северо-восточной частях Баренцева моря. Постепенное повышение температуры и солености в этом районе отмечается с середины 2000-х гг. [Schlichtholz, 2019]. Подобную тенденцию гипотетически связывают с общим сокращением объема морского льда в СЛО, следствием чего является снижение импорта льда на акваторию Баренцева моря и вызванного этим осолонения, что ведет к ослаблению плотностной стратификации, интенсификации вертикального перемешивания и возрастанию поступления тепла и соли из глубин к поверхности моря [Lind et al., 2018]. Результатом подобных изменений является дальнейшее сокращение морского льда, т. е. реализация положительной обратной связи [Ivanov et al., 2016], которую в современной научной литературе принято определять термином «атлантификация» [Polyakov et al., 2017]. Поскольку Баренцево море является сравнительно мелководным бассейном (средняя глубина составляет 230 м), процесс атлантификации развивается здесь значительно быстрее, чем в расположенном к северу глубоководном Арктическом бассейне. В силу этого гидрологический режим в северо-восточной части Баренцева моря может в ближайшие годы полностью трансформироваться к квазиатлантическому типу, характерной чертой которого является круглогодичное отсутствие ледяного покрова с дискуссионными последствиями для климата и экосистемы моря и прилегающих районов суши.

В рамках проекта РФФИ-Арктика № 18-05-60083 был выполнен комплексный анализ современных гидрометеорологических условий в Баренцевом море, включавший рассмотрение влияния атмосферной циркуляции на метеорологические параметры и

тепловые потоки на границе океана и атмосферы, пространственно-временную изменчивость энергообмена между океаном и атмосферой (включая оценку вклада холодных вторжений), штормовую активность, адвекцию тепла в океане и стерические колебания уровня. В статье представлены наиболее значимые результаты проекта. В заключительном разделе выполнен синтез результатов, полученных по отдельным направлениям исследований, с целью построения обобщенной картины наблюдаемых изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния атмосферной циркуляции на метеорологические параметры и тепловые потоки на границе океана и атмосферы основывалось на среднемесячных данных из реанализа ERA-Interim для Северного полушария в широтной зоне 60–90° с. ш. за период с 1979 по 2018 г. с разрешением по пространству 0,125° [Dee et al., 2011; ECMWF..., 2019]. Типизация барических полей производилась с помощью нелинейного метода самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) для нейронной сети, позволяющего выделить пространственно-временные структуры в последовательности скалярных полей [Applications..., 2012]. Для оценки связи общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и пространственно-временных особенностей энергообмена океана и атмосферы также были использованы индексы атмосферной циркуляции, наиболее значимые в этом регионе: индекс североатлантического колебания NAO, индекс арктического колебания AO, индекс скандинавского колебания SCAND. Использовались ежегодные среднемесячные индексы, размещаемые Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [Climate Prediction..., 2019]. Для исследования влияния внешних условий на турбулентные потоки тепла были проведены численные эксперименты с помощью алгоритма COARE [COARE-Met..., 2019] с применением набора параметризаций шероховатости для штормов различного типа и интенсивности. В качестве входных данных использовался реанализ CFSR [Climate Data, 2019]. Для выделения экстремальных холодных вторжений применялась разность среднесуточных потенциальных температур поверхности моря и воздуха на высоте 700 гПа (I_{CAO}):

$$I_{CAO} = CAO + \sigma_I, \quad (1)$$

где CAO – многолетнее среднее, рассчитанное для каждого дня года в результате осреднения за 30-дневный период, центр которого приходится на конкретный день; σ_I – многолетнее среднее

стандартное отклонение за каждый 30-дневный период (СКО). Для выделения случаев холодных вторжений использовалось условие превышения I_{CAO} суммы многолетнего среднего индекса и СКО. Исследование штормовой активности было выполнено согласно методике POT (Peak Over Threshold), описанной в работе [Мысленков, 2019]. Для каждого года на акватории Баренцева моря было рассчитано количество случаев штормового волнения с различной высотой значительных волн от 5 до 10 м. Методика расчета заключалась в подсчете количества переходов исследуемой величины через заранее определенный критерий. Чтобы исключить возможные ошибки, между двумя случаями штормового волнения должно было пройти не менее девяти часов. Для дальнейших расчетов потоков тепла был составлен каталог штормов с высотой значительных волн более 5 м. Всего было выделено 2007 случаев штормов или 1964 штормовых дня за период с 1979 по 2017 г. Оценка влияния морских волн на турбулентные потоки тепла в Баренцевом море была выполнена при помощи алгоритма COARE и данных метеорологического реанализа NCEP/CFSR/CFSv2. Также был выполнен ряд численных экспериментов с разными параметризациями шероховатости морской поверхности. Для исследования влияния адвекции тепла в океане на термохалинную структуру и ледяной покров моря были использованы данные океанического реанализа GLORYS12V1 (МЕРКАТОР) [Mercator..., 2019] и материалы натурных наблюдений в Баренцевом море в экспедиции «Трансарктика-2019» [Фролов и др., 2019]. Данные реанализа МЕРКАТОР были подготовлены в формате числовых массивов, позволяющих осуществлять пространственно-временные выборки по заданным критериям поиска, включающим время и географические координаты. Основой для изучения многолетней изменчивости стерического уровня Баренцева моря послужили океанографические данные из базы World Ocean Database 2018 [World..., 2019]. Для исследования стерических колебаний уровня моря были выбраны две характерные области, в первой из которых термохалинная структура вод определяется адвекцией теплых атлантических вод, а вторая расположена в центральной части моря, где в холодное время года формируется собственная водная масса. Вычисления стерических отклонений уровня моря и их термической и соленостной составляющих проводились по формулам, приведенным в работе [Архипкин, Добролюбов, 2005]. Расчеты проводились относительно средней океанографической станции, рассчитанной для каждого квадрата за определенный месяц за все годы вычислений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние атмосферной циркуляции на метеорологические параметры и энергообмен между океаном и атмосферой. Для описания сезонной изменчивости типов атмосферной циркуляции был рассчитан индекс сезонной повторяемости самоорганизующихся карт атмосферного давления за период с 1979 по 2018 г. В сезонном ходе с повторяемостью 25% наблюдается циклонический тип приземного давления, который доминирует в летние месяцы, достигая максимальной повторяемости 94% в июле и августе, в то время как в зимний период (декабрь–февраль) преобладают антициклонические или смешанные типы циркуляции. Весной преобладает антициклонический тип с максимальной повторяемостью в мае до 60%. Повторяемость каждого типа циркуляции в течение одного года количественно выражается соответствующим индексом. Он подвержен значительной межгодовой изменчивости, что характеризует два основных циркуляционных режима над Арктикой – циклонический и антициклонический – с переходными фазами между ними. В целом это соответствует межгодовой изменчивости Арктического колебания (АО), положительная фаза которого соответствует циклонической циркуляции, а отрицательная – антициклонической, но использованный подход дает более детальную картину типов циркуляции и позволяет связать с ними распределения метеорологических параметров.

Для каждого выделенного типа поля атмосферного давления рассчитывалось соответствующее ему поле метеорологического параметра, осредненного по тем же периодам времени, в пределах которых существовал данный тип циркуляции. Такой композитный анализ для каждого из шести типов циркуляции был проведен за период с 1979 по 2018 г. для следующих полей: температуры поверхности моря (ТПМ), фракции морского льда, приземной температуры воздуха (ПТВ), турбулентных потоков влаги и тепла. В поле ТПМ выделяются меридиональные градиенты температуры, которым соответствуют более слабые потоки тепла в юго-восточной части Баренцева моря по сравнению с его северо-западной и северо-восточной частями. Выявлены характерные типы изменчивости потоков тепла и влаги в Баренцевом море, модулирующиеся атмосферной циркуляцией и адвекцией тепла атлантическими водами, которые хорошо трассируются по картам температуры поверхности моря.

Были проанализированы пространственные и сезонные зависимости между потоками явного и скрытого тепла и индексами общей циркуляции атмосферы: АО, Северо-Атлантического колебания (NAO) и скандинавского колебания SCAND. Пока-

зано, что корреляция между потоками и индексами на акватории Баренцева моря имеет существенную неоднородность вследствие активной циклонической деятельности в этом регионе, а также сопоставимости территории моря с размерами синоптических вихрей, циклонов и антициклонов, в разных секторах которых происходит адвекция воздушных масс из других широт. В разных частях вихрей на фоне адвекции более теплого, чем ТПМ, воздуха вертикальный градиент температуры меняется. Установлено, что связь с индексом АО на протяжении года преимущественно отрицательная и наиболее выражена зимой, поскольку положительная фаза индекса соответствует вторжениям с севера, что способствует интенсификации потоков явного и скрытого тепла над открытой водой. Связь с индексом NAO имеет значительную пространственную неоднородность, в разных частях моря знак может быть различен. Индекс SCAND свидетельствует о наличии области повышенного давления над Скандинавским полуостровом. Подобная синоптическая ситуация наблюдается реже, несмотря на то что циклоническая деятельность в регионе довольно активна. В этом случае усиливается адвекция холодного воздуха с севера, что стимулирует энергообмен между морем и атмосферой. Поэтому значимые связи между SCAND и величиной потоков тепла имеют преимущественно положительный знак и более выражены в теплый период, а также осенью и в начале зимы. В целом можно заключить, что связь индексов общей циркуляции атмосферы и интенсивности теплообмена между морем и атмосферой характеризуется значительной годовой и пространственной изменчивостью, детально рассмотренной в следующем разделе.

Пространственно-временная изменчивость энергообмена между океаном и атмосферой. Вопрос пространственно-временной изменчивости турбулентного энергообмена океана и атмосферы над Баренцевым морем рассматривался по двум направлениям. Первое – определение ежегодных суммарных

потоков явного и скрытого тепла над всей площадью моря. Второе – выявление районов, где режим теплообмена между морем и атмосферой наиболее чувствителен к изменению атмосферной циркуляции. Сопоставление режима теплообмена над Баренцевым и Карским морями выполнялось для каждой из задач, чтобы подчеркнуть роль наличия морского льда в интегральном теплообмене моря и атмосферы – контрастный ледовый режим этих двух морей определяется влиянием архипелага Новая Земля, который отрезает приток теплых атлантических вод в Карское море. Расчеты показали, что суммарные годовые потоки явного тепла со всей акватории Баренцева моря в среднем за исследуемый период больше, чем над Карским морем в три-четыре раза, а в отдельные годы превышают их в десятки раз (рис. 1). Поступление скрытого тепла в атмосферу за год с поверхности Баренцева моря в

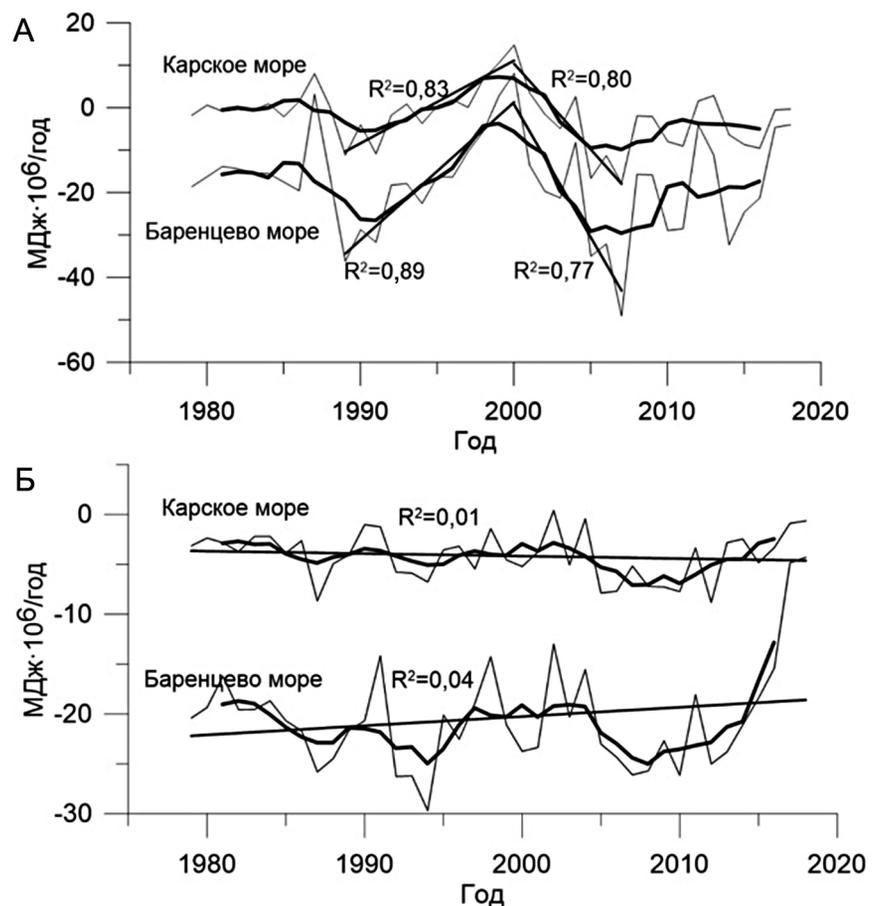


Рис. 1. Многолетние изменения суммарного годового потока явного (А) и скрытого (Б) тепла над акваториями Баренцева и Карского морей (тонкая линия), скользящая средняя – 5-летний интервал сглаживания (жирная линия), линии регрессии (прямые) и соответствующий им квадрат коэффициента линейной корреляции R^2

Fig. 1. Long-term changes in the total annual flux of sensible (A) and latent (Б) heat over the Barents and Kara Seas (thin line), running average – 5-year smoothing interval (bold line), regression lines (straight lines) and the corresponding square of the linear correlation coefficient R^2

пять-шесть раз больше, чем с Карского моря, а в некоторые годы величина интегральных потоков может отличаться на порядок величины. Как следует из рисунка 1, за период с 1979 по 2018 г. единый тренд интегральной по акватории годовой величины потоков явного и скрытого тепла статистически незначим. Тем не менее присутствуют более короткие направленные декадные изменения, в том числе выражено уменьшение потоков явного тепла на протяжении 1990-х гг. и их увеличение в первом десятилетии XXI в. и вновь уменьшение в 2010-е гг. Уменьшение турбулентных потоков происходит на фоне ослабления широтного переноса в атмосфере и увеличения площади морского льда. С 2007 г. в связи с уменьшением площади морского льда наблюдается значительное увеличение потоков скрытого тепла, а также суммарных потоков. Статистические оценки показали, что, несмотря на существенную разницу суммарных за год потоков тепла от поверхности Баренцева и Карского морей в атмосферу, межгодовые изменения достаточно хорошо синхронизированы, что свидетельствует об общности крупномасштабных гидрометеорологических процессов в этих морях, влияющих на турбулентный энергообмен между морями и атмосферой.

Были проведены численные эксперименты для оценки влияния морского волнения на коэффициент шероховатости и турбулентные потоки с использованием параметризаций Чарнока (без явного учета волнения) и параметризаций [Taylor, Yelland, 2001; Drenan et al., 2003; Oost et al., 2002], которые учитывают параметры волн в явном виде. Расчеты были проведены для 1979–2017 гг., а также отдельно для периодов, когда наблюдались холодные вторжения и штормовое волнение. Различия среднеголетних значений потоков тепла, рассчитанные с использованием различных параметризаций, малы и составляют в среднем 1–3%. Параметризации [Taylor, Yelland, 2001; Oost et al., 2002] в среднем приводят к увеличению потоков тепла, а параметризация [Drennan et al., 2003] – к уменьшению величины потоков по всему морю по сравнению с параметризацией Чарнока. Различия в потоках тепла во время штормов с высотой волн более 5 м превышают средние значения в два раза. В целом эффект от явного учета параметров волн небольшой. Можно заключить, что для климатических расчетов целесообразно пренебречь явным учетом параметров морских волн. Однако если шторма и холодные вторжения наблюдаются одновременно, то чувствительность расчетных значений потоков к используемым в параметризации существенно увеличивается. В некоторых случаях разница может достигать 700 Вт/м².

Для более детального исследования зависимости межгодовой изменчивости потерь тепла с поверхности Баренцева моря от режима циркуляции атмосферы были выполнены оценки повторяемости экстремальных холодных вторжений (ХВ) над Баренцевым морем по данным атмосферного реанализа (рис. 2). Получена высокая корреляция между повторяемостью холодных вторжений и средней за холодный сезон потерей тепла со свободной ото льда поверхности Баренцева моря. Эта корреляция обнаружена как для турбулентных потоков явного и скрытого тепла, так и для суммарного потока длинноволновой радиации [Myslenkov et al., 2021]. На пространственно-временную изменчивость потерь тепла с поверхности моря влияет не только повторяемость холодных вторжений, но и положение прикромочной зоны. Так, в годы минимальной ледовитости моря в его восточную часть протягивается область максимальных значений потока явного тепла, а поток скрытого тепла и суммарный поток длинноволновой радиации также достигают больших абсолютных значений над свободной ото льда поверхностью моря. Это означает, что в такие годы восточная часть Баренцева моря подвержена сильному выхолаживанию, что может существенно влиять на процессы трансформации водных масс, стратификацию и перемешивание.

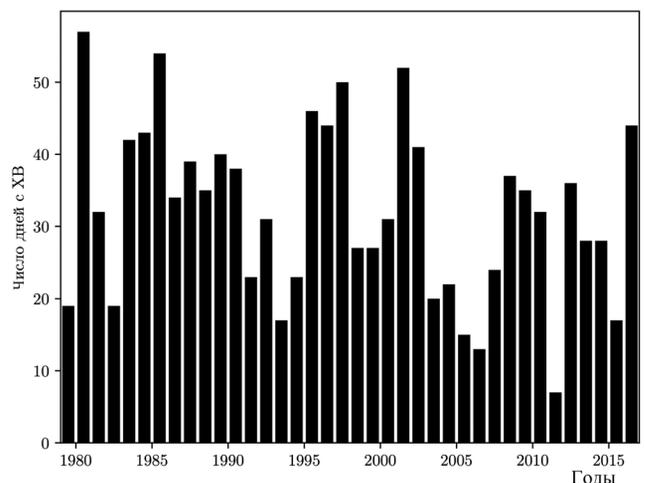


Рис. 2. Число дней с холодными вторжениями (ХВ) над Баренцевым морем по данным атмосферного реанализа ERA-Interim

Fig. 2. Number of days with cold invasions over the Barents Sea according to atmospheric reanalysis ERA-Interim

В среднем, холодные вторжения наблюдаются в 16,4% дней. Однако для их повторяемости характерна сильная межгодовая изменчивость – среднеквадратическое отклонение количества дней с холодными вторжениями составляет 12 дней. Следует отметить, что значимого тренда изменения повторяемости холодных вторжений и его связи с ледовитостью моря не прослеживается. Частота хо-

лодных вторжений над Баренцевым морем определяется межгодовой изменчивостью повторяемости различных крупномасштабных мод циркуляции атмосферы. В наибольшей степени повторяемость холодных вторжений коррелирует с индексом SCAND, характеризующим интенсивную адвекцию холода с севера и северо-востока. Кроме того, отмечается отрицательная корреляция индекса NAO с повторяемостью холодных вторжений над Баренцевым морем [Kolstad et al., 2009]. Особенно сильна отрицательная корреляция индекса NAO с повторяемостью восточных холодных вторжений над Баренцевым морем, что, очевидно, соответствует нарушению западного переноса. Доля восточных холодных вторжений над Баренцевым морем существенна (16% случаев). Наибольшую повторяемость имеют северное (30%) и северо-восточное (27%) направления ветра.

Штормовая активность и новоземельская бора. На основе результатов моделирования волнения была рассчитана повторяемость штормов в Баренцевом море с 1979 по 2019 г. для различных критериев от 6 до 9 м (рис. 3). В среднем повторя-

емость случаев с высотой волн более 6 м составляет около 30 случаев, а максимальные значения повторяемости наблюдаются в 1990–1993 гг. Для случаев с высотой волн более 6–9 м выделяются следующие тренды: с 1979 по 1991–1993 гг. наблюдалось увеличение повторяемости, с 1991–1993 по 1999–2000 гг. – уменьшение, а далее снова небольшое увеличение. В среднем за весь период с 1979 по 2019 г. тенденции на однозначное увеличение количества случаев штормового волнения не отмечается. Межгодовая изменчивость повторяемости штормового волнения очень велика (для разных годов количество случаев может меняться в два-три раза). При сопоставлении повторяемости штормового волнения и индекса АО обнаружено, что максимальный коэффициент корреляции наблюдается при осреднении индекса и повторяемости с декабря по март и составляет 0,6 для случаев с высотой волн более 7 м и 0,57 при высоте волн более 8 м. Генеральное направление штормовых волн (более 6 м) для Баренцева моря с запада, поэтому увеличение длины разгона с севера не влияет на повторяемость штормов.

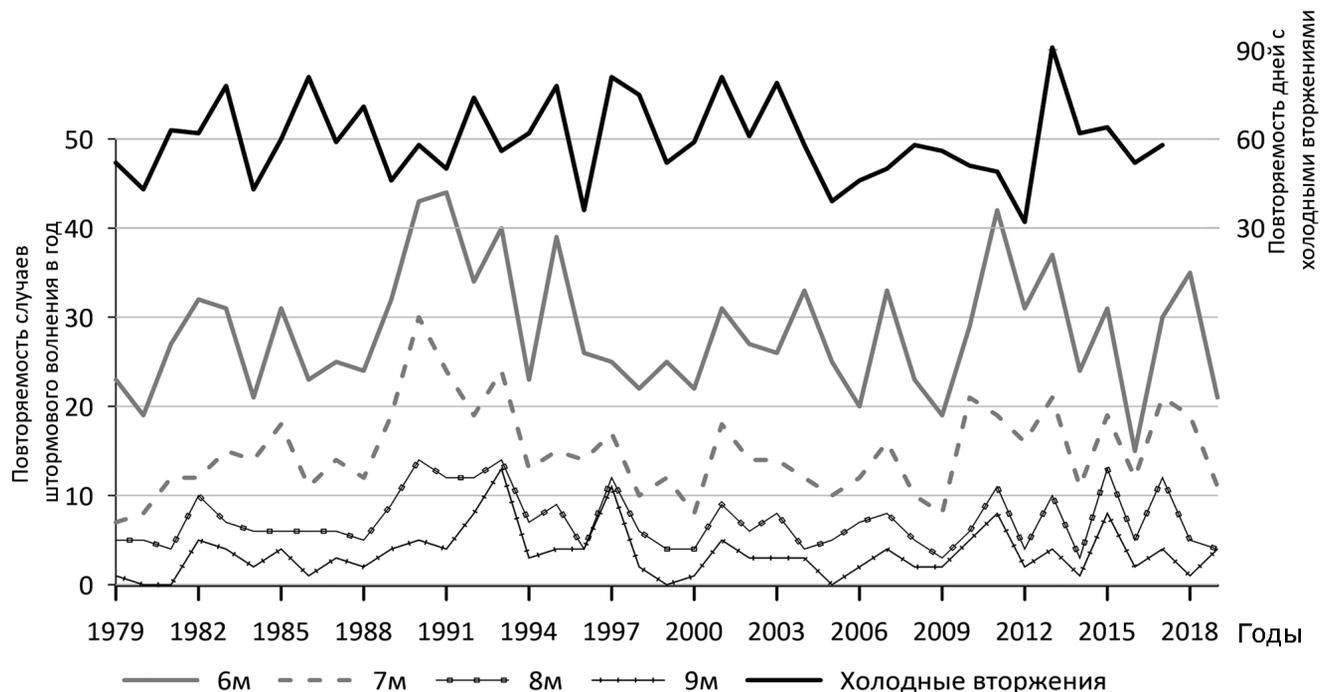


Рис. 3. Повторяемость случаев штормового волнения в Баренцевом море с различной максимальной высотой волн с 1979 по 2019 г.

Fig. 3. Frequency of storms with different maximal wave height in the Barents Sea during 1979–2019

Были проведены эксперименты с атмосферной моделью WRF и волновой моделью WW3 для нескольких эпизодов новоземельской боры [Shestakova et al., 2020]. Эксперименты показали, что аномалия высоты волн во время сильной

боры на востоке Баренцева моря достигает 2–3 м, а влияние боры распространяется на расстояние до 200 км от берега. Используя известные параметризации коэффициента шероховатости z_0 с учетом волнения, была приближенно оценена ошибка в

определении шероховатости, вызванная недоучетом высоты волн, связанных с борой. Эта ошибка для рассмотренных эпизодов боры в среднем имеет порядок 10^{-3} – 10^{-2} м, т.е. сопоставима с самой величиной шероховатости над морской поверхностью при умеренном и сильном ветре [Китайгородский, Волков, 1965]. Из-за высокой повторяемости и интенсивности новоземельской боры ее влияние на волнение и связанные с ним процессы может приводить и к заметному климатическому отклику.

Адвекция тепла в океане и ее влияние на термохалинную структуру вод. Результаты анализа пространственной изменчивости данных гидрологических наблюдений на трех последовательных разрезах в Баренцевом море позволяют заключить, что существующая концепция о преобладающей трансформации поступающих из Норвежского моря Атлантических вод (АВ) вследствие зимней конвекции в открытом море требует пересмо-

тра. Новые данные наблюдений, согласованные с продуктами океанского реанализа, указывают на определяющую роль каскадинга с западного шельфа архипелага Новая Земля [Ivanov et al., 2004] как основного механизма, обеспечивающего интенсивное охлаждение АВ. Формирующиеся в результате халинной конвекции на мелководных шельфах холодные уплотненные воды стекают в виде придонных гравитационных течений в глубоководные котловины, перемешиваясь с АВ. Конечным продуктом такого взаимодействия водных масс является так называемая Баренцевоморская Атлантическая вода (БАВ), которая приобретает характерные термохалинные индексы (отрицательную температуру и пониженную соленость) в северо-восточной части Баренцева моря и в дальнейшем поступает в Арктический бассейн Северного Ледовитого океана через желоб Святой Анны [Фролов и др., 2019; Иванов и др., 2020].

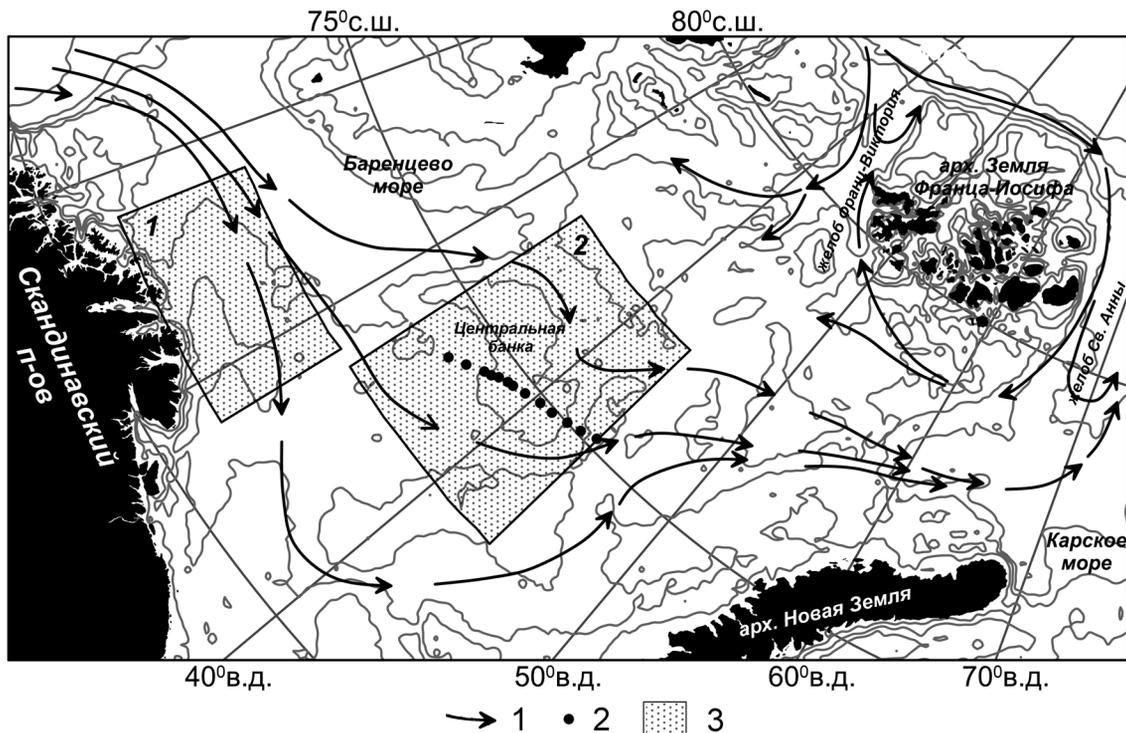


Рис. 4. Рельеф дна Баренцева моря: 1 – основные пути переноса Атлантических вод (АВ); 2 – положение вертикального разреза через Центральную банку (см. рис. 5); 3 – районы 1 и 2, для которых выполнялся анализ стерических колебаний уровня (см. следующий подраздел)

Fig. 4. Relief of the bottom of the Barents Sea: 1 – the main ways of transporting Atlantic waters (AB); 2 – the position of the vertical section through the Central Bank (see Fig. 5); 3 – regions 1 and 2, for which the analysis of steric level fluctuations was performed (see the next subsection)

Центральная банка является важным элементом донной топографии Баренцева моря, влияющим на его гидрологический режим через формирование холодных уплотненных вод в зимний сезон [Ivanov et al., 2004]. Эти воды стекают вдоль склонов бан-

ки в сопредельные глубоководные бассейны, что приводит к разделению изначально единого потока Нордкапского течения на две струи (рис. 4). Принципиально новым результатом, полученным в экспедиции «Трансарктика-2019» и подтвержден-

ным методами математического моделирования, является установление факта, что зимняя конвекция над Центральной банкой может быть чисто термической. То есть для формирования однородного «столба» уплотненной воды над банкой не обязательно требуется осолонение при ледообразовании, что предполагалось ранее в качестве необходимого условия [Quadfasel et al., 1992]. Этот тезис подтверждается тем, что в конце марта 2019 г. граница консолидированного однолетнего льда располагалась в 80–100 милях к северу от Центральной банки, тогда как появление дрейфующего льда над банкой датируется второй половиной апреля. На одномерной модели термохалинной конвекции была воспроизведена эволюция вертикальной термохалинной структуры в центре банки (точке с минимальной глубиной) [Ivanov et al., 2016]. Формирование однородного по плотности столба воды над центральной банкой датируется второй половиной января 2019 г. При этом температура воды не дости-

гает точки замерзания. Импорт льда в район банки в апреле 2019 г. привел к его таянию и образованию приповерхностного распресненного слоя, который остановил дальнейшее развитие конвекции. Иллюстрирует это утверждение распределение аномалии потенциальной плотности на разрезе через Центральную банку по данным наблюдений (рис. 5А) и реанализа МЕРКАТОР (рис. 5Б) в мае 2019 г. Таким образом, выявлена двойственная роль ледяного покрова над Центральной банкой. В случае холодных зим, наблюдавшихся во второй половине XX в., локальное ледообразование над банкой способствовало халинной конвекции и возбуждало каскадинг. В условиях современного сокращения ледяного покрова формирование однородного от поверхности до дна столба воды над банкой возможно в безледных условиях за счет термического уплотнения более теплой АВ, поступающей из Норвежского моря, тогда как импорт льда извне, наоборот, приводит к блокированию вертикальной конвекции.

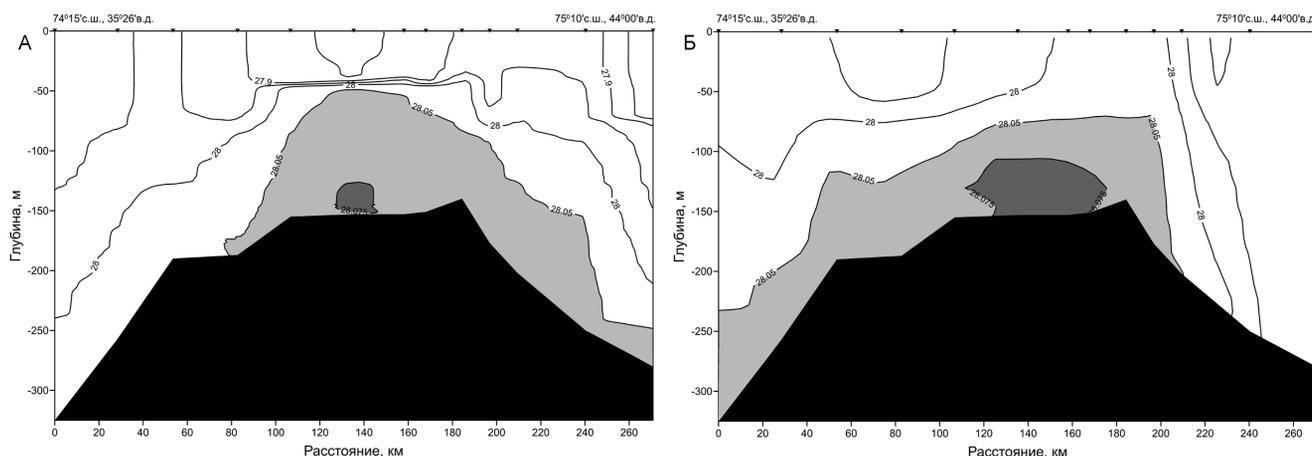


Рис. 5. Вертикальный разрез аномалии потенциальной плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) через Центральную банку 15 мая 2019 г. по результатам CTD-измерений (А) и данным реанализа МЕРКАТОР (Б).

Положение разреза показано на рис. 4 черными кружками

Fig. 5. Vertical section of potential density anomaly (kg/m^3) across the Central Bank on May, 15, 2019 on the basis of CTD-measurements (A) and MERKATOR reanalysis data (B). Location of the section is shown on Fig. 4 by black circles

Стерические колебания уровня в условиях меняющейся термохалинной структуры вод. В результате выполненных расчетов были выявлены особенности многолетних стерических колебаний уровня. В районе 1 в исследуемый период времени в августе суммарный стерический уровень моря повышался со скоростью около 0,3 мм/год (рис. 6А). Однако повышение было неоднородно по времени. Весь период исследования можно разделить по скорости изменения стерического уровня на два временных этапа: первый – с 1955 по 1997 г., второй – с 1997 по 2018 г. На первом этапе уровень понижался со скоростью 0,4 мм/год, на втором – повышался со скоростью 0,5 мм/год. Следует отметить, что смена

знака изменения уровня совпала с известным климатическим режимным сдвигом 1977–1978 гг. В последние двадцать лет скорость повышения стерического уровня возросла до 0,12 мм/год. При этом скорость подъема уровня в период с 1955 по 2018 г. в некоторые десятилетия была даже больше. Например, с 1995 по 2005 г. она достигала 0,28 мм/год. На фоне глобального повышения уровня отмечаются колебания с периодами 8–10 лет, что подтвердил спектральный анализ. В многолетних изменениях стерического уровня в районе 1 в феврале не выделяются этапы, обнаруженные в августе: на всем временном интервале с 1955 по 2018 г. стерический уровень повышался со средней скоростью

0,5 мм/год (рис. 6Б). Однако тенденция ускорения повышения стерического уровня с 1977 г. по настоящее время сохраняется – скорость подъема уровня в феврале на отрезке с 1977 по 2018 г. увеличивалась до 0,9 мм/год. В районе 2 средняя скорость повышения уровня такая же, как и в районе 1. Однако здесь влияние климатического режимного сдвига не выражено. Обобщенная оценка вклада температуры и солености в повышение стерического уровня в Баренцевом море показала, что оно обусловлено термической составляющей, тогда как соленостная имеет обратную тенденцию.

ВЫВОДЫ

Значимость полученных в рамках проекта результатов определяется необходимостью непрерывного мониторинга состояния среды Арктики в условиях быстрых климатических изменений,

характеризующихся высокой степенью неопределенности. В настоящее время надежно установлено, что изменения климата в Арктике происходят значительно быстрее, чем в среднем по планете, вследствие так называемого эффекта «арктического усиления». Согласно оценкам Международной группы экспертов по изменению климата [Climate..., 2013], в зависимости от сценария эмиссии парниковых газов в атмосферу средняя приземная температура воздуха в арктическом регионе в 2081–2100 гг. возрастет на 4–8°C по сравнению с наблюдавшейся в 1986–2005 гг. Комплексный анализ современного состояния гидрометеорологических условий в Баренцевом море позволяет оценить генеральные направления происходящих изменений, которые в дальнейшем могут распространиться на лежащие восточнее окраинные моря СЛО.

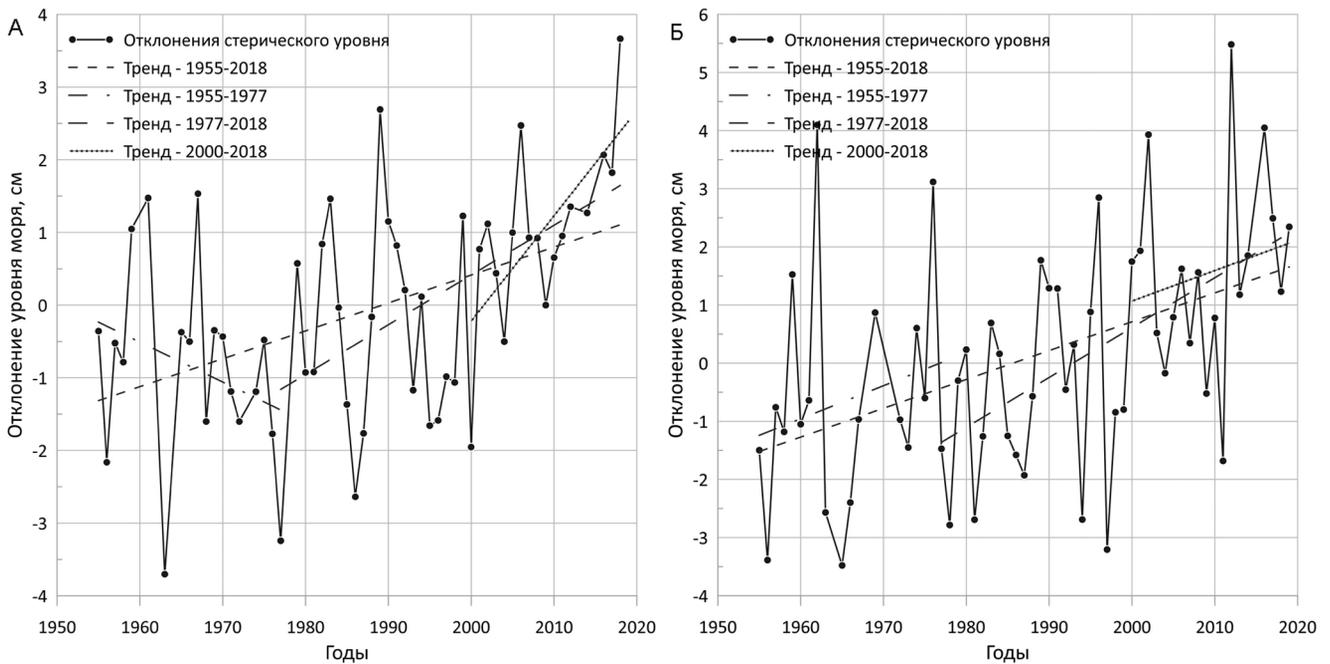


Рис. 6. Стерические колебания уровня в районе 1 в августе (А) и в феврале (Б).

Линии без точек – линейные тренды на разных временных отрезках (географическое положение районов представлено на рис. 4)

Fig. 6. Steric sea level oscillations in the region 1 in August (A), and in February (B).

Lines without symbols show linear trends over various time intervals (geographic location of regions is shown on Fig. 4)

Сокращение ледяного покрова в первую очередь влияет на интенсивность потоков тепла и влаги между океаном и атмосферой. В результате меняется режим формирования водных масс в направлении уменьшения роли ледяного покрова, возрастания роли горизонтальной адвекции и аккумуляции тепла в верхнем слое вод. Однако изменчивость потоков тепла модулируется комбинацией таких факторов, как атмосферная циркуляция и адвекция тепла в океане. Так как долгопериодные изменения в океане и атмосфере происходят не синхронно, пря-

мой связи между изменением потоков тепла и площадью морского льда не наблюдается. Вследствие уменьшения площади морского льда с 2007 г. наблюдается значительное увеличение потоков скрытого тепла, и, благодаря этому, суммарных потоков, тогда как потоки явного тепла уменьшаются. Частота холодных вторжений над Баренцевым морем, также влияющих на потоки тепла, определяется межгодовой изменчивостью повторяемости различных крупномасштабных мод циркуляции атмосферы и с площадью льда практически не связана.

Увеличение площади свободной ото льда поверхности должно приводить к усилению ветрового волнения. Однако, согласно выполненным расчетам, повторяемость количества штормов в Баренцевом море больше связана с повторяемостью циклонов и, соответственно, с изменчивостью крупномасштабных мод циркуляции атмосферы (индексы АІ или NAO). Поскольку генеральное направление распространения штормовых волн (более 6 м) в Баренцевом море – с запада на восток, увеличение длины разгона в меридиональном направлении не влияет на повторяемость штормов.

Фундаментальным выводом, полученным в рамках выполненного проекта, является заключение о возможности активизации обратных связей в системе «океан – лед – атмосфера» вследствие генераль-

ного отступления ледовой кромки в Баренцевом море в северо-восточном направлении. В атмосфере это ведет к возрастанию интенсивности энергообмена над свободной ото льда поверхностью, обеспечивающей усиление ветрового волнения и вертикального перемешивания, что в конечном итоге ведет к перестройке вертикальной структуры водных масс.

Вопрос об устойчивости выявленных трендов требует дополнительного изучения, поскольку в зависимости от преобладающего типа атмосферной циркуляции поступление теплых Атлантических вод в Баренцево море с соответствующим воздействием на морской лед и интенсификацией/блокированием обратных связей в системе может как возрастать, так и уменьшаться.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ-Арктика № 18-05-60083 и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипкин В.С., Добролюбов С.А. Океанология. Физические свойства морской воды: учеб. пособие. М.: МАКС Пресс, 2005. 216 с.
- Иванов В.В., Фролов И.Е., Фильчук К.В. Трансформация атлантической воды в северо-восточной части Баренцева моря в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66. № 3. С. 246–266. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266.
- Китайгородский С.А., Волков Ю.А. О параметре шероховатости морской поверхности и расчете турбулентных потоков количества движения в приводном слое атмосферы // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1965. № 1(9). С. 15–23.
- Мысленков С.А., Маркина М.Ю., Архипкин В.С., Тилинина Н.Д. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2019. № 2. С. 45–54.
- Фролов И.Е., Иванов В.В., Фильчук К.В., Макитас А.П., Кустов В.Ю., Махотина И.А., Иванов Б.В., Уразгильдеева А.В., Семин В.Л., Зимица О.Л., Крылов А.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Мальшев С.А., Гусев Е.А., Барышев П.Е., Пильгаев С.В., Ковалев С.М., Тюръяков А.Б. Трансарктика-2019: зимняя экспедиция в Северный Ледовитый океан на НЭС «Академик Трёшников» // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65. № 3. С. 255–274. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274.
- Applications of self-organizing maps, M. Johnsson (ed.), 2012, 289 p., DOI: 10.5772/3464.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Kobayashi P., Andrae S.U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy 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., Rosnay de 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, vol. 137, p. 553–597.
- Drennan W.M., Graber H.C., Hauser D., Quentin C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, vol. 108, no. C3, p. 8062, DOI: 10.1029/2000JC000715.
- Guarino M., Sime L.C., Schröder D., Malmierca-Vallet I., Rosenblum E., Ringer M., Jeff Ridley J., Feltham D., Bitz C., Stei E.J., Wolff E., Stroeve J., Sellar A. Sea-ice-free Arctic during the Last Interglacial supports fast future loss, *Nat. Clim. Change*, 2020, vol. 10, p. 928–932, DOI: 10.1038/s41558-020-0865-2.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean Heat Impact on Regional Ice Decay: A Suggested Positive Feedback, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2016, vol. 46, p. 1437–1456, DOI: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.M., Golovin P.N. Cascades of dense water around the World Ocean, *Progress in Oceanography*, 2004, vol. 60, p. 47–98.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change (IPCC AR-5) 2013: The Physical Science Basis / Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker et al., 2013, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Seierstad I.A. Marine cold-air outbreaks in the North Atlantic: temporal distribution and associations with large-scale atmospheric circulation, *Clim. Dyn.*, 2009, vol. 33, p. 187–197, DOI: 10.1007/s00382-008-0431-5.
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, no 7, p. 634–639.

- Myslenkov S., Shestakova A., Chechin D.* The impact of sea waves on turbulent heat fluxes in the Barents Sea according to numerical modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, vol. 21, p. 5575–5595, DOI: 10.5194/acp-21-5575-2021.
- Oost W.A., Komen G.J., Jacobs C.M.J., Oort van C.* New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE, *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, no. 103(3), p. 409–438.
- 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., Kwok K. 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, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Quadfasel D., Rudels B., Selchow S.* The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation, *ICES Marine Science Symposium*, 1992, vol. 195, p. 40–51.
- Schlichtholz P.* Subsurface Ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 13692.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.M.* Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling, *Atmosphere*, 2020, no. 11(7), p. 726.
- Taylor P.K., Yelland M.J.* The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2001, vol. 31, no. 2, p. 572–590.
- Электронные ресурсы*
- Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 203 p., URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf.
- Climate Data. Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr> (дата обращения 22.11.2019).
- Climate Prediction Center. National Weather Service. NOAA, URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/teleindcalc.shtml> (дата обращения 22.11.2019).
- COARE-Met Flux Algorithm, URL: https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/ (дата обращения 22.11.2019).
- ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды), реанализ ERA-Interim, URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (дата обращения 22.11.2019).
- Mercator Ocean International, URL: <https://www.mercator-ocean.fr/en/solutions-expertise/product-catalog/> (дата обращения 22.11.2019).
- World Ocean Database. NOAA, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (дата обращения 22.11.2019).

Поступила в редакцию 05.03.2021

После доработки 06.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

CHANGES IN HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE BARENTS SEA AS AN INDICATOR OF CLIMATIC TRENDS IN THE EURASIAN ARCTIC IN THE 21ST CENTURY

V.V. Ivanov¹, V.S. Arkhipkin², Ye.M. Lemeshko³, S.A. Myslenkov⁴, A.V. Smirnov⁵, G.V. Surkova⁶, F.K. Tuzov⁷, D.G. Chechin⁸, A.A. Shestakova⁹

^{1,2,4,6,7} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

^{1,5} Arctic and Antarctic Research Institute, Ocean-Air Interaction Department

³ Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute", Laboratory of Hydrophysical Subsatellite Research

⁴ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Laboratory of Experimental Ocean Physics; Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Department of Marine Hydrological Forecasts; oceanologist

⁷ All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies EMERCOM of Russia (Federal Center for Science and High Technologies), Seventy-Second Research Department

^{8,9} Federal State Budgetary Institution of Science "A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics" RAS, Laboratory of the Air-Ocean Interaction

¹ Oceanology Department, Leading Scientific Researcher; Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru

² Oceanology Department, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

⁴ Oceanology Department, Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Physics and Mathematics, e-mail: stasoocean@gmail.com

⁵ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alexander.vic.smirnov@gmail.com

⁶ Meteorology and Climatology Department, Associate Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: galina_surkova@mail.ru

⁷ Junior Scientific Researcher; Scientific Researcher; e-mail: fedor-tuz@mail.ru

⁸ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: chechin@ifaran.ru

⁹ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: shestakova.aa.92@gmail.com

It has now been reliably established that climate in the Arctic is changing much faster than the global average, due to the so-called “Arctic amplification” effect. The paper summarizes the results of the comprehensive analysis of the current state of hydrometeorological conditions in the Barents Sea. This made it possible to assess the general directions of the ongoing changes, which in the future may spread to the eastward marginal seas of the Arctic Ocean. Hydrometeorological conditions in the Barents Sea under significant reduction of the sea ice cover have been investigated on the basis of observational data, atmospheric and ocean reanalyses and satellite information. The fundamental conclusion obtained as a result of the analysis is possible activation of feedbacks in the “ocean-ice-atmosphere” system due to the general northeastward retreat of the ice edge in the Barents Sea. The reduction of ice cover primarily affects the nature of energy exchange between the ocean and the atmosphere. As a result, the regime of water masses formation changes towards a decreasing role of ice cover and increasing role of horizontal advection and heat accumulation in the upper water layer. However, the variability of heat fluxes is modulated by a combination of factors such as atmospheric circulation and heat advection in the ocean. Since long-term changes in the ocean and atmosphere are asynchronous, there is no direct relationship between changes in heat fluxes and the sea ice area. A significant increase in latent heat fluxes, and, consequently, total fluxes because of the sea ice area decrease since 2007 has been recorded while the sensible heat fluxes, on the contrary, have decreased. It is shown that the frequency of cold outbreaks over the Barents Sea, which also affect heat fluxes, is mainly determined by the interannual variability of the frequency of various large-scale atmospheric circulation modes and is not directly related to the ice area.

Keywords: Arctic Ocean, hydrometeorological conditions, climate change, ocean-atmosphere interaction, sea currents, waves, water masses, sea level

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation of Basic Research (RF-BR-Arctic project no. 18-05-60083) and the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental changes”.

REFERENCES

- Applications of self-organizing maps*, M. Johnsson (ed.), 2012, 289 p., DOI: 10.5772/3464.
- Arkhipkin V.S., Dobrolyubov S.A. *Okeanologiya. Fizicheskiye svoystva morskoy vody: Ucheb. Posobiye* [Physical properties of sea water: Textbook], Moscow, MAKS Press, 2005, 216 p. (In Russian)
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Kobayashi P., Andrae S.U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy 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., Rosnay de 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, vol. 137, p. 553–597.
- Drennan W.M., Graber H.C., Hauser D., Quentin C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas, *J. of Geophysical Research: Oceans*, 2003, vol. 108, no. C3, p. 8062, DOI: 10.1029/2000JC000715.
- Frolov I.E., Ivanov V.V., Filchuk K.V., Makshtas A.P., Kostov V.Yu., Mahotina I.A., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V., Syoemin V.L., Zimina O.L., Krylov A.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Malyshev S.A., Gusev E.A., Baryshev P.E., Pilgaev S.V., Kovalev S.M., Turyakov A.B. Transarktika-2019: winter expedition in the Arctic Ocean on the R/V “Akademik Tryoshnikov”, *Arctic and Antarctic Research*, 2019, vol. 65, no. 3, p. 255–274, DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-255-274.
- Guarino M., Sime L.C., Schröder D., Malmierca-Vallet I., Rosenblum E., Ringer M., Jeff Ridley J., Feltham D., Bitz C., Stei E.J., Wolff E., Stroeve J., Sellar A. Sea-ice-free Arctic during the Last Interglacial supports fast future loss, *Nat. Clim. Change*, 2020, vol. 10, p. 928–932, DOI: 10.1038/s41558-020-0865-2.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change (IPCC AR-5) 2013: The Physical Science Basis / Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T. F. Stocker et al., 2013. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean Heat Impact on Regional Ice Decay: A Suggested Positive Feedback, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2016, vol. 46, p. 1437–1456, DOI: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
- Ivanov V.V., Frolov I.E., Filchuk K.V. Transformation of Atlantic water in the north-eastern Barents Sea in winter, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2020, vol. 66, no. 3, p. 246–266, DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-246-266.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.M., Golovin P.N. Cascades of dense water around the World Ocean, *Progress in Oceanography*, 2004, vol. 60, p. 47–98.
- Kitaygorodskiy S.A., Volkov Yu.A. O parametre sherokhovatosti morskoy poverkhnosti i raschete turbulentnykh potokov kolichestva dvizheniya v privodnom sloye atmosfery [About the parameter of roughness of the sea surface and the calculation of turbulent fluxes of momentum in

- the drive layer of the atmosphere], *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1965, no. 1(9), p. 15–23. (In Russian)
- Kolstad E.W., Bracegirdle T.J., Seierstad I.A. Marine cold-air outbreaks in the North Atlantic: temporal distribution and associations with large-scale atmospheric circulation, *Clim. Dyn.*, 2009, vol. 33, p. 187–197, DOI: 10.1007/s00382-008-0431-5.
- Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import, *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 634–639.
- Myslenkov S., Shestakova A., Chechin D. The impact of sea waves on turbulent heat fluxes in the Barents Sea according to numerical modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, vol. 21, p. 5575–5595, DOI: 10.5194/acp-21-5575-2021.
- Myslenkov S.A., Markina M.Yu., Arkhipkin V.S., Tilina N.D. Povtoryayemost' shtormovogo volneniya v Barentsevom more v usloviyakh sovremennogo klimata [Frequency of storms in the Barents Sea under modern climate conditions], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 2, p. 45–54. (In Russian)
- Oost W.A., Komen G.J., Jacobs C.M.J., Oort van C. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE, *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, no. 103(3), p. 409–438.
- 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., Kwok K. 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, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Quadfasel D., Rudels B., Selchow S. The Central Bank vortex in the Barents Sea: water mass transformation and circulation, *ICES Marine Science Symposium*, 1992, vol. 195, p. 40–51.
- Schlichtholz P. Subsurface Ocean flywheel of coupled climate variability in the Barents Sea hotspot of global warming, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, p. 13692.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.M. Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling, *Atmosphere*, 2020, no. 11(7), p. 726.
- Taylor P.K., Yelland M.J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves, *J. of Phys. Oceanogr.*, 2001, vol. 31, no. 2, p. 572–590.

Web sources

- Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 203 p., URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf.
- Climate Data. Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr> (access date 22.11.2019).
- Climate Prediction Center. National Weather Service. NOAA, URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/teleindcalc.shtml> (access date 22.11.2019).
- COARE-Met Flux Algorithm, URL: https://www.coaps.fsu.edu/COARE/flux_algor/ (access date 22.11.2019).
- ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды), реанализ ERA-Interim, URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (access date 22.11.2019).
- Mercator Ocean International, URL: <https://www.mercator-ocean.fr/en/solutions-expertise/product-catalog/> (access date 22.11.2019).
- World Ocean Database. NOAA, URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (access date 22.11.2019).

Received 05.03.2021

Revised 06.06.2021

Accepted 20.07.2021

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕРМОАБРАЗИИ БЕРЕГОВ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

С.А. Огородов¹, Н.Н. Шабанова², А.С. Кессель³, А.В. Баранская⁴, С.О. Разумов⁵

^{1,2,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера*

³ *Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, отдел прикладных морских и водохозяйственных исследований и изысканий*

⁴ *Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, лаборатория палеоархивов природной среды, мл. науч. сотр.*

⁵ *Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, лаборатория общей геоэкологии*

¹ *Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук, проф. РАН; e-mail: ogorodov@aha.ru*

² *Науч. сотр.; e-mail: nat.volobuyeva@gmail.com*

³ *Аспирант; e-mail: naskes19@gmail.com*

⁴ *Вед. науч. сотр.; e-mail: alisa.baranskaya@yandex.ru*

⁵ *Гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: razum55@mail.ru*

В статье приведены результаты анализа волноэнергетической и термической составляющих гидрометеорологического (ГМ) потенциала термоабразии берегов для девяти ключевых участков в западном и восточном секторах Российской Арктики за период с 1979 по 2017 г. Для расчетов теплового воздействия на берега, сложенные многолетнемерзлыми породами, использованы индексы таяния и замерзания, представляющие собой накопленную сумму среднесуточных температур теплового и холодного периодов соответственно. Волноэнергетическая составляющая рассчитана по методу Попова–Совершаева. В расчетах использованы данные гидрометеорологических станций (ГМС) и данные реанализов CFSR, CFSv2, MERRA, ERA5. Продолжительность ледового периода определена по спутниковым данным.

Установлено, что индекс таяния повсеместно растет устойчиво и значимо, суммарный ГМ потенциал термоабразии берегов, сложенных мерзлыми дисперсными породами, значимо возрастает в последние годы во всех районах Российской Арктики. На протяжении всего побережья от о. Колгуева до Чукотки наблюдается его увеличение как за счет термического, так и за счет волноэнергетического факторов. За период с 1979 по 2017 г. приращение ГМ потенциала термоабразии берегов составило в среднем 30–95% от среднемноголетнего значения, что в 1,2–3 раза превышает стандартную изменчивость. Наиболее значимые изменения отмечаются на о. Айон, характеризующемся самым суровым климатом, наименее значимые – в Лорино, на м. Чукочьем и в губе Буор-Хая. Увеличение ГМ потенциала термоабразии берегов происходит и за счет роста температур, и за счет увеличения потока энергии ветровых волн. Продолжительность безледного периода коррелирует и с температурами теплого сезона, и с энергией ветровых волн, и – наиболее сильно – с суммарным ГМ воздействием. Таким образом, продолжительность безледного периода выступает ведущим фактором в динамике арктических берегов, определяя температурные и волновые условия. Основную роль в динамике волноэнергетического фактора играет изменение повторяемости штормов волноопасных румбов.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, термоабразия, термоденудация, индекс таяния, энергия волн, гидрометеорологический потенциал термоабразии, динамика берегов, Российская Арктика, изменение климата Арктики

ВВЕДЕНИЕ

Арктические берега представляют собой сложную активно изменяющуюся и развивающуюся природную систему. Российскую Арктику условно можно разделить на две части: западный сектор и восточный секторы. К западному сектору относят Баренцево море, включая Печорское море, и Карское море; к восточному сектору относят моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское. Берега западного сектора сложены как скальными породами, встречающимися на Кольском полуострове, Земле

Франца-Иосифа и Новой Земле, так и неоген-четвертичными дисперсными породами, как, например, на о. Колгуев, полуостровах Ямал и Гыдан. Присутствуют и совсем молодые голоценовые и современные прибрежно-морские отложения, к примеру, на о. Варандей, где распространены голоценовые песчаные бары. В дисперсных отложениях встречаются пластовые залежи мономинерального льда и жильные льды [Великоцкий, 1998; Кизяков и др., 2013; Огородов, 2011; Алексютина и др., 2019; Ogorodov et al., 2020].

Берега восточного сектора сложены преимущественно позднеплейстоценовым ледовым комплексом и вложенными в него голоценовыми озерно-термокарстовыми отложениями, местами покрыты голоценовыми аллювиальными суглинками и супесями с эпигенетическими повторно-жильными льдами [Попов, 1983; Фаргышев, 1993]. Рельеф полигональный, с невысокими останцами, поверхность покрыта термокарстовыми озерами и заболочена.

Большая часть берегов российских северных морей активно отступает под действием термоабразии и термоденудации, т. к. сложена дисперсными мерзлыми породами. Термоденудация – это процесс оттаивания мерзлых грунтов в результате передачи тепла из атмосферы и последующего гравитационного сноса продуктов оттаивания к подножью берегового уступа [Воскресенский, Совершаев, 1998, Васильев и др., 2006]. Подготовленный таким образом материал впоследствии удаляется с берега путем термоабразии. Под термоабразией понимают процесс разрушения берега и подводного берегового склона, сложенных многолетнемерзлыми (дисперсными) породами или льдом, под совместным механическим и тепловым воздействием моря [Арэ, 1980]. Таким образом, оба механизма разрушения берегов – термоабразия и термоденудация – действуют одновременно и представляют собой единый геоморфологический процесс. Подверженные ему берега называют термоабразионными. Среднемноголетние скорости разрушения термоабразионных берегов составляют от 0,5 до 2 м/год [Lantuit et al., 2013]. При этом на участках морского побережья, где присутствуют залежеобразующие льды, разрушение берегового уступа (отступление бровки) может принимать катастрофические темпы, достигая 5–10 м/год и более [Григорьев, 2008; Маслаков, 2019].

Динамику берегов в области распространения многолетнемерзлых пород в общем виде определяет сочетание и взаимодействие двух главных гидрометеорологических факторов: термического и волноэнергетического.

Термическое воздействие проявляется при положительных температурах воды и воздуха, контактирующих с мерзлыми породами, слагающими берег [Jones et al., 2009]. Соответственно, чем выше температура воздуха и воды и продолжительнее периоды с положительными температурами воздуха и контакта с морской водой, температура которой выше нуля, тем заметнее влияние термического фактора на динамику берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами.

Воздействие волноэнергетического фактора проявляется в прямом механическом воздействии морских волн на берега. Эффект его влияния можно определить как мощностью, так и продолжительностью штормового волнения. Количество волновой энергии, в свою

очередь, зависит от скорости ветра, продолжительности его действия и от длины разгона волны. Длина разгона лимитируется орографией, границей распространения ледяного покрова и продолжительностью безледного периода. Продолжительность безледного периода и площадь морского льда в Арктике, в свою очередь, также зависят от растущей средней температуры воздуха. Кроме того, уменьшение площади морского льда вызывает увеличение высоты волн [Stora et al., 2016]. Выделяется четкая пространственная (региональная) и временная (межгодовая) изменчивости волновой активности и скорости ветра [Суркова и др., 2015]. Так, в восточной части Российской Арктики отмечается более устойчивый и сильный рост высот волн в сравнении с западной частью [Liu et al., 2016; Atkinson, 2005; Atkinson, Solomon, 2003]. Прогнозируется увеличение высоты волн от 2,3 до 3,1 м от моря Лаптевых до моря Бофорта в октябре [Waseda et al., 2018]; а также в Карском и Баренцевом морях [Duan et al., 2018; Myslenkov et al., 2021].

В условиях современных климатических изменений в Арктике [Overland et al., 2019], которые хорошо согласуются с глобальными изменениями [IPCC, 2014; Savo et al., 2016] и растущими климатическими трендами для Северного полушария [Serreze et al., 2009], перечисленные процессы приводят к тому, что скорости термоденудации и механической абразии растут независимо друг от друга, а воздействие термического и волноэнергетического факторов на динамику термоабразионных берегов приобретает все большее значение [Baranskaya et al., 2020; Baranskaya et al., 2021]. Так, более высокие температуры воздуха и воды, а также возможное увеличение количества осадков приводят к более интенсивному оттаиванию мерзлых грунтов. В то же время увеличение повторяемости штормовых ветров, безледного периода и повышение уровня моря приводят к росту волнового воздействия на берег. Реализация термического и волноэнергетического потенциалов взаимозависима: если берег термически подготовлен (оттаял в конце сезона или после теплой погоды), то волноэнергетический потенциал реализуется в большей степени, чем в начале сезона, когда берег мерзлый. В свою очередь, повышение тепла в наибольшей степени способствует протаиванию, когда талый материал эффективно удаляется со склонов, обнажая мерзлый уступ, который подвергается дальнейшему термическому воздействию. Если оттаявший материал не удаляется, он как изолятор может затруднять прогрев и оттаивание грунта. В таких условиях даже при сохранении положительных температур (нарастании термического потенциала) дальнейшая термоденудация не происходит или происходит более низкими темпами. Эти процессы требуют описания и моделирования в масштабах нескольких часов и суток.

Для выявления многолетней пространственно-временной изменчивости ГМ факторов динамики берегов необходимо получение как можно более длинных рядов данных на многих участках и сравнение как абсолютных величин, так и динамики гидрометеорологических параметров, соответствующих термическому и волноэнергетическому факторам. Цель настоящей работы – выявление многолетних изменений термической и волноэнергетической составляющих ГМ потенциала динамики термоабразионных берегов на ключевых участках в западной и восточной частях Российской Арктики. Для ее выполнения были собраны и рассчитаны ряды данных, доступные по результатам наблюдений на гидрометеорологических станциях (ГМС), и данные реанализов, на основании которых проведен анализ динамики ГМ факторов термоабразии и термоденудации. Под западно-арктическими морями в настоящей работе понимаются Баренцево и Карское моря, под восточно-арктическими – моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика расчета термической составляющей гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов. Для расчета термического потенциала термоабразии берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, использованы данные наблюдений о среднесуточной температуре воздуха с ГМС, ближайших к ключевым участкам (рис. 1). Для расчетов теплового воздействия на берега, сложенные многолетнемерзлыми породами, использованы данные наблюдений на ГМС, ближайших к ключевым участкам. Для расчета термического потенциала требуются данные о среднесуточной температуре воздуха. Их архивы высокого качества относительно доступны для многих арктических станций, поэтому им было отдано предпочтение перед данными реанализов [Shabanova et al., 2018]. Для оценки влияния термической составляющей были рассчитаны индексы таяния и замерзания (air thawing и air freezing index) [Andersland, Ladanyi, 2004], представляющие собой накопленную сумму среднесуточных температур теплового и холодного периодов соответственно.

Накопленные величины отражают сумму энергии, переданную берегу из окружающей среды (или отнятой у него в случае отрицательных температур), поэтому они лучше подходят для анализа теплового воздействия на арктические берега. В настоящей работе рассчитывался индекс таяния [Andersland, Ladanyi, 2004], в наибольшей степени отражающий тепловое воздействие, приводящее к оттаиванию мерзлых уступов, рассчитанный как сумма положительных среднесуточных температур:

$$I_t = \sum_{i=1}^N t_i, \quad t > 0, \quad (1)$$

где t_i – среднесуточная температура; N – число дней с положительной температурой за год ($t > 0^\circ\text{C}$).

Методика расчета продолжительности безледного периода. Продолжительность безледного периода была рассчитана по данным дистанционного зондирования. Были использованы данные в формате netcdf, описывающие концентрацию морского льда OSI-450 [OSI SAF..., 2017] за период с 1979 по 2015 г. и OSI-430-b за период с 2016 по 2018 г. [OSI SAF..., 2019]. Карты составлены Датским метеорологическим институтом и имеют разрешение 25 км.

Даты начала и окончания периода безо льда для ячеек данных OSI SAF, ближайших к ключевым участкам, определялись с использованием метода скользящего окна (rolling-window approach (RWA)). Метод основан на анализе годового изменения сплоченности морского льда и обнаруживает ее устойчивые скачки, которые обычно связаны с очищением акватории (последняя дата скачка вниз) или ледоставом (первая дата восходящего скачка) [Shabanov, Shabanova, 2019]. Этот метод был введен, чтобы избежать недостатков обычного 15%-го метода, который иногда неприменим в прибрежных зонах из-за недостоверности оценки сплоченности морского льда с суши, что приводит к высоким (20–40%) значениям сплоченности в сезон открытой воды.

Методика расчета волноэнергетической составляющей гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов. Для получения рядов скорости и направления ветра использовались данные реанализов: 1) CFSR – Climate Forecast System Reanalysis [Saha et al., 2010] Национального центра прогноза окружающей среды (NCEP – National Center of Environmental Prediction), США, и 2-я версия этого же продукта – CFSv2 [Saha et al., 2014; CFSR..., 2019]; 2) MERRA-2 – реанализ современной эпохи для научных исследований и практических применений, 2-я версия, США (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version [Gelaro et al., 2017]); 3) реанализ 5-го поколения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП – European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF, Великобритания) ERA-20C [Poli et al., 2016] и 2-я версия этого же продукта – ERA5 [Dee et al., 2011; Hersbach et al., 2020; C3S..., 2017].

В отличие от термического потенциала термоабразии берегов, для расчетов которого использовались данные наблюдений на ГМС, для вычисления волноэнергетического потенциала требуются дан-

ные о скорости и направлении ветра высокого временного разрешения (3 ч). Такие архивы доступны для меньшего числа станций и часто имеют пропуски и несоответствия (иногда до 50% безледного периода имеют пропуски или переход на более редкие измерения). Поэтому для расчетов волноэнергетической составляющей был использован ансамбль реанализов, в наибольшей степени детально характеризующий ветроэнергетический режим каждого из ключевых участков. Данные по ветру осреднялись из трех источников, полученные значения служили основой для расчетов ветроволновой энергии. Ранее [Shabanov, Shabanova, 2019] была проведена работа по сопоставлению реанализов из разных источников между собой и с данными станционных наблюдений для разных районов Российской Арктики. Было показано, что нельзя отдать предпочтение какому-то одному из реанализов в точности воспроизведения скоростей ветра и рассчитанных значений волноэнергетического потенциала, т. к. для различных локаций оценки СКО оказываются минимальны то для одного, то для другого реанализа. Осреднение по нескольким источникам данных позволяет избавиться от случайных ошибок каждого из источников.

Полученные с помощью такого осреднения ряды имеют наименьшие отклонения от рядов, полученных с помощью данных наблюдений [Shabanov, Shabanova, 2019], поэтому данные о скоростях и направлении ветра осреднялись по перечисленным реанализам.

Для оценки волноэнергетического фактора использован метод Попова–Совершаева [Попов, Совершаев, 1981, 1982]. Поток энергии ветровых волн по формуле Попова–Совершаева равен произведению третьей степени скорости ветра волноопасного направления, разгона волны вдоль этого направления и продолжительности безледного периода с учетом повторяемости ветра данной скорости и направления внутри безледного периода. Полученные величины накапливаются по всем штормовым скоростям ветра (начиная с 6 м/с) и волноопасным направлениям. С помощью этого метода рассчитывалась волноэнергетическая составляющая потенциала разрушения берегов (в условных энергетических единицах, у. э. е.), которая в каждый конкретный год зависит от: а) продолжительности безледного периода; б) скорости и повторяемости ветра волноопасных направлений; в) длины разгона волн; г) глубины воды.

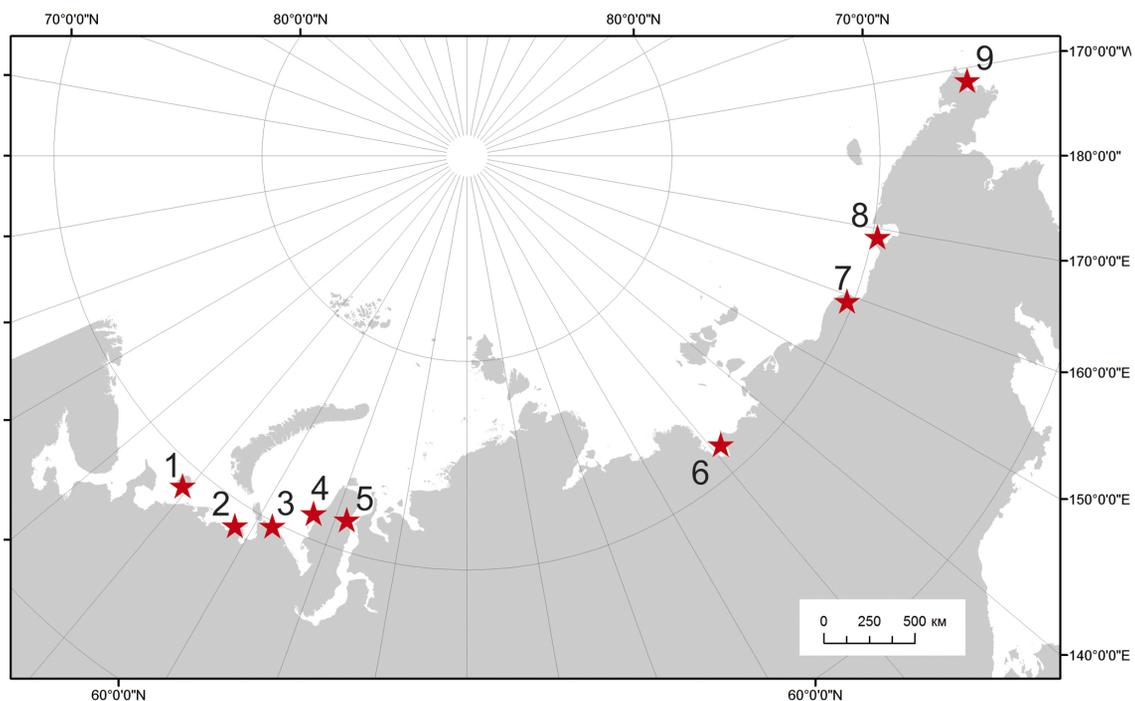


Рис. 1. Ключевые участки исследований:

1 – о. Колгуев (Печорское море); 2 – п. Варандей (Печорское море); 3 – п. Амдерма (Карское море); 4 – п. Харасавэй (Карское море; западный Ямал); 5 – п. Сабетта (Обская губа); 6 – губа Буор-Хая (море Лаптевых); 7 – мыс Чукочий (Восточно-Сибирское море); 8 – о. Айон (Восточно-Сибирское море); 9 – с. Лорино (Берингово море)

Fig. 1. Key areas:

1 – Kolguev island (Pechora Sea); 2 – Varandey settlement (Pechora Sea); 3 – Amderma settlement (Kara Sea); 4 – Kharasavey settlement (Kara Sea; western Yamal); 5 – Sabetta settlement (Ob Bay); 6 – Buor-Khaya Bay (Laptev Sea); 7 – Cape Chukochiy (East Siberian Sea); 8 – Ayon island (East Siberian Sea); 9 – Lorino settlement (Bering Sea)

Для условий глубокой воды, т. е. когда дно не влияет на развитие волн, расчет секундного потока волновой энергии (на 1 м длины фронта волны за пределами береговой зоны) производился по уравнению:

$$\mathcal{E}_{0\text{гд}} = 3 \cdot 10^{-6} V_{10}^3 x, \quad (2)$$

где V_{10} – анемометрическая (истинная) скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря, м/с; x – соответствующий фактический или предельный разгон, км.

Для мелководного моря аналогичное уравнение имеет вид

$$\mathcal{E}_{0\text{мелк}} = 2 \cdot 10^{-6} \left(\frac{gH}{V_{10}^2} \right)^{1,4} V_{10}^5, \quad (3)$$

где числовой коэффициент – размерный, а \mathcal{E}_0 имеет размерность тм/мс или т/с как это принято в динамике береговой зоны. Уравнение (3) справедливо при выполнении двух условий. Для мелководных бассейнов, к которым может быть отнесено большинство арктических морей, энергия волн определялась с учетом безразмерного соотношения gH/V_{10}^2 между глубиной H по направлению разгона ветра и его скоростью V_{10} (g – ускорение силы тяжести), названного нами кинематическим показателем мелководности. При значении этого показателя меньше 3, глубина водоема ограничивает развитие ветровых волн.

Второе условие определяется следующими соображениями: взаимодействие волн с дном начинается при определенной, достаточно большой их величине; чтобы достичь ее, волны должны пробежать некоторый идеальный путь, не ощущая воздействия дна, т. е. развиваясь в условиях глубокого водоема, для которого справедливо уравнение (1). Следовательно, на границе между глубоководной и мелководной зонами должны одновременно выполняться уравнения (1) и (2). Исходя из этого устанавливалось соотношение между минимальным разгоном, обеспечивающим начало взаимодействия волн и дна, и глубиной на разгоне:

$$\frac{x_{\min}}{H} \geq 6,5 \left(\frac{gH}{V_{10}^2} \right)^{0,4}, \quad (4)$$

где x_{\min} выражено в километрах, а H – в метрах.

При $gH/V_{10}^2 = 3$ соотношение (4) дает

$$\frac{gx_{\min}}{V_{10}^2} \geq 30. \quad (5)$$

Из (4) получаем величину предельного разгона для глубоководного моря, совпадающую с установленной другими методами:

$$x_{\text{пред}} = 3V_{10}^2. \quad (6)$$

Для перехода от секундного потока энергии, генерируемого ветром данной скорости и румба, к волновой энергии ветра определенной градации полученная величина \mathcal{E}_0 умножалась на продолжительность действия этого ветра (например, за безледный период). Затем величины волновой энергии каждой градации скорости ветра суммировались в пределах заданного волноопасного румба и в результате получались румбовые величины суммарной энергии волнений за расчетный период – \mathcal{E}_α .

Разработанный программный комплекс оценки энергии волн использует цифровую модель рельефа GEBCO [GEBCO..., 2020]. Пример определения секторов волноопасных румбов показан на рис. 2.

Методика расчета гидрометеорологического потенциала. Для оценки совместного действия термического и волноэнергетического факторов рассчитывался общий ГМ потенциал термоабразии.

Для этого была использована методика, подробно описанной в работе [Shabanova et al., 2018], с модификациями для сравнения различных ключевых участков западного и восточного секторов Российской Арктики. В используемой в данной работе методике величины нормировались на некоторое условно предельное (максимальное) значение, чтобы избавиться от размерности и привести их к единой шкале (для возможности впоследствии их суммировать). На основе анализа полученных данных ряды индекса таяния (термический фактор) нормированы на 1500 градусодней, а ряды энергии ветровых волн – на 2 500 000 единиц. Полученные безразмерные ряды суммировались для каждого участка берега. В среднем для всех рассмотренных локаций доли термического и волноэнергетического факторов оказались приближенными к 50%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетняя изменчивость термической составляющей гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов. Суммы положительных среднесуточных температур (индекс таяния) повсеместно растут устойчиво и значимо. Средняя скорость приращения этого параметра составляет 7,6 градусодня в год (табл.). Значения трендов колеблются от 6,2 градусодня в год в Тикси до 9,84 градусодня в год на о. Колгуев. Если говорить об абсолютных значениях, то в среднем потепление в восточной части Российской Арктики происходит на 1–2 градусодня в год медленнее, чем в западной (рис. 3). Исключение – поселок Лорино, который расположен на юго-восточном побережье Чукотки. Здесь отмечаются существенно более низкие скорости потепления: 2,74 градусодня в год (см. табл., рис. 3). Такой

тренд значим на уровне 0,05. Остальные тренды значимы на уровне 0,01.

Показанные скорости потепления обеспечили повышение индекса таяния в среднем на 300 градусодней: от 107 в Лорино до 385 на Колгуеве и Варандее. Приращение составляет 35–70% от среднемноголетнего значения (за исключением Лорино – 11%) или

1,5–2 стандартных отклонения ряда (1,2 для Лорино). Вместе с низкими *p*-значениями, использованными для оценки значимости тренда, 1,5–2-кратное превышение стандартного отклонения ряда позволяет уверенно говорить о направленном (не случайном) повышении годовой суммы положительных среднесуточных температур (индекса таяния).

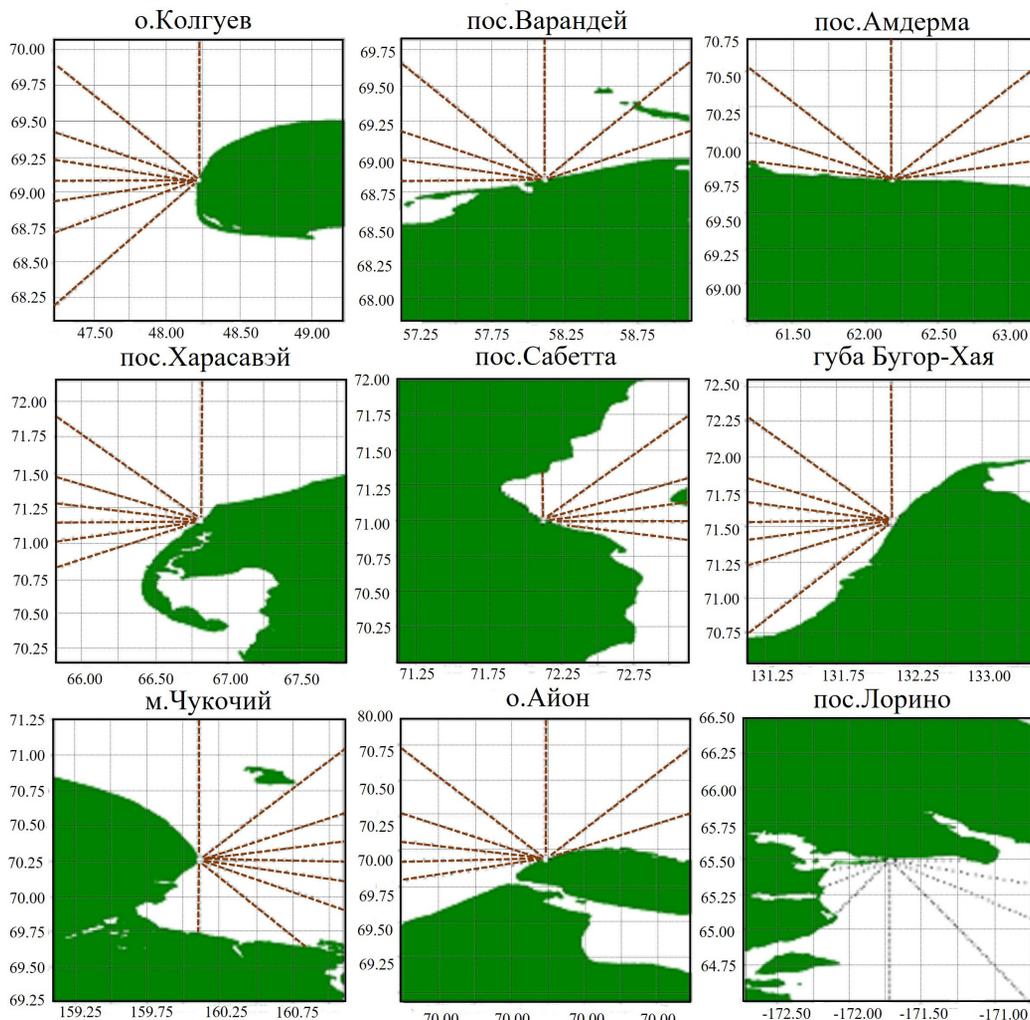


Рис. 2. Определение секторов волноопасных румбов на основании ЦМР GEBCO

Fig. 2. Determining of the sectors of wave-hazardous wind directions using the GEBCO DEM

Динамика многолетних значений, осредненных по пяти западным и четырем восточным участкам (см. рис. 3), показывает, что термическая составляющая динамики берегов в отдельные годы может иметь разнонаправленные тенденции в разных морях, несмотря на то, что в целом ее колебания похожи на западе и на востоке. В среднем в Баренцевом и Карском морях тренд роста температур больше, чем в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Беринговом, однако везде он существенен с 1970-х гг. Вероятно, несмотря на менее интенсивное потепление в восточной части

Российской Арктики по сравнению с западной, термический фактор играет наиболее важную роль в динамике берегов именно восточно-арктических морей за счет значительной льдистости многолетнемерзлых отложений побережий, в особенности пород ледового комплекса. С учетом криолито-логического фактора, влияние потепления в восточной части Российской Арктики существенно повлияло на разрушение берегов; суммы положительных среднесуточных температур выросли от средних значений 400–800 градусодней в 1980-е гг. до 700–1000 градусодней в 2000-е гг.

Таблица

Характеристики многолетних рядов «индекса таяния» за 1979–2017 гг.

Характеристики	о. Колгуев	п. Варандей	п. Амдерма	п. Харасавэй	п. Сабетга	с. Амбарчик (мыс Чукочий)	о. Айон	с. Лорино	Среднее
<i>Годовые суммы положительных среднесуточных температур («индекс таяния»)</i>									
Среднее, °С-дни	844	959	709	584	518	650	479	950	689
СКО, °С-дни	189	227	213	198	160	171	176	86	136
СКО/среднее	0,22	0,24	0,30	0,34	0,31	0,26	0,37	0,09	0,20
Значение тренда, °С-дни/год	9,84	9,81	9,61	8,94	7,73	6,39	8,57	2,74	7,64
Приращение за 39 лет, °С-дней	384	383	375	349	302	249	334	107	298
Приращение за 39 лет, доля от среднемноголетнего	0,45	0,40	0,53	0,60	0,58	0,38	0,70	0,11	0,43
Приращение за 39 лет, доля от СКО	2,0	1,7	1,8	1,8	1,9	1,5	1,9	1,2	2,2
<i>Безледный период</i>									
Среднее, дни	229	138	129	120	78	76	74	136	117
СКО, дни	45	21	33	25	20	15	28	29	19
Коэффициент тренда, дни/год	3,0	1,1	1,9	1,3	1,1	0,7	1,4	0,5	1,3
Приращение за 39 лет, дни	115	44	73	51	43	27	56	19	51
Приращение в долях от среднего	0,50	0,32	0,56	0,43	0,56	0,35	0,75	0,14	0,44
Приращение в долях от СКО	2,6	2,1	2,2	2,1	2,1	1,8	2,0	0,6	2,6
<i>Характеристики многолетних рядов энергии ветровых волн (WE)</i>									
Среднее, у. э. е.	3337	1604	729	974	155	729	501	438	1002
СКО, у. э. е.	1007	715	359	601	94	372	358	289	458
СКО/среднее	0,30	0,45	0,49	0,62	0,61	0,51	0,71	0,66	0,55
Значение тренда, у. э. е./год	32,9	24,4	19,2	18,7	3,8	3,2	17,3	11,4	15,1
Приращение за 39 лет, у. э. е.	1281	951	749	731	149	125	675	443	589
Приращение за 39 лет, % от среднего	0,38	0,59	1,03	0,75	0,96	0,17	1,35	1,01	0,73
Приращение за 39 лет, доля от СКО	1,27	1,33	2,08	1,22	1,58	0,34	1,88	1,54	1,32
<i>Суммарный гидрометеорологический потенциал разрушения берегов (TE)</i>									
Среднее	1,90	1,28	0,73	0,78	0,46	0,72	0,52	0,81	0,80
СКО	0,32	0,34	0,19	0,30	0,12	0,17	0,21	0,15	0,16
СКО/среднее	0,27	0,26	0,26	0,39	0,25	0,24	0,41	0,18	0,28
Приращение за 39 лет	0,77	0,64	0,55	0,52	0,24	0,22	0,49	0,25	0,44
Приращение за 39 лет, % от среднего	0,40	0,50	0,75	0,67	0,53	0,30	0,95	0,31	0,56
Приращение за 39 лет, доля от СКО	1,7	1,9	2,9	1,7	2,1	1,2	2,3	1,7	1,9

Примечание: СКО – среднеквадратическое отклонение.

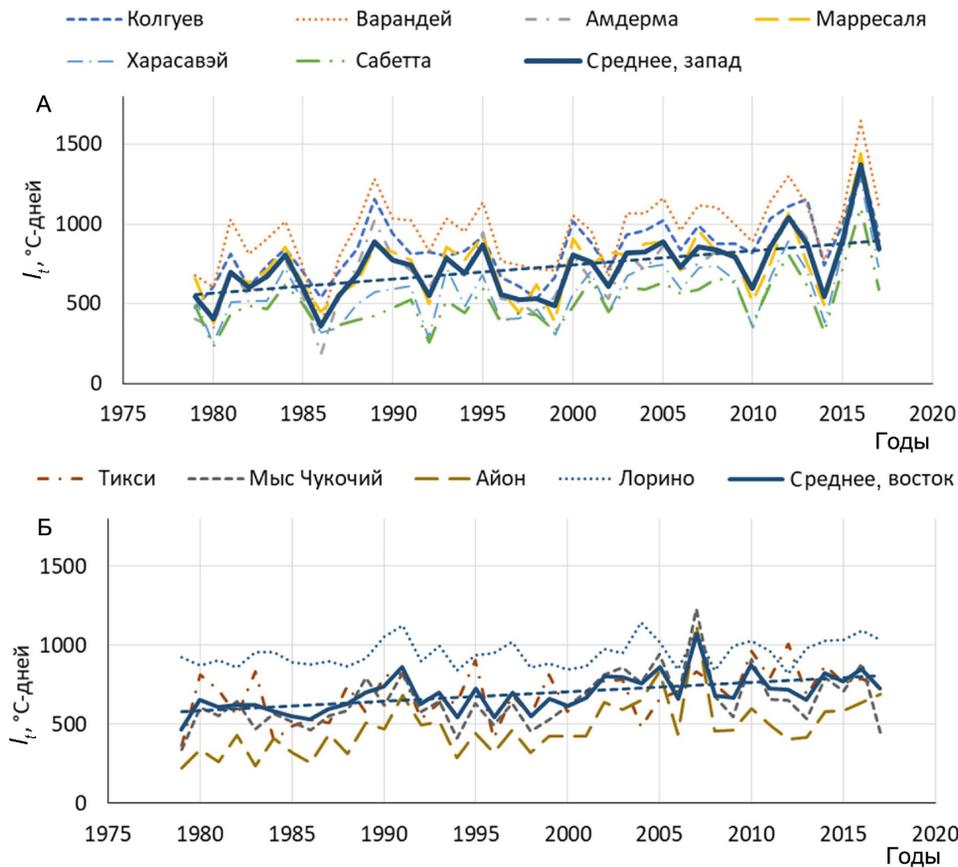


Рис. 3. Многолетняя изменчивость индекса таяния в западной (А) и восточной (Б) частях Арктики.
Пунктирная линия – линейный тренд для средних значений по региону

Fig. 3. Long-term variability of the air thawing index in the western (A) and eastern (B) Arctic.
The linear trend for regional averages is shown as a dotted line

Колебания годовой суммы положительных среднесуточных температур от года к году могут быть значительными: отношение СКО рядов к среднемуголетнему значению колеблется от 0,09 (Лорино) до 0,37 (Айон) и составляет в среднем 0,2. Максимальное за 1979–2017 гг. значение превышает наблюдаемый минимум в среднем в два-три раза, а в районе Амдермы этот показатель достиг 7,5 (1348 градусодней в 2016 г. по сравнению со 183 градусоднями в 1986 г.).

Динамика продолжительности безледного периода. Наибольшая продолжительность безледного периода характерна для о. Колгуев, где лед отсутствует 7–8 месяцев в году (230 дней). Наименьшая продолжительность около 70 дней (2–3 месяца) характерна для участков в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, а также на севере Обской губы (рис. 4, см. табл.).

На фоне потепления климата и сокращения ледяного покрова в Арктике безледный период за последние 40 лет растет значимо на всех ключевых участках за исключением Лорино (1,3 дня/год с 90 до 140 дней): от 20–30 в Тикси до 115 на

о. Колгуев, что составляет 30–75% от среднемноголетнего. На о. Айон – территории с наиболее суровым климатом – период открытой воды стал длиннее на 75%: он увеличился с 30–60 дней до 90–110, вследствие чего берега острова стали подвергаться беспрецедентной механической нагрузке. Наименьшая скорость роста продолжительности безледного периода (менее 1 дня/год или до 30 дней за период с 1979 по 2017 г.) наблюдается в восточной части Российской Арктики: Тикси (Буор-Хая), м. Чукочий, пос. Лорино. Наибольшая скорость роста продолжительности безледного периода характерна для наиболее «морских» районов: это острова Колгуев, Айон и удаленная от бухт и заливов Амдерма. Расположенные в бухтах и заливах Варандей, Сабетта, Лорино, Буор-Хая и Чукочий демонстрируют меньшие темпы прироста по сравнению с участками на открытых побережьях. Приращение безледного периода за 40 лет превышает среднеквадратическую изменчивость ряда в 1,8–2,6 раза (за исключением пос. Лорино), что подтверждает значимость наблюдаемых изменений.

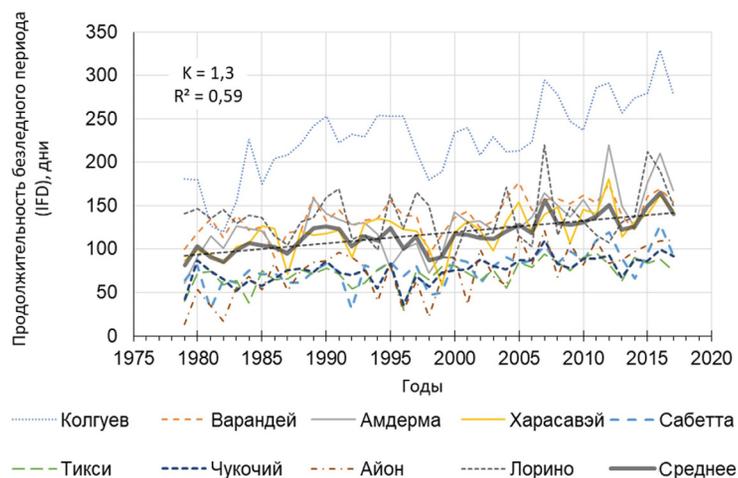


Рис. 4. Продолжительность безледного периода ключевых участков

Fig. 4. Ice-free period duration in key areas

Многолетняя изменчивость энергии ветровых волн. Волноэнергетический фактор значительно различается на ключевых участках берега как в западной и восточной частях Российской Арктики, так и внутри каждого из регионов. На западном побережье Колгуева суммарный поток энергии ветровых волн, рассчитанной по методу Попова–Совершаева, примерно в 20 раз превышает энергию ветровых волн в районе порта Сабетта в Обской губе и вдвое превышает таковой на соседнем Варандее (см. табл., рис. 5). Большие значения на Колгуеве связаны с высокой скоростью ветра и энергией ветровых волн в Баренцевом море, а также с высокой продолжительностью безледного периода. При этом в осенние и зимние месяцы (ноябрь – январь), когда море еще не покрыто льдом, волны воздействуют на замерзший береговой уступ при отрицательных температурах воздуха, что уменьшает скорость разрушения берегов по сравнению с летними месяцами.

Низкие значения энергии ветровых волн в Обской губе обусловлены непродолжительным безледным периодом и малым разгоном волн (до 50 км в СВ и ЮВ направлениях, по остальным направлениям – меньше).

Характерной чертой рядов энергии ветровых волн является большая межгодовая изменчивость. СКО рядов составляет в среднем около половины среднемноголетнего значения: от 30% на Колгуеве до 70% на о. Айон. Бывают «спокойные» годы с минимальной волновой нагрузкой на берега, когда наблюдатель на местности может отметить, что берег не изменил своих очертаний. Если за теплый сезон случается экстремальный шторм, то, напротив, значение потока волновой энергии многократно возрастает, а берег обычно существенно отступает.

В среднем, максимальные значения ряда волновой энергии превышают минимальные в 15 раз. На о. Айон, где в отдельные годы акватория очищается ото льда всего на две-три недели (1979, 1984 и 1998 гг.), отношение максимального значения к минимальному составляет 25. При такой изменчивости рядов направленные многолетние тенденции должны достигнуть определенного порогового значения, чтобы быть обнаруженными в рядах наблюдений.

В целом участки западной экспозиции (о. Колгуев, Харасавэй, о. Айон) характеризуются большим ростом энергии ветровых волн за последние несколько десятилетий по сравнению с участками восточной экспозиции (Сабетта, мыс Чукочий, Лорино) (рис. 5). Это происходит, в частности, за счет увеличения повторяемости западных ветров. На восточных побережьях в годы усиления западных потоков наблюдаются более спокойные с точки зрения волноэнергетические условия, несмотря на увеличение продолжительности безледного периода, которое наблюдается повсеместно в Арктике независимо от ориентации берега. Таким образом, на современном этапе развития климата западные побережья оказываются более чувствительными к потеплению за счет одновременного усиления термического и волноэнергетического воздействия, которое в свою очередь увеличивается не только и не столько за счет более продолжительной экспозиции берега волнам, сколько за счет увеличения повторяемости волноопасных западных штормов.

В наиболее холодных областях, где раньше лед защищал берега в течение большей части года, главную роль в формировании тренда изменений энергии ветровых волн играет продолжительность безледного периода. На о. Айон – одном из самых северных пунктов нашего исследования, расположенном в наиболее суровых ледовых условиях, – высокая корреляция продолжительности периода открытой воды и приходящей энергии волн (0,7) может свидетельствовать о том, что скованность побережья льдом здесь оказывается лимитирующим фактором и любое освобождение акватории ото льда приводит к увеличению механической нагрузки на берега (см. рис. 4). В начале 1980-х гг. продолжительность безледного периода здесь составляла в среднем 45 дней, т. е. фактически западный берег острова был лишен механического воздействия (минимальный безледный период составлял до 13 дней – это практически полное отсутствие механического разрушения, если на этот период не пришлось ни одного шторма, как было в 1979, 1982 и 2001 гг.; см. рис. 4). Начиная с 2002 г.,

акватория очищена ото льда уже не менее 2 месяцев ежегодно, а в 2011–2017 гг. – в среднем 100 дней в году. Произошло кратное возрастание механической нагрузки на берег острова. Так, в 2015 и 2016 гг. значения энергии ветровых волн достигали здесь 1 500 000 т/год (при среднемноголетних около 500 000 т/год). Такие значения сравнимы с гораздо более южнее расположенным пос. Варандей в Баренцевом море.

Рассматривая среднемноголетние значения по всем ключевым участкам западной и восточной частей Российской Арктики (рис. 6), можно сделать вывод, что западный и восточный секторы отличаются в первую очередь количеством приходящей энергии: интегральные среднегодовые значения в

западно-арктических морях обусловлены в первую очередь длительным безледным периодом и большим разгоном волн в Баренцевом и Карском морях по сравнению с восточно-арктическими морями. Тенденции многолетней изменчивости похожи: при максимуме энергии ветровых волн в отдельный год в западной Арктике, в восточной части также наблюдается повышение. Оно может отличаться по амплитуде, однако знак и тенденция изменений совпадает почти во все годы. При этом между отдельными ключевыми участками (см. рис. 6) наблюдается намного больший разброс значений и тенденций в разные годы, чем между западно-арктическими и восточно-арктическими морями при усреднении данных по разным участкам.

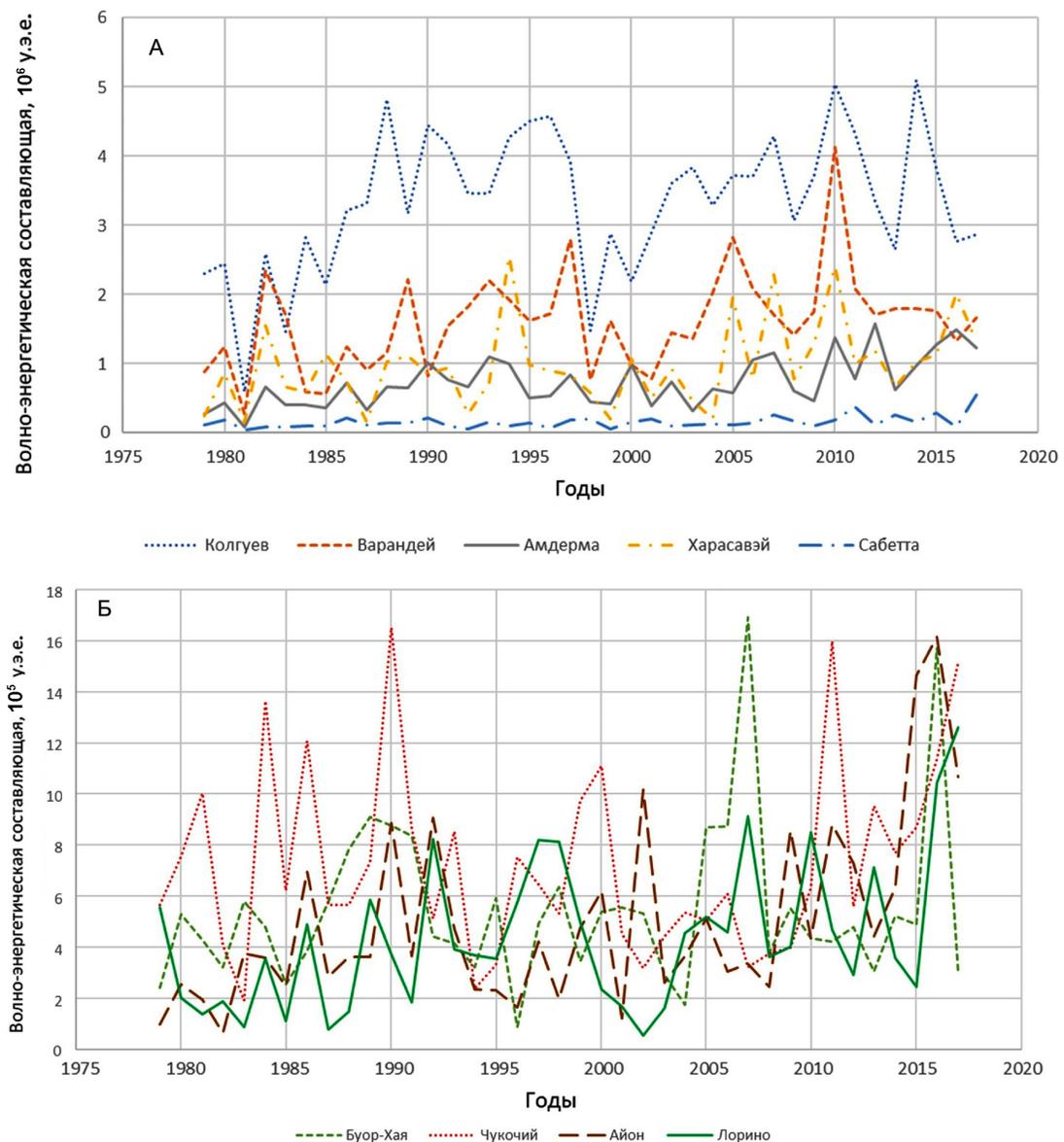


Рис. 5. Многолетняя изменчивость энергии ветровых волн для ключевых участков в западно-арктических (А) и восточно-арктических морях (Б)

Fig. 5. Long-term variability of wind wave energy for key areas in the western (A) and eastern Arctic seas (B)

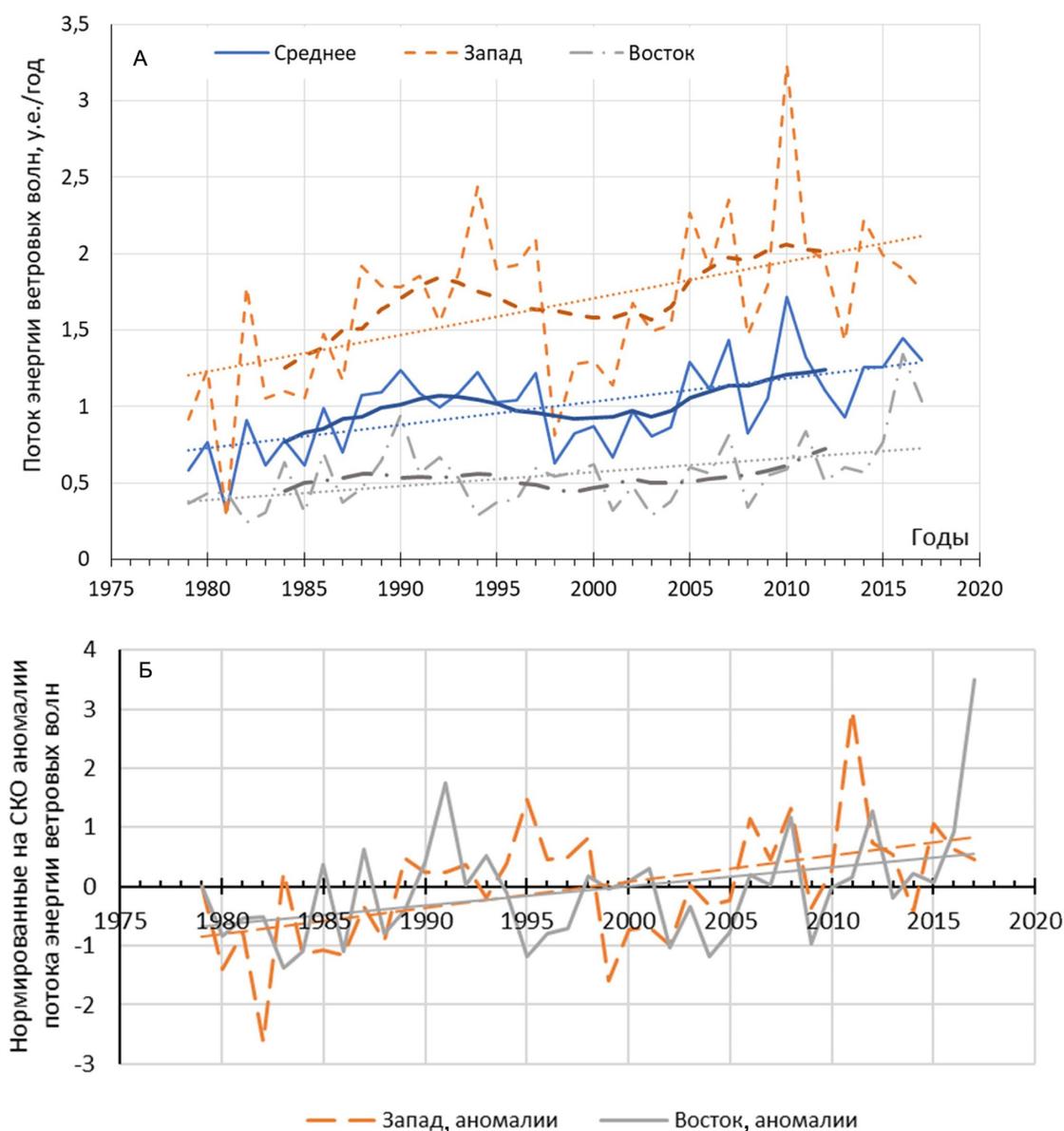


Рис. 6. Многолетняя изменчивость потока энергии ветровых волн на внешней границе береговой зоны девяти ключевых участков в абсолютных величинах (А) и в нормированных на среднее квадратическое отклонение (СКО) аномалиях (Б).

Западные участки: о. Колгуев, п. Варандей, п. Амдерма, п. Харасавэй, п. Сабетта; восточные участки: губа Буор-Хая, м. Чукочий, о. Айон, с. Лорино. Пунктирной линией обозначен линейный тренд

Fig. 6. Long-term variability of the wave energy flux at the outer border of the coastal zone in nine key areas: (A) in absolute values and (B) in normalized parameters of the standard deviation (RMS) anomalies.
Western Arctic: Kolguev, Varandey, Amderma, Kharasavey, Sabetta; eastern Arctic: Buor-Khaya Bay, Cape Chukochiy, Ayon, Lorino.
The linear trend is shown as a dotted line

В целом энергия ветровых волн выросла за последние несколько десятков лет как в западной, так и в восточной части Российской Арктики, однако на западе этот тренд значительно больше за счет более быстрого приращения безледного периода и увеличения времени волнового воздействия на берега.

Полученные значения трендов позволяют утверждать, что на современном этапе развития климата влияние волноэнергетического фактора на

Арктические берега растет. Основную роль в этом процессе играет увеличение повторяемости штормов волноопасных румбов, а наблюдающееся увеличение времени экспозиции берега волнам за счет улучшения ледовой обстановки не приводит к значимым увеличениям потока энергии ветровых волн.

Отличительной чертой волноэнергетического воздействия на берега в последние годы является приращение энергии ветровых волн за счет увели-

чения безледного периода в зимние месяцы. В «теплых» районах Арктики, таких как Колгуев, Лорино и Амдерма, в последние годы замерзание акватории происходит зачастую в следующем за теплым сезоном календарном году (в январе). В таком случае значительная часть энергии ветровых волн поступает уже к мерзлому берегу, поскольку теплый период заканчивается в среднем в октябре – начале ноября. Роль такого зимнего приращения энергии ветровых волн в разрушении берегов еще предстоит установить. Одним из путей решения этого вопроса может быть детальное моделирование процессов оттаивания/замерзания грунта и выноса материала волнами, например с помощью модели [Разумов, 2002; Разумов, Григорьев, 2011; Григорьев и др., 2006; Aleksyutina et al., 2020].

Многолетняя динамика гидрометеорологического потенциала термоабразии. В пространственном распределении ГМ потенциала – суммарного термического и волноэнергетического факторов динамики берегов – особняком стоит о. Колгуев, характеризующийся максимальной ГМ нагрузкой (см. табл.) за счет большого потока энергии ветровых волн и высоких летних температур. В результате западное побережье Колгуева испытывает в 1,5–4 раза большую ГМ нагрузку, чем остальные исследованные участки (рис. 7). Наименьший ГМ потенциал характерен для Сабетты и о. Айон. Оба пункта расположены в высоких широтах, отличающихся низкими температурами, и получают ограниченные потоки энергии ветровых волн: на Сабетте – за счет малого разгона волн, на Айоне – за счет короткого динамически активного периода. СКО рядов ГМ потенциала составляет 20–40% от среднемного-

летнего значения. Максимальное значение превышает минимальное в 2–6 раз.

Во всех исследованных районах ГМ потенциал значительно возрастает в последние годы. На м. Чукочьем и в губе Буор-Хая тренд значим на уровне 0,05, на остальных участках – на 0,01. За весь период приращение составило в среднем 50–60% от среднемноголетнего значения: от 30–35% в Лорино и на м. Чукочьем до 95% на о. Айон. Это больше стандартной изменчивости в среднем в 1,5–2 раза (от 1,2 на м. Чукочьем и в губе Буор-Хая до 3 в Амдерме; см. табл.).

В целом межгодовые колебания осредненных значений ГМ потенциала в западной и восточной Арктике относительно синхронны. В западно-арктических морях значения этого параметра выше, чем в восточно-арктических. Это связано с тем, что и термический, и волноэнергетический факторы здесь проявляются интенсивнее за счет более высоких температур и продолжительного безледного периода. Амплитуда колебаний значений ГМ потенциала на западе также больше за счет быстро меняющихся ледовых и ветровых условий. Тем не менее в восточной Арктике общий ГМ потенциал растет быстрее. Учитывая значительную льдистость берегов и их меньшую устойчивость к размыву по сравнению с западной Арктикой, это может привести к еще большему ускорению термоабразии в ближайшие годы.

Суммарное ГМ воздействие ожидаемо имеет более тесную линейную связь с продолжительностью безледного периода, чем каждая из его составляющих. Коэффициент корреляции осредненных по всем пунктам рядов приближается к 0,9 (от 0,5 в Лорино до 0,84 на о. Айон).

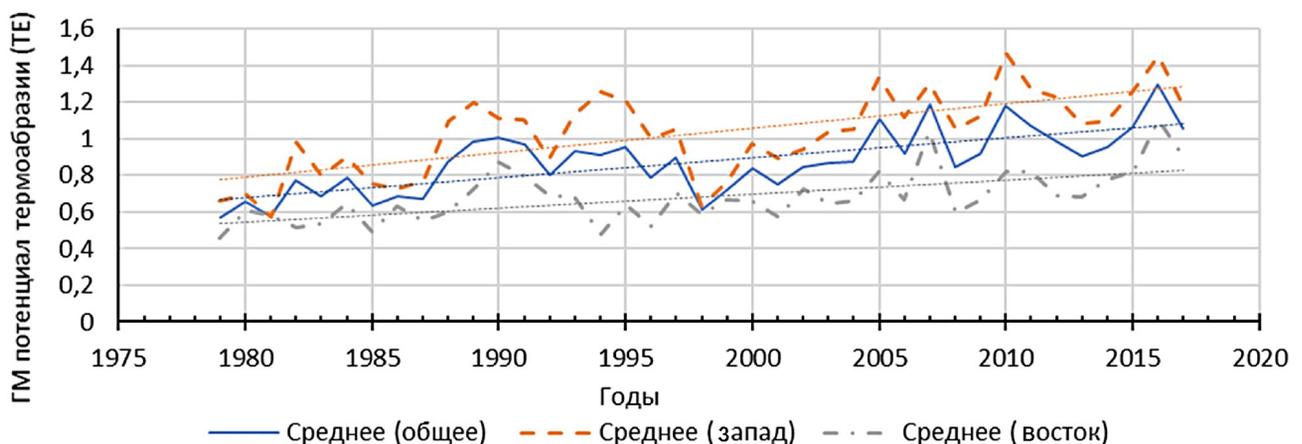


Рис. 7. Динамика гидрометеорологического потенциала термоабразии (ТЕ)

Fig. 7. Dynamics of the hydrometeorological potential of thermal abrasion (TE)

ВЫВОДЫ

Суммарный ГМ потенциал термоабразии берегов, сложенных мерзлыми дисперсными породами, значимо возрастает в последние годы во всех районах Российской Арктики. На протяжении всего побережья от о. Колгуева до Чукотки наблюдается увеличение ГМ потенциала термоабразии берегов за счет как термического, так и волноэнергетического факторов. Продолжительность безледного периода в 1979–2017 гг. увеличилась на 15–75%. Она коррелирует с температурами теплого сезона, с энергией ветровых волн и наиболее сильно с суммарным ГМ воздействием (коэффициент корреляции от 0,5 до 0,84). Таким образом, про-

должительность безледного периода выступает ведущим фактором в динамике арктических берегов. Она связана с температурными условиями, поскольку растет за счет потеплений и определяет длительность волнового воздействия на берега, регулируя суммарное количество волновой энергии, воздействующей на уступы в течение года. Также значительную роль в многолетней динамике волноэнергетического фактора играет изменение повторяемости штормов волноопасных румбов. В связи с этим западные побережья в периоды потеплений могут испытывать большие ГМ нагрузки за счет увеличения повторяемости западных ветров, обычно сопровождающего потепления.

Благодарности. Исследование проведено при поддержке РФФИ (проект 18-05-60300) и государственной темы НИР лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ (№121051100167-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексютина Д.М., Мазнев С.В., Белова Н.Г., Шилова О.С.* Влияние криогенных процессов на динамику Уральского берега Байдарацкой губы Карского моря // Арктика и Антарктика. 2019. № 4. С. 84–96. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.4.31604.
- Арэ Ф.Э.* Термоабразия морских берегов. М.: Наука, 1980. С. 5–40.
- Великоцкий М.А.* Особенности современной динамики берегов о. Колгуев // Динамика Арктических побережий России. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. С. 93–101.
- Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Черкашев Г.А., Ванштейн Б.Г.* Динамика берегов Карского моря // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 2. С. 56–67.
- Воскресенский К.С., Совершаев В.А.* Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий // Динамика Арктических побережий России. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1998. С. 35–48.
- Григорьев М.Н.* Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2008. 40 с.
- Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б.* Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 4. С. 74–94.
- Кизяков А.И., Зимин М.В., Лейбман М.О., Правикова Н.В.* Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 4. С. 36–47.
- Огородов С.А.* Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 173 с.
- Маслаков А.А.* Современная динамика берегов Берингова и Чукотского морей. Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления»): материалы Международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 13–23 июня 2019 г.). Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. С. 181–182.
- Попов А.И.* Об условиях формирования осадочно-криогенного комплекса в плейстоцене на приморских равнинах Субарктики // Проблемы криолитологии. 1983. Вып. 11. С. 19–37.
- Попов Б.А., Совершаев В.А.* Принципы выбора исходных данных для расчета потоков волновой энергии // Береговая зона моря. М.: Наука, 1981. С. 47–153.
- Попов Б.А., Совершаев В.А.* Некоторые черты динамики арктических берегов Азии // Вопросы географии. М.: Мысль, 1982. Вып. 119. С. 105–116.
- Разумов С.О.* Модель динамики ледяных берегов с переменными составляющими абразионной активности моря в нестационарных климатических условиях // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 35–44.
- Разумов С.О., Григорьев М.Н.* Береговые криогенные процессы как фактор дестабилизации углекислого-карбонатного равновесия в морях восточной Сибири // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 75–79. URL: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2011-4/75.pdf>.
- Суркова В., Соколова Л.А., Чичев А.Р.* Многолетний режим экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом и Карском морях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 5. С. 53–58.
- Фартышев А.И.* Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск: Наука, 1993. 136 с.
- Aleksyutina D., Ogorodov S., Shilova O.S.* Simulation of coastal dynamics at the Kara Sea, *Journal of Coastal Research*, 2020, no. 95, p. 330–335.
- Andersland O.B., Ladanyi B.* *Frozen ground engineering*, 2nd edition. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, p. 10–50.
- Atkinson D.E.* Observed storminess patterns and trends in the circum-Arctic coastal regime, *Geo-Mar Lett.*, 2005, vol. 25, p. 98–109, DOI: 10.1007/s00367-004-0191-0.
- Atkinson D.E., Solomon S.M.* A circumarctic environmental forcing database for coastal morphological prediction:

- development and preliminary analyses. Arctic Coastal Dynamics, V. Rachold, J. Brown, S. Solomon, J.L. Sollid (eds.), *Rep. on Polar and Marine Res. Bremerhaven, AWI Publ.*, 2003, no. 443, p. 19–23.
- Baranskaya A., Novikova A., Shabanova N., Romanenko F., Ogorodov S. Late Quaternary and Modern Evolution of Permafrost Coasts at Belyi Island, Kara Sea, *Journal of Coastal Research*, 2020, vol. 95, p. 356–361, DOI: 10.2112/S195-069.1.
- Baranskaya A.V., Novikova A.V., Shabanova N.N., Belova N.G., Maznev S.V., Ogorodov S.A., Jones B.M. The role of thermal denudation in erosion of ice-rich permafrost coasts in an enclosed bay, *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 8, 566227, DOI: 10.3389/feart.2020.566227.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy 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., Rosnay de 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, vol. 137, p. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
- Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea, *Regional Studies in Marine Science*, 2019, vol. 30, Article 100719, DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100719.
- GEBCO Compilation Group. GEBCO 2020 Grid, 2020, DOI: 10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *J. Clim.*, 2017, vol. 30, iss. 14, p. 5419–5454, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A., Flint P.L. Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska, *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, p. L03503, DOI: 10.1029/2008GL036205.
- Lantuit H., Overduin P.P., Wetterich S. Recent progress regarding permafrost coasts, *Permafrost Periglac.*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 120–130, DOI: 10.1002/ppp.1777.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13, no. 5, p. 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Overland J., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M., Kattsov V., Olsen M.S., Pawlak J., Reiersen L.-O., Wang M. The urgency of Arctic change, *Polar Science*, 2019, vol. 21, p. 6–13, DOI: 10.1016/j.polar.2018.11.008.
- Poli P., Hersbach H., Dee D., Berrisford P., Simmons A., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G., Peubey C., Thépaut J., Trémolet Y., Hólm E., Bonavita M., Isaksen L., Fisher M.A. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, p. 4083–4097, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M., Sela J., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, p. 1015–1057.
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Iredell M., Ek M., Meng J., Jang R., Mendez M., Dool van den H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E. The NCEP Climate Forecast System Version 2, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, iss. 6, p. 2185–2208, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Shabanov P.A., Shabanova N.N. Open water season changes over the Kara sea coastal zone: Marresalya example. IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019, p. 4218–4221.
- Savo V., Lepofsky D., Benner J.P., Kohfeld K.E., Bailey J., Lertzman K. Observations of climate change among subsistence-oriented communities around the world, *Nat. Clim. Change*, 2016, vol. 6, p. 462–473, DOI: 10.1038/nclimate2958.
- Serreze M.C., Barrett A.P., Stroeve J.C., Kindig D.N., Holland M.M. The emergence of surface-based Arctic amplification, *The Cryosphere*, 2009, vol. 3, iss. 1, p. 11–19, DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.
- Shabanova N.N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of Western Russian arctic coastal dynamics: XX-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129, DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.
- Stopa J., Ardhuin F., Girard-Ardhuin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: seasonality and trends, *The Cryosphere*, 2016, vol. 10, no. 4, p. 1605–1629.
- Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters, *J. Climate*, 2016, vol. 29, no. 22, p. 7957–7975.
- Waseda T., Webb A., Sato K., Inoue J., Kohout A., Penrose B. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic Ocean, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, DOI: 10.1038/s41598-018-22500-9.

Электронные ресурсы

- IPCC. Climate Change 2014. AR5 Synthesis Report, 2014, URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (дата обращения 01.05.2020).
- C3S – Copernicus Climate Change Service: ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017, URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (дата обращения 15.04.2019).
- CFSR – Climate Data. Climate Forecast System Reanalysis. NCAR, USA, URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr> (дата обращения 15.04.2019).
- OSI SAF. Global Sea Ice Concentration Climate Data Record v2.0 – Multimission, EUMETSAT SAF on Ocean and Sea Ice, 2017, DOI: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008 (дата обращения 01.05.2020).
- OSI SAF. Global sea ice concentration interim climate data record 2016 onwards (v2.0), EUMETSAT on Ocean and Sea Ice, 2019, URL: http://osisaf.met.no/p/ice/ice_conc_reprocessed.html (дата обращения 01.05.2020).

Поступила в редакцию 12.03.2021

После доработки 21.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

CHANGES OF HYDROMETEOROLOGICAL POTENTIAL OF THERMOABRASION ON THE RUSSIAN ARCTIC COASTS

S.A. Ogorodov¹, N.N. Shabanova², A.S. Kessel³, A.V. Baranskaya⁴, S.O. Razumov⁵

^{1,2,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Geoecology of the North

³ FGBU GOIN named after N.N. Zubov

⁴ Institute of Geography RAS, Department of Paleogeography of the Quaternary, laboratory of paleoarchives of the natural environment, Junior Researcher

⁵ Institute of Permafrost named after P.I. Melnikov SB RAS, Laboratory of General Geocryology

¹ Chief Researcher, D.Sc. in Geography, Professor of the RAS; e-mail: ogorodov@aha.ru

² Researcher; e-mail: nat.volobuyeva@gmail.com

³ Postgraduate student; e-mail: naskes19@gmail.com

⁴ Leading Researcher; e-mail: alisa.baranskaya@yandex.ru

⁵ Chief Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: razum55@mail.ru

The paper presents the results of the analysis of wave-energy and thermal components of the hydrometeorological (HM) potential of coast thermoabrasion for nine key areas in the western and eastern sectors of the Russian Arctic for the period of 1979 to 2017. The air thawing and air freezing indices were used to calculate the thermal impact on the permafrost coasts the indices represent the accumulated sum of mean daily temperatures of the warm and cold periods, respectively. The wave-energy component is calculated using the Popov-Sovershaev method. The calculations used data from hydrometeorological stations and CFSR, CFSv2, MERRA and ERA5 reanalysis data. The duration of the ice period is determined using the satellite data.

It was found that the thawing index is everywhere growing steadily and significantly, and the total potential for destruction of the shores built of frozen dispersed rocks has been significantly increasing recently in all regions of the Russian Arctic. There is an increase in the HM potential for coastal destruction along the coast from about the Kolguev Island to Chukotka due to both thermal and mechanical factors, including the associated increasing ice-free period. For the period 1979–2017 the increment averaged 30 to 95% of the long-term average, which is 1.2 to 3 times the standard variability. The most significant changes are observed on the island of Ayon, which has the most severe climate; the least significant changes were in Lorino, on the Chukochoy Cape and in the Buor-Khaya Bay. The increase results from both the increasing temperatures, and the growth in the energy flows of wind waves. The duration of ice-free period correlates with the warm season temperatures, the wind wave energy, and mostly with the total HM impact. Thus, the duration of the ice-free period is a leading factor in the dynamics of the Arctic coasts, determining both temperature and wave conditions. Changing frequency of storms of wave-dangerous directions plays the main role in the dynamics of the wind-wave factor.

Keywords: permafrost, thermal abrasion, thermal denudation, air thawing index, wave energy, hydrometeorological potential of thermal abrasion, coastal dynamics, Russian Arctic, Arctic climate change

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-05-60300) and the state budget research project of the Laboratory of Geoecology of the North of the Faculty of Geography of Moscow State University (No. 121051100167-1).

REFERENCES

- Aleksyutina D., Ogorodov S., Shilova O.S. Simulation of coastal dynamics at the Kara Sea, *J. of Coastal Research*, 2020, no. 95, p. 330–335.
- Aleksyutina D.M., Maznev S.V., Belova N.G., Shilova O.S. Vliyaniye kriogennykh protsessov na dinamiku Ural'skogo berega Baidaratskoi guby Karskogo moray [The influence of the permafrost processes upon erosion of the Ural coast of Baydaratskaya Bay, Kara Sea], *Arktika i Antarktika*, 2019, no. 4, p. 84–96, DOI: 10.7256/2453-8922.2019.4.31604. (In Russian)
- Andersland O.B., Ladanyi B. *Frozen ground engineering*, 2nd edition. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, p. 10–50.
- Are F.E. *Termoabraziya morskikh beregov* [Thermal abrasion of sea coasts], Moscow, Nauka Publ., 1980, p. 5–40. (In Russian)
- Atkinson D.E. Observed storminess patterns and trends in the circum-Arctic coastal regime, *Geo-Mar Lett.*, 2005, vol. 25, p. 98–109, DOI: 10.1007/s00367-004-0191-0.
- Atkinson D.E., Solomon S.M. A circumarctic environmental forcing database for coastal morphological prediction: development and preliminary analyses. Arctic Coastal Dynamics, V. Rachold, J. Brown, S. Solomon, J.L. Sollid (eds.), *Rep. on Polar and Marine Res. Bremerhaven*, AWI Publ., 2003, no. 443, p. 19–23.
- Baranskaya A., Novikova A., Shabanova N., Romanenko F., Ogorodov S. Late Quaternary and Modern Evolution of Permafrost Coasts at Belyi Island, Kara Sea, *J. of Coastal Research*, 2020, vol. 95, p. 356–361, DOI: 10.2112/SI95-069.1.
- Baranskaya A.V., Novikova A.V., Shabanova N.N., Belova N.G., Maznev S.V., Ogorodov S.A., Jones B.M. The

- role of thermal denudation in erosion of ice-rich permafrost coasts in an enclosed bay, *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 8, 566227, DOI: 10.3389/feart.2020.566227.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., Rosnay de 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, vol. 137, p. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
- Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea, *Regional Studies in Marine Science*, 2019, vol. 30, Article 100719, DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100719.
- Fartyshev A.I. *Osobennosti pribrezhno-shel'fovoi kriolitozony morya Laptevskh* [Specific features of the coastal shelf permafrost zone of the Laptev Sea], Novosibirsk, Nauka Publ., 1993, 136 p. (In Russian)
- GEBCO Compilation Group. GEBCO 2020 Grid, 2020, DOI: 10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *J. Clim.*, 2017, vol. 30, iss. 14, p. 5419–5454, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Grigor'ev M.N. *Kriomorfogenez i litodinamika pribrezhno-shel'fovoi zony morei Vostochnoi Sibiri* [Cryomorphogenesis and lithodynamics of the coastal shelf zone of the seas of Eastern Siberia], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in geological and mineralogical sciences, Yakutsk, In-t Merzlotovedeniya Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 40 p. (In Russian)
- Grigor'ev M.N., Razumov S.O., Kunitskii V.V., Spektor V.B. *Dinamika beregov vostochnykh arkticheskikh morei Rossii: osnovnye faktory, zakonomernosti i tendentsii* [Dynamics of the Russian East Arctic sea coast: major factors, regularities and tendencies], *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 4, p. 74–94. (In Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu Cr., Radnoti G., Rosnay de P., Rozum I., Vamborg Fr., Villeneuve S., Thépaut J.-N. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly J. of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A., Flint P.L. Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska, *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, p. L03503, DOI: 10.1029/2008GL036205.
- Kizyakov A.I., Zimin M.V., Leibman M.O., Pravikova N.V. Monitoring skorosti termodenudatsii i termoabrazii na zapadnom poberezh'e ostrova Kolguev s ispol'zovaniem materialov kosmicheskoi s'emki vysokogo razresheniya [Monitoring of the rate of thermal denudation and thermal abrasion on the western coast of Kolguev Island using high-resolution satellite images], *Kriosfera Zemli*, 2013, vol. 17, no. 4, p. 36–47. (In Russian)
- Lantuit H., Overduin, P.P., Wetterich S. Recent progress regarding permafrost coasts, *Permafrost Periglac.*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 120–130, DOI: 10.1002/ppp.1777.
- Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters, *J. Climate*, 2016, vol. 29, no. 22, p. 7957–7975.
- Maslakov A.A. [Modern dynamics of the shores of the Bering and Chukchi seas], *Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosferykh yavlenij i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh globalnykh klimaticheskikh i industrialnykh vyzovov ("Opasnye yavleniya")* [Regularities of the formation and impact of marine, atmospheric hazards and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges ("Hazardous phenomena")], Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Rostov-na-Donu, 13–23 July, 2019), Rostov-na-Donu, Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2019, p. 181–182. (In Russian)
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13, no. 5, p. 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Ogorodov S.A. *Rol' morskikh l'dov v dinamike rel'efa beregovoi zony* [The role of sea ice in the dynamics of the coastal zone relief], Moscow, Moscow State Un-ty Publ., 2011, 173 p. (In Russian)
- Overland J., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M., Kattsov V., Olsen M.S., Pawlak J., Reiersen L.-O., Wang M. The urgency of Arctic change, *Polar Science*, 2019, vol. 21, p. 6–13, DOI: 10.1016/j.polar.2018.11.008.
- Poli P., Hersbach H., Dee D., Berrisford P., Simmons A., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G., Peubey C., Thépaut J., Trémolet Y., Hólm E., Bonavita M., Isaksen I., Fisher M.A. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century, *J. of Climate*, 2016, vol. 29, p. 4083–4097, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Popov A.I. Ob usloviyakh formirovaniya osadochno-kriogenogo kompleksa v pleistotsene na primorskikh ravninakh Subarktiki [Conditions of formation of the sedimentary-cryogenic complex in the Pleistocene on the coastal plains of the Subarctic], *Problemy kriolitologii*, 1983, vol. 11, p. 19–37. (In Russian)
- Popov B.A., Sovershaev V.A. [Particular features of dynamics of the Arctic Sea coasts of Asia], *Voprosy geografii* [Topics of geography], Moscow, Mysl' Publ., 1982, vol. 119, p. 105–116. (In Russian)
- Popov B.A., Sovershaev V.A. [Principles of choice of initial data for calculating wave energy fluxes], *Beregovaya zona morya* [Coastal zone of the sea], Moscow, Nauka Publ., 1981, p. 47–153 (In Russian)
- Razumov S.O. Model' dinamiki l'distykh beregov s perezmenyivymi sostavlyayushchimi abrazionnoi aktivnosti morya v nestatsionarnykh klimaticheskikh usloviyakh [Ice-rich coast dynamics model with variable components of the sea abrasion activity in unstable climatic conditions], *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 3, p. 35–44. (In Russian)
- Razumov S.O., Grigoriev M.N. Coastal erosion as a destabilizing factor of carbonate balance in the East Siberian Arctic seas, *Earth's Cryosphere*, 2011, vol. 15, no. 4, C. 65–68.

- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M., Sela J., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, p. 1015–1057.
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Iredell M., Ek M., Meng J., Jang R., Mendez M., Dool van den H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E. The NCEP Climate Forecast System Version 2, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, iss. 6, p. 2185–2208, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Savo V., Lepofsky D., Benner J.P., Kohfeld K.E., Bailey J., Lertzman K. Observations of climate change among subsistence-oriented communities around the world, *Nat. Clim. Change*, 2016, vol. 6, p. 462–473, DOI: 10.1038/nclimate2958.
- Serreze M.C., Barrett A.P., Stroeve J.C., Kindig D.N., Holland M.M. The emergence of surface-based Arctic amplification, *The Cryosphere*, 2009, vol. 3, iss. 1, p. 11–19, DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.
- Shabanov P.A., Shabanova N.N. Open water season changes over the Kara Sea coastal zone: Marresalya example, *IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, 2019, p. 4218–4221.
- Shabanova N.N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of Western Russian arctic coastal dynamics: XX-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129, DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.
- Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: seasonality and trends, *The Cryosphere*, 2016, vol. 10, no. 4, p. 1605–1629.
- Surkova G.V., Sokolova L.A., Chichev A.R. Mnogoletnii rezhim ekstremal'nykh znachenii skorosti vetra v Barentsevom i Karskom moryakh [Long-term regime of extreme winds in the Barents and Kara seas], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 5, p. 53–58. (In Russian)
- Vasil'ev A.A., Streletskaya I.D., Cherkashev G.A., Vanshtein B.G. Dinamika beregov Karskogo morya [Coastal dynamics of the Kara Sea], *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 2, p. 56–67. (In Russian)
- Velikotskii M.A. [Features of the modern dynamics of the Kolguev Island coast], *Dinamika Arkticheskikh poberezhij Rossii* [Dynamics of the Arctic coasts of Russia], MGU Publ., 1998, p. 93–101. (In Russian)
- Voskresenskii K.S., Sovershaev V.A. [The role of exogenous processes in the dynamics of the Arctic coasts], *Dinamika Arkticheskikh poberezhij Rossii* [Dynamics of the Arctic coasts of Russia], Moscow, Moscow State Un-ty Publ., 1998, p. 35–48. (In Russian)
- Waseda T., Webb A., Sato K., Inoue J., Kohout A., Penrose B. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic Ocean, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, DOI: 10.1038/s41598-018-22500-9.

Web sources

- C3S – Copernicus Climate Change Service: ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017, URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (access date 15.04.2019).
- CFRS – Climate Data. Climate Forecast System Reanalysis. NCAR, USA, URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfrs> (access date 15.04.2019).
- IPCC. Climate Change 2014. AR5 Synthesis Report, 2014, URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (access date 01.05.2020).
- OSI SAF. Global Sea Ice Concentration Climate Data Record v2.0 – Multimission, EUMETSAT SAF on Ocean and Sea Ice, 2017, DOI: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008 (access date 01.05.2020).
- OSI SAF. Global sea ice concentration interim climate data record 2016 onwards (v2.0), EUMETSAT on Ocean and Sea Ice, 2019, URL: http://osisaf.met.no/p/ice/ice_conc_reprocessed.html (access date 01.05.2020).

Received 12.03.2021

Revised 21.06.2021

Accepted 20.07.2021

УДК 911.2:574.9(98)

ПРИРОДНООЧАГОВЫЕ БОЛЕЗНИ В АРКТИКЕ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

С.М. Малхазова¹, В.А. Миронова², И.Х. Башмакова³

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра биогеографии*

³ *Университет Хельсинки, Институт атмосферных и земных систем*

¹ *Проф., зав. кафедрой, д-р геогр. наук; e-mail: sveta_geo@mail.ru*

² *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: mironova.va@gmail.com*

³ *Науч. сотр.; e-mail: iryna.bashmakova@helsinki.fi*

Настоящий обзор посвящен проблеме распространения природноочаговых болезней в Арктическом регионе в условиях глобального изменения климата. Рассмотрен вопрос о влиянии факторов меняющейся среды на функционирование очагов природноочаговых болезней в арктических регионах России, Европы и Северной Америки, вопросы сдвигов ареалов возбудителей, их носителей и переносчиков на север в связи с потеплением климата; приведены примеры вспышек природноочаговых заболеваний в арктических районах. В обзоре использовано 55 публикаций. Отбор статей произведен на платформах Pubmed, ScienceDirect, e-Library и Киберленинка. Анализ литературы позволил установить 18 природноочаговых болезней, наиболее значимых для российской и зарубежной Арктики; для десяти из них проведен обзор распространения в России и других странах, имеющих арктические территории. Можно предположить, что в связи с изменениями климата наиболее интенсивно будут продвигаться на север клещевые инфекции вслед за расширением ареалов переносчиков и теплокровных носителей. Кроме того, не исключены новые вспышки туляремии, вызванные высокой численностью переносчиков (комаров и слепней), а также реактивация очагов сибирской язвы из-за деградации вечной мерзлоты и вытаивания скотомогильников. Обобщение данных по болезням и патологиям арктического населения показало, что наиболее уязвимыми являются группы, которые живут в отдаленных районах, где адаптация к климатическим изменениям наиболее сложная из-за недостаточной экономической поддержки или отсутствия инфраструктуры. В целом отмечается недостаточное количество исследований, рассматривающих распространение природноочаговых болезней в условиях меняющейся окружающей среды, в первую очередь именно для наиболее отдаленных регионов.

Ключевые слова: зоонозы, факторы среды, глобальные изменения климата

ВВЕДЕНИЕ

Арктический регион отличается экстремальной природной средой. Для регионов Арктики характерен высокий уровень ее дискомфорта на фоне неоднородности хозяйственного освоения, плотности населения, степени освоенности и антропогенной нагрузки. В настоящее время регион подвержен сильному техногенному давлению, что, в свою очередь, влияет на медико-экологическую обстановку. Наиболее важными компонентами природной среды, определяющими ее экстремальность, являются климатические и биотические факторы.

Климатическая компонента экстремальности природных условий рассматривается как преобладающая по сравнению с остальными, т. к. она более интенсивно влияет на организмы человека и

животных и воздействует на обширные территории [Hedlund et al., 2014].

Биотические факторы обуславливают существование очагов природноочаговых болезней, которые, в свою очередь, также сильно зависят от действия климатического фактора. Установлено, что в процессе современного потепления Арктика прогревается быстрее других регионов земного шара [IPCC..., 2013]. Одной из наиболее важных задач является оценка возможности изменения нозоареалов природноочаговых болезней в связи с потеплением климата и прогноз таких изменений. Сведения о распространении природноочаговых болезней в Арктическом регионе неполны и отрывочны, что связано со сложностями сбора информации в труднодоступных районах. Не для всех районов и болезней имеется достоверная картина заболеваемости в

связи со значительной недообследованностью населения арктических поселков и недоступностью медицинской помощи и лабораторной диагностики заболеваний [Бобырева и др., 2016; Ватлина и др., 2019]. Кроме того, сравнение данных по заболеваемости отдельными природноочаговыми болезнями часто бывает ограничено разницей в системах отчетности и нормативных документах разных стран, поэтому для более точных оценок в дальнейшем необходима стандартизация показателей [Omazic et al., 2019a].

В целом, целенаправленные комплексные медико-географические исследования, посвященные Арктике, довольно немногочисленны. Настоящий обзор посвящен проблеме распространения природноочаговых болезней в Арктическом регионе и возможном влиянии на них изменений климата. Задачами обзора являются выявление круга природноочаговых болезней, представляющих опасность для жителей северных регионов, их география, определение взаимосвязей с факторами среды, а также прогноз возможных изменений нозоареалов болезней в связи с глобальным потеплением климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа отбирались публикации, содержащие информацию о географии природноочаговых болезней в Российской и зарубежной Арктике, влиянии глобальных изменений климата на возможное расширение ареалов болезней, моделирование и прогноз эпидемиологической ситуации. Поиск публикаций на английском языке осуществлялся по ключевым словам: arctic region; infections; zoonoses, climate change на платформах Pubmed [Pubmed.gov..., 2021] и ScienceDirect [ScienceDirect..., 2021]. Поиск публикаций на русском языке – по ключевым словам: Арктика, природноочаговые болезни, зоонозы, изменения климата, а также по названиям отдельных болезней на платформах e-library [eLibrary.ru..., 2021] и «КиберЛенинка» [Научная..., 2021]. Рассматривались публикации с 1998 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенному анализу, к числу наиболее упоминаемых в литературе природноочаговых болезней арктических регионов можно отнести 18 нозоформ. В настоящее время внимание исследователей в Арктике в целом привлекают в первую очередь такие природноочаговые инфекции и инвазии, как [Беэр, 2005; Dupouy-Camet et al., 2017; Parkinson et al., 2014; Pakharukova, Mordvinov, 2016]:

а) бактериальные: бруцеллез (*Brucella spp.*), туляремия (*Francisella tularensis*), сибирская язва

(*Bacillus anthracis*), лептоспирозы (*Leptospira spp.*), ботулизм (*Clostridium botulinum*), иксодовые клещевые боррелиозы (*Borrelia spp.*);

б) протозойные: токсоплазмоз (*Toxoplasma gondii*), лямблиоз (жиардиаз) (*Giardia spp.*), криптоспоридиоз (*Cryptosporidia spp.*);

в) гельминтозы: трихинеллезы (*Trichinella spp.*), эхинококкоз (*Echinococcus granulosus*), альвеококкоз (*E. multilocularis*), токсокароз (*Toxocara canis*), дифиллоботриозы (*Diphyllobothrium sp.*), описторхоз (*Opisthorchs felineus*);

г) вирусные: бешенство, хантавирусные инфекции и клещевой энцефалит.

Анализ литературы и собственные исследования [Медико-географический..., 2017; Malkhazova et al., 2020] позволили отобрать для анализа ситуации десять наиболее важных природноочаговых нозоединиц, актуальных для Российской и зарубежной Арктики, а именно: туляремия, сибирская язва, лептоспирозы, трихинеллез, описторхоз, дифиллоботриозы, эхинококкозы, клещевой энцефалит, иксодовые клещевые боррелиозы, геморрагическая лихорадка с почечным синдромом.

Распространение природноочаговых болезней в Арктике. Туляремия. Одной из наиболее опасных природноочаговых болезней, имеющих в том числе в северных регионах мира, является туляремия. Очаги туляремии широко распространены на Аляске, где сероположительными являются до 50% животных и до 18% людей [Hansen et al., 2011], в Скандинавии и России. В Швеции туляремия распространена повсеместно, а наиболее пораженными территориями являются северные районы [Desvars et al., 2015]. Несмотря на то что были описаны случаи передачи туляремии через воду [Lindhusen Lindhé et al., 2017], преобладающим путем ее распространения в Швеции является трансмиссивный [Eliasson, Bäck, 2007]. Возбудитель передается через укусы комаров, клещей, слепней и других кровососущих членистоногих. В Российской Арктике наблюдается высокая активность природных очагов тундрового и пойменно-болотного типа. В 2016 г. отмечена вспышка (10 случаев) в Ненецком автономном округе, что позволило исследователям рассматривать имеющиеся там очаги как потенциально опасные и активные [Кудрявцева и др., 2017]. Несмотря на то что заболеваемость туляремией у людей носит спорадический характер и обычно не достигает высоких значений, каждый случай заболевания рассматривается как потенциально опасный ввиду тяжести заболевания.

Сибирская язва. Энзоотичные по сибирской язве территории (т. е. территории, на которых постоянно присутствует возбудитель болезни) по большей части приурочены к регионам с теплым климатом.

Однако существуют и крупные природные очаги, расположенные в северных регионах, в том числе и за Полярным кругом. К ним относятся Сибирь (полуострова Ямал и Таймыр), север и северо-запад Канады (например, заповедник Маккензи Байсон и национальный парк Вуд Баффало (северо-западные территории Канады)) [Salb et al., 2014; New et al., 2017]. На территории Арктики наиболее уязвимыми для сибирской язвы животными являются северные олени и овцебыки. Основная проблема заключается в опасности реактивации очагов сибирской язвы в связи с таянием вечной мерзлоты и обнажением старых скотомогильников на фоне прекращения вакцинации северных оленей [Ревич, 2020].

Лептоспирозы. Несмотря на то что в целом заболеваемость населения лептоспирозами в Арктическом регионе, как и во всей России, весьма незначительна и можно говорить лишь о спорадических случаях, их природные очаги существуют в ряде регионов Российской Арктики, в частности в Якутии, Мурманской и Архангельской областях [Кершенгольц и др., 2009; Дударев и др., 2017; Malkhazova et al., 2020]. Кроме того, лептоспирозы выявляются в арктическом регионе у собак и сельскохозяйственных животных [Токаревич, Стоянова, 2011; Zakharova et al., 2020], что повышает риск заболевания людей.

Бешенство. Согласно районированию очаговой территории бешенства [Сидоров и др., 2004] Российская Арктика относится к Арктическому природноочаговому региону, где эта инфекция имеет ряд своеобразных черт, главной из которых является циркуляция особого антигенного варианта тундрового бешенства – дикования. При этом заболеваемость людей в регионе практически отсутствует, что может быть связано с редкостью контактов человека с песцами и невысокой патогенностью арктического варианта вируса для людей [Медико-географический..., 2017]. Очаги бешенства существуют в большинстве зарубежных арктических регионов. Эпидемиология и эпизоотология бешенства, по-видимому, имеют общие для всей Арктики характеристики, но из-за труднодоступности значительной части районов многие вопросы этой инфекции остаются неизученными [Mørk, Prestrud, 2004].

Бруцеллез – повсеместно распространенная болезнь, вызываемая группой бактерий из рода *Brucella*, поражающая, главным образом, сельскохозяйственных животных, от которых заражается человек. Циркуляция бруцелл в дикой природе изучена недостаточно, хотя достоверно известно, что они в состоянии существовать в природных экосистемах без участия сельскохозяйственных животных [Медико-географический..., 2017]. Бруцеллез встречается в популяциях овцебыков и диких север-

ных оленей на Аляске [Hueffer et al., 2013] и севере Канады [Tomaselli et al., 2019]. Имеются данные о наличии бруцелл у морских млекопитающих на севере Европы и возможности их передачи человеку во время охоты на них [Sonne et al., 2018]. В Российской Арктике и, в частности, на Таймыре отмечается высокая пораженность бруцеллезом диких и домашних северных оленей, а также плотоядных животных, контактирующих с ними [Лайшев и др., 2015].

Гельминтозы и протозоозы. Представители арктических сообществ подвергаются повышенному риску заражения природноочаговыми паразитарными заболеваниями. Паразитозы, вызванные как гельминтами, так и простейшими, являются относительно распространенными болезнями в арктических сообществах по всему миру. В инуитских общинах в канадской Арктике было проведено серологическое исследование на четыре паразитарных зооноза. Определялись антитела к *Toxocara canis*, *Echinococcus granulosus*, *Trichinella sp.* и *Toxoplasma gondii*. Наиболее часто среди коренного населения встречались антитела к токсоплазме и трихинелле (27,2 и 18,6% соответственно). Сероположительность коррелировала с возрастом, образованием исследуемых и потреблением ими морских млекопитающих и морепродуктов [Goyette et al., 2014]. Таким образом, по различным исследованиям токсоплазмоз является наиболее распространенным протозоозом, поражающим население канадской Арктики [McDonald et al., 1990; Messier et al., 2009], тогда как *Trichinella* и *Echinococcus* являются одними из наиболее распространенных гельминтов [Hotez, 2010].

Широкое использование собак обуславливает риск заражения токсокарозом [Jenkins et al., 2011] и эхинококкозом. Значительная распространенность трихинеллеза и других гельминтозов, передающихся через пищу, – это результат употребления не всегда хорошо прожаренного или проваренного мяса диких животных, как наземных, так и морских млекопитающих (например, моржа), а также рыбы и птиц [Hotez, 2010]. При этом заражение трихинеллезом через мясо самого крупного арктического млекопитающего – белого медведя (*Ursus maritimus*) – происходит довольно редко по сравнению с многочисленными случаями трихинеллеза человека, связанными с потреблением мяса черных (*U. americanus*) или бурых медведей (*U. arctos*). Распространенность *Trichinella* у медведей довольно высока, но у белых медведей по сравнению с другими их видами в мышцах оказывается гораздо меньше личинок. Поэтому белые медведи играют ограниченную роль в передаче трихинеллеза людям, так как местные жители, живущие в Арктике, традици-

онно потребляют хорошо приготовленное медвежье мясо, а путешественники и иностранные охотники имеют ограниченный доступ к этим охраняемым видам [Duroy-Camet et al., 2017].

Формирование очагов трихинеллеза в Арктике у животных, населяющих острова Полярного бассейна, в частности белого медведя и морских млекопитающих, относительно изолированных от материковой зоны, свидетельствует о постоянной циркуляции возбудителя в этой зоне. Из-за того что животные являются объектами промысловой охоты, арктический трихинеллез, несомненно, представляет угрозу для населения данного региона [Успенский, 2007]. Передача инвазии между белыми медведями и морскими млекопитающими, в частности моржами, может осуществляться как путем хищничества, так и при поедании падали, а также предполагается возможность заражения животных через помет хищных птиц, гидробионтов, через трупы ездовых собак, тушки пушных зверей, выброшенных в море. Миграции животных способствуют разносу инвазии на большие расстояния, при этом в паразитарную систему через трофические связи могут вовлекаться и другие представители животного населения Арктики – песцы, лемминги, волки и даже изредка северные олени. Одним из самых зараженных трихинеллами животных считается россомаха вследствие ее предпочтения питаться падалью.

Учитывая, что передача инвазии осуществляется при крайне низких температурах, предполагается, что географический изолят трихинелл, циркулирующий в данном регионе, обладает высокой резистентностью к низким температурам [Успенский, 2007].

Заболееваемость инфекциями, передаваемыми через рыбу, в арктическом регионе невысока, однако в речных бассейнах существуют очаги дифиллоботриозов и описторхоза [Поморцев, 2002; Беэр, 2005; Duroy-Camet, Peduzzi, 2004; Scholz et al., 2009; Pakharukova, Morgvinov, 2016]. Наиболее высокие показатели заболеваемости дифиллоботриозами отмечаются в северных районах Сибири – Якутии, Таймыре, Ямало-Ненецком АО, где в некоторых районах среднегодовое число случаев превышает 1000, а заболеваемость составляет более 150 человек на 100 тыс. населения. В Европейской России наиболее проблемный регион по дифиллоботриозу, вызываемому лентецом широким, – Ненецкий автономный округ, характеризующийся высокой (более 150 на 100 тыс. населения) заболеваемостью [Медиико-географический..., 2017]. Так, доля дифиллоботриоза в структуре паразитарной заболеваемости людей в Ненецком АО в 2013 г. составляла 10,4% [Бобырева и др., 2016].

Подавляющая часть нозоареала кошачьего описторхоза находится на территории России, при этом

наиболее проблемным регионом является Обь-Иртышский бассейн. Описторхоз эндемичен на всей протяженности Оби и Иртыша, включая северные районы, при этом ситуация в Ямало-Ненецком автономном округе считается весьма напряженной [Медиико-географический..., 2017]. Среднегодовая заболеваемость описторхозом в нем составляет 279,8 на 100 тыс. населения. Возбудитель описторхоза является холодоустойчивым организмом и способен проникать далеко на север. Хотя на севере региона популяции промежуточных хозяев описторхоза – моллюсков рода *Codiella* – немногочисленны, они способны поддерживать передачу возбудителя в течение трех летних месяцев [Беэр, 2005].

Клещевые инфекции. Северная граница ареала клещевых инфекций – вирусного клещевого энцефалита (КЭ) и иксодовых клещевых боррелиозов (ИКБ) – в настоящее время проходит за пределами границ Арктики [Медиико-географический..., 2017]. Однако имеются данные о возможном продвижении этих границ на север, поэтому южная часть Арктического региона может попасть в зону потенциального риска передачи этих инфекций. Уже установлено существенное продвижение иксодовых клещей на север Республики Коми и Архангельской области [Tokarevich et al., 2011; Tokarevich et al., 2017]. В Северной Норвегии вирус клещевого энцефалита был обнаружен на широте 65,1° с. ш. [Soleng et al., 2018]. Для территории Швеции достаточно давно было показано существенное продвижение границ ареала клещей на север, увеличение их численности и плотности популяций [Talleklint, Jaenson, 1998].

В странах Северной Европы и в Северной Америке большое внимание уделяется иксодовым клещевым боррелиозам (в Северной Америке это заболевание носит название болезни Лайма). На территории Финляндии исследования видового состава и численности клещей в северной части побережья Ботнического залива вблизи северной границы ареала *I. persulcatus* показали высокую численность таежных клещей и их значительную зараженность боррелиями нескольких видов с часто встречающейся коинфекцией, когда в одном переносчике встречаются несколько видов возбудителя [Pakanen et al., 2020].

В настоящее время риск передачи боррелий в северной Норвегии считается низким, хотя изредка возбудителя изолируют от иксодовых клещей, северная граница ареала которых чуть не доходит до Полярного круга [Hvidsten et al., 2014; Soleng et al., 2017].

Имеются указания на то, что в циркуляции боррелий в природных очагах Северной Европы активное участие принимают морские птицы [Olsen et al., 1995]. Так, боррелии были выделены в се-

верной Норвегии [Larsson et al., 2007] из клещей, собранных в колонии морских птиц на побережье Баренцева моря. Сходные данные были получены и в Северной Америке (Ньюфаундленд, Юкон). При этом указывается, что клещи могут переноситься перелетными птицами довольно далеко на север, включая территории за пределами нозоареала болезни Лайма [Smith et al., 2006], однако их роль в функционировании очагов боррелиозов не выяснена. Представляется важным, что установлен сам факт возможности переноса птицами клещей, в том числе и зараженных боррелиями, на большие расстояния в высокие широты [Scott, 2016].

Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом (ГЛПС). Как и клещевые инфекции, ГЛПС распространена, главным образом, за пределами Арктики [Медико-географический..., 2017]. Однако в последние годы стало появляться много сообщений о вспышках в северных регионах России и Европы, хотя риск заболевания людей не оценивается как высокий [Pettersson et al., 2008; Савицкая и др., 2020]. Возбудителями ГЛПС являются хантавирусы, среди которых наиболее распространенным в Центральной и Северной Европе, а также в России является вирус Пуумала (PUUV). В природе хозяином PUUV является рыжая полевка (*Myodes glareolus*), а передача человеку происходит при вдыхании аэрозолей с экскрементами грызунов.

Влияние климатического фактора на расширение ареалов возбудителей, переносчиков и носителей природноочаговых болезней. Достаточно давно установилось представление о том, что климатические изменения могут приводить к сдвигам границ распространения возбудителей, носителей и переносчиков природноочаговых болезней [Kutz et al., 2005]. Существует опасение, что изменение климата может способствовать пространственно-временному перераспределению целого ряда инфекционных заболеваний. Некоторые авторы называют такие патологии климаточувствительными [Omazic et al., 2019a], определяя их как инфекционные заболевания, которые географически ограничиваются климатическими факторами. Следовательно, они могут менять границы нозоареалов в связи с изменением климата. Общие знания о последствиях изменения климата и стратегиях адаптации возбудителей, переносчиков и носителей болезней значительно расширились за последние годы. Однако все еще существует значительный информационный пробел в знаниях о влиянии изменения климата на инфекционные заболевания и способах выявления его последствий [Omazic et al., 2019b].

За последние несколько десятилетий Арктика существенно прогрелась, значительно опережая другие регионы мира [IPCC..., 2013; Overland et al.,

2017; Ревич, 2020]. Метеорологические параметры, наиболее очевидными из которых являются температура, влажность и колебания продолжительности сезонов, влияют на скорость развития, выживания и размножения возбудителей и переносчиков болезней, а более высокие температуры могут также позволить зараженным носителям инфекций более успешно переживать неблагоприятный период года, тем самым увеличивая численность популяций и расширяя ареал вида. Изменение этих параметров может повлиять на пригодность мест обитания носителей и переносчиков, показатели их воспроизводства, распределение и численность. Таким образом, климатические изменения могут способствовать распространению природноочаговых и других инфекционных заболеваний дальше на север. Однако масштаб этих изменений и их отражение в показателях заболеваемости людей в настоящее время еще не оценены.

Для России, так же как и для других арктических регионов, характерны проблемы, связанные с влиянием изменений климата на здоровье людей. Изменение климата в Российской Арктике более выражено, чем в любой другой части страны. Между 1955 и 2000 гг. среднегодовая температура воздуха на Русском Севере увеличилась на 1,28°C [Revich, Tokarevich, 2012]. Повышение среднегодовых температур и разогрев поверхности привел к увеличению температуры верхнего слоя вечной мерзлоты, что вызвало ее таяние. В связи с изменением климата увеличивается риск возникновения зоонозных инфекционных заболеваний, наиболее важными из которых следует считать клещевой энцефалит, туляремию, бруцеллез, лептоспирозы, бешенство и сибирскую язву.

Климатические изменения могут вызывать различные трансформации паразитарных систем и их отдельных элементов. Реакции на потепление климата имеющихся и вновь возникающих возбудителей в арктических системах можно обобщить следующим образом [Hoberg et al., 2008].

1. Изменения в численности возбудителей и их хозяев:

- увеличение скорости развития для свободноживущих стадий или промежуточных хозяев в результате повышения среднесуточных температур;
- сокращение времени развития возбудителей, например переход от многолетних циклов к однолетним или от однократного к многократному размножению в течение года;
- изменение (увеличение или уменьшение) показателей выживаемости возбудителей, связанное с состоянием окружающей среды;
- увеличение длительности благоприятного сезона для развития и распространения возбудителей

в результате более раннего наступления весны и более позднего – осени.

2. Изменения ареалов возбудителей и их хозяев:

- сдвиги границ ареалов возбудителей и их хозяев, включая широтные и/или высотные смещения;
- расширение ареалов возбудителей и их адаптация к новым видам хозяев;
- изменение фенологии носителей и переносчиков, приводящее к изменениям сроков миграций;
- исчезновение некоторых популяций сочленов паразитарных систем в связи с появлением условий, несовместимых с их существованием.

3. Микроэволюционные ответы:

- локальная адаптация возбудителей к новым хозяевам;
- генетические изменения у возбудителей, появление новых генетических вариантов.

4. Кумулятивные/синергетические ответы:

- разрушение механизмов экологической изоляции, способствующих обмену фауной между прежде изолированными экосистемами;
- усиление эффекта взаимодействия возбудителей и хозяев, влияющее на структуру паразитарных систем;
- географическая мозаичность или появление эфемерных очагов болезней в связи с локальными климатическими флуктуациями.

Для теплокровных животных, их патогенов и членистоногих переносчиков, обитающих в Арктике, достаточно незначительных климатических сдвигов для изменения жизненных циклов и структуры паразитарных систем [Strathdee, Bale, 1998; Hoberg et al., 2008]. Следует отметить, что эти связи часто оказываются очень сложными, и действие климатических и экологических факторов часто усугубляется социально-экономическими причинами [Hedlund et al., 2014].

Можно привести значительное число примеров исследований связи конкретных природноочаговых заболеваний с климатическими факторами.

Туляремия. Как уже указывалось, в Швеции основным путем передачи туляремийного микроба является трансмиссивный [Eliasson, Bäck, 2007]. Подавляющее большинство случаев, передающихся человеку членистоногими, питающимися кровью, происходит в течение летнего сезона и связано с повышением температуры. Поэтому предполагается, что изменение климата может оказывать влияние на численность и местообитание переносчиков. Следовательно, изменения климата, вероятно, могут оказать влияние на характер передачи туляремии.

Для эндемичных по туляремии районов Швеции была построена модель, использующая один из сценариев изменения климата и прогнозирующая возможные вспышки инфекции на основе имеющихся

данных о температурах, критичных для передачи туляремии [Rydén et al., 2009]. Используемый сценарий предполагает увеличение среднемесячных летних температур примерно на 2°C, что приводит к увеличению продолжительности эпидемических вспышек в диапазоне от 3,5 до 6,6 недель между 2010 и 2100 гг. Имеющиеся сценарии не предполагают увеличение уровня осадков, поэтому при этом не стоит ожидать существенного увеличения количества переносчиков. Исходя из предположения, что в передаче туляремии в арктических районах значительную роль играют комары, [Rydén et al., 2012] разработали статистическую модель для исследования взаимосвязи между параметрами окружающей среды, обилием комаров и туляремией в Швеции в 1981–2007 гг. Холодные малоснежные зимы оказались связанными с меньшим количеством случаев туляремии в последующий год, в то время как теплые летние температуры в предыдущем году были связаны с увеличением числа случаев.

Также была предпринята попытка сравнить заболеваемость туляремией в Швеции со значениями индекса североатлантической осцилляции (NAO) [Palo et al., 2005]. Низкие значения этого индекса, указывающие на холодные зимы и малый расход воды в реках в течение предстоящего лета, были связаны с большим количеством случаев заболевания человека туляремией через два года. При этом не удалось установить корреляцию численности зайца-беляка (одного из наиболее чувствительных к возбудителю туляремии видов млекопитающих) ни со случаями туляремии, ни со значениями индекса NAO. Поэтому причинно-следственную связь в этом случае установить не удалось, и авторы в целом не ожидают, что возможное увеличение индекса NAO при будущем более теплом климате обусловит более высокую частоту вспышек туляремии в Швеции.

Сибирская язва. Влияние повышения температуры на возможность реактивации очагов сибирской язвы исследовалось в различных северных регионах. Следует отметить, что, как и для большинства других природноочаговых болезней, непосредственное воздействие климатических параметров на возбудителей не является единственной причиной происходящих изменений эпидемиологической обстановки. В случае сибирской язвы, климатический фактор может оказывать влияние на распределение скота, биоразнообразие копытных и почвенно-водный баланс в зонах существования сибирязвенных захоронений [Walsh et al., 2018].

Относительно теплый летний период создает подходящие условия для размножения и распространения возбудителя сибирской язвы. В 2016 г. в ЯНАО произошла крупнейшая за последние 30 лет

эпизоотия сибирской язвы в России. В результате контактов с больными животными заболело 36 человек [Попова и др., 2016]. Предполагается, что одной из причин вспышки послужила аномально высокая дневная температура воздуха (29–34°C), что способствовало увеличению глубины сезонного таяния многолетней мерзлоты и перемещению спор сибиреязвенного микроба из глубинных слоев к поверхности почвы с межмерзлотными водами. Увеличение численности кровососущих насекомых, а также негативное воздействие жары на иммунную систему оленей на фоне прекращения вакцинации, очевидно, стали причиной массового заболевания северных оленей сибирской язвой. Таким образом, во многих случаях климатические изменения являются не единственной причиной возникновения эпидемий, однако очень часто являются их пусковым механизмом.

Лептоспирозы. Моделирование распространения лептоспирозов домашнего скота и диких животных было проведено методом экологической ниши на основе распространения случаев лептоспирозов домашнего скота и диких животных для территории Якутии [Zakharova et al., 2020]. Использован набор ландшафтных, климатических и социально-экономических переменных как для текущего, так и для прогнозируемого на 2041–2060 гг. климата. Модель показала, что наиболее важными факторами, влияющими на распространение лептоспирозов, были средняя температура самого теплого квартала, среднесуточная температура, тип земного покрова и высота над уровнем моря. Проведенное районирование территории показало, что в настоящее время северные районы Якутии находятся в зоне низкого риска, однако в некоторых из них, в соответствии со сценарием потепления климата, к 2060 г. прогнозируется повышение эпидемической опасности.

Клещевые инфекции. В последние десятилетия в ряде субарктических стран наблюдается рост заболеваемости клещевым энцефалитом (КЭ). Связь между климатическими факторами и распространением клещевого энцефалита была показана на примере многих исследований. На территории Швеции вблизи северной границы ареала КЭ [Lindgren, Gustafson, 2001] оценена связь некоторых метеорологических параметров с распространением КЭ. Методом множественной регрессии установлено, что повышенная заболеваемость КЭ была связана с двумя последовательными мягкими зимними сезонами, температурами, благоприятствующими раннему весеннему развитию и более продолжительной осенней активностью клещей в предыдущем году. Полученные данные указывают на то, что увеличение заболеваемости КЭ с середины 1980-х гг. связано с изменением в сторону более мягкой зимы

и раннего наступления весны. Возможно, на заболеваемость повлияли также и другие факторы, например увеличение численности населения в эндемичных районах и популяций животных-хозяев.

Для Архангельской области установлен рост заболеваемости клещевым энцефалитом в первое десятилетие XXI в. [Tokarevich et al., 2011]. Рост заболеваемости в 50 раз по сравнению с 1980–1989 гг. связывают с экспансией на север таежного клеща *Ixodes persulcatus* – основного переносчика вируса клещевого энцефалита, что, вероятно, могло быть связано с повышением как средней годовой температуры воздуха, так и температуры в период активности клещей.

Сходные результаты получены для Республики Коми, где был показан значительный рост распространенности вируса клещевого энцефалита в клещах за период с 1998 по 2011 г., и параллельный 23-кратный рост заболеваемости клещевым энцефалитом среди населения Республики Коми [Tokarevich et al., 2017]. При этом отмечен сдвиг числа зарегистрированных укусов клещей на север и увеличение сезона их активности с четырех до шести месяцев. Авторы связывают это с климатическими изменениями и указывают на значительную корреляцию между изменением температуры воздуха и заболеваемостью клещевым энцефалитом как в Архангельской области, так и в Республике Коми. Несмотря на то что в указанных работах рассматривалось ограниченное число факторов, могущих оказывать влияние на увеличение заболеваемости (инфицированность клещей вирусом КЭ, частота укусов клещей и такие метеорологические параметры, как среднегодовые температуры воздуха и количество осадков), довольно высокий коэффициент корреляции между показателями температуры и заболеваемости КЭ указывает на возможную связь между этими показателями. В целом для территории России отмечается некоторый сдвиг северной границы распространения иксодовых клещей, что подтверждается как их полевыми находками, так и участвовавшими обращениями населения в связи с полученными укусами [Revich et al., 2012].

Исследование, проведенное в Канаде в отношении боррелиозов, показало продвижение на север границы ареала белоногого хомячка (*Peromyscus leucopus*) – одного из главных резервуарных хозяев *Borrelia burgdorferi*, вызывающего в Северной Америке болезнь Лайма [Roy-Dufresne et al., 2013]. При помощи метода моделирования экологической ниши были определены климатические факторы, связанные со сдвигом распределения белоногого хомячка за последние 30 лет на северной периферии его ареала, и смоделировано текущее и прогнозируемое к 2050 г. распространение. Мягкая и более

короткая зима способствует продвижению животных на север. По прогнозам к 2050 г. граница ареала отодвинется еще на 3° широты, вплотную приблизившись к границе Арктики. Уже в настоящее время в регионах, где появился этот вид, увеличилась заболеваемость болезнью Лайма. Поэтому изменение ареала белоногого хомячка, как предполагается, может изменить и ареал *B. burgdorferi*, что повлияет на здоровье населения в северных регионах, которые еще не были подвержены болезни Лайма.

Сходные результаты были получены другой группой исследователей [Simon et al., 2014], которые рассматривали изменение ареала белоногого хомячка параллельно с продвижением на север искомого клеща *I. scapularis*. Прогнозируется к 2050 г. дальнейшее распространение *B. burgdorferi* примерно на 250–500 км со скоростью 3,5–11 км/год.

В Канаде для изучения потенциального распространения клеща *I. scapularis* на север, связанного с изменением климата, была предложена модель, основанная на нескольких существовавших на время подготовки публикации сценариях изменения климата [Ogden et al., 2006]. В рамках глобальных климатических моделей (канадской CGCM2 и британской HadCM3) рассматривались возможные изменения сумм активных температур за период выше 0°C, т. е. время активности клещей. Результаты моделирования показали возможность смещения северной границы распространения *I. scapularis* на север примерно на 200 км к 2020-м гг. и на 1000 км к 2080-м гг. Таким образом, на основе проведенного моделирования можно было предполагать, что фактическое расширение ареала *I. scapularis* может быть обнаружено в течение следующих двух десятилетий. Сезонная активность клещей в сценариях изменения климата соответствовала поддержанию эндемических циклов возбудителя болезни Лайма в новых популяциях клещей. Поэтому географический ареал болезней, переносимых *I. scapularis*, может значительно расшириться на север в результате изменения климата в этом столетии.

Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом. Попытки связать колебания численности носителей болезней с климатическими факторами предпринимались и для других природноочаговых инфекций, таких как геморрагическая лихорадка с почечным синдромом (ГЛПС). Исследование распространения хантавируса PUUV в Норвегии показало, что для него характерны значительные сезонные и географические вариации, а также была обнаружена связь между плотностью популяции рыжих полевок и заболеваемостью людей [Milhano et al., 2017].

Крупная эпидемия ГЛПС на севере Швеции в 2007 г. (488 случаев, или 313 на 100 тыс. населения) показала, как природноочаговое заболевание

может внезапно привести к неожиданной и крупной вспышке болезни среди людей [Pettersson et al., 2008]. По всей видимости, возникновению эпидемии способствовали рост численности грызунов, более мягкая зимняя погода и слабый снежный покров. Несмотря на то что из-за недостаточного количества случаев заболевания статистическую связь подтвердить не удалось, авторы высказывают предположение о том, что климатический фактор мог играть в возникновении этой вспышки существенную роль, оказав влияние на размножение рыжей полевки.

Попытки установить корреляционную связь между климатическими параметрами и ГЛПС предпринимались неоднократно и другими исследователями. Так как известно, что для распространения хантавируса PUUV наиболее важным фактором является численность рыжей полевки, было предложено использовать анализ временных рядов для исследования взаимосвязи между эпидемией ГЛПС, индексом НАО (индекс североатлантической осцилляции, используемый в качестве прокси-фактора для оценки изменчивости климата) и динамикой популяций рыжих полевок в северной Швеции в 1959–1975 и 1985–2006 гг. [Palo, 2009]. Однако такая связь установлена не была, несмотря на включение в расчеты более длительных периодов исследования, которые могут выявлять долгосрочные тенденции, но не исследуют влияние отдельных переменных погоды, таких как температура или осадки.

ВЫВОДЫ

Природноочаговые болезни играют одну из ключевых ролей в формировании уровня здоровья населения Арктики, проживающего в существенно отличающейся от более южных территорий физической и социальной среде. Среди природных факторов, влияющих на здоровье населения северных регионов, ведущую роль играет климат, оказывающий существенное, а иногда определяющее влияние на формирование ареалов возбудителей, переносчиков и носителей природноочаговых болезней. Климатический фактор можно рассматривать как один из основных в формировании специфической медико-географической обстановки в северных регионах. Одним из наиболее интенсивно обсуждаемых вопросов распространения инфекционных и паразитарных болезней арктических и субарктических регионов является влияние потепления климата на фоне все большего накопления научных данных об опережающем другие регионы мира прогреве территории Арктики.

Можно предположить, что в связи с изменениями климата наиболее интенсивно будут продвигаться на север клещевые инфекции вслед за расширением

ареалов переносчиков и теплокровных носителей. Кроме того, не исключены новые вспышки туляремии, вызванные высокой численностью переносчиков (комаров и слепней), а также реактивация очагов сибирской язвы из-за деградации вечной мерзлоты и вытаивания скотомогильников.

Обобщение данных по болезням и патологиям арктического населения показало, что наиболее уязвимыми являются группы, которые живут в от-

даленных районах, где адаптация к климатическим изменениям является наиболее сложной из-за недостаточной экономической поддержки или отсутствия инфраструктуры.

В целом отмечается недостаточное количество исследований, рассматривающих распространение природноочаговых болезней в условиях меняющейся окружающей среды, в первую очередь именно для наиболее отдаленных регионов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 18-05-60037); в рамках ГЗ 121051100137-4 «Пространственно-временная организация экосистем в условиях изменений окружающей среды» и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безр С.А. Биология возбудителя описторхоза. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2005. 336 с.
- Бобырева Н.С., Корнеева Я.А., Дегтева Г.Н. Анализ заболеваемости паразитозами в Ненецком автономном округе // Гигиена и санитария. 2016. № 2. С. 157–162.
- Ватлина Т.В., Тимонин С.А., Малхазова С.М. Пространственный анализ сферы медицинского обслуживания в Арктической зоне Российской Федерации // Природа и общество: в поисках гармонии. 2019. № 5. С. 32–44.
- Дударев А.А., Горбанев С.А., Фридман К.Б. Сотрудничество ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» в рамках международных проектов в области гигиены окружающей среды Арктики // Гигиена и санитария. 2017. № 96(7). С. 601–606. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-7-601-606.
- Кершенгольц Б.М., Чернявский В.Ф., Репин В.Е., Никифоров О.И., Софронова О.Н. Влияние глобальных климатических изменений на реализацию потенциала инфекционных заболеваний населения в Российской Арктике (на примере Якутии). Обзор // Экология человека. 2009. № 6. С. 34–39.
- Кудрявцева Т.Ю., Попов В.П., Мокриевич А.Н., Мазепа А.В., Окунев Л.П., Холин А.В., Куликалова Е.С., Храмов М.В., Дятлов И.А., Транквилевский Д.В. Эпидемиологический и эпизоотологический анализ ситуации по туляремии в Российской Федерации в 2016 г., прогноз на 2017 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2017. № 2.
- Лайшев К.А., Забродин В.А., Прокудин А.В., Самандас А.М. Оценка эпизоотической ситуации в популяциях диких северных оленей Арктической зоны РФ (обзор литературы) // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2015. № 4(28). С. 38–44.
- Медико-географический атлас России «Природноочаговые болезни» / под ред. С.М. Малхазовой / Т.В. Ватлина, Т.В. Котова, С.М. Малхазова и др., 2-е изд. М.: Географический факультет МГУ, 2017. 216 с.
- Попова А.Ю., Демина Ю.В., Ежлова Е.Б., Куличенко А.Н., Рязанова А.Г., Малеев В.В., Плоскирева А.А., Дятлов И.А., Тимофеев В.С., Нечепуренко Л.А., Харьков В.В. Вспышка сибирской язвы в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 году, эпидемиологические особенности // Проблемы особо опасных инфекций. 2016. № 4. С. 42–46. DOI: 10.21055/0370-1069-2016-4-42-46.
- Ревич Б.А. Риски здоровья населения при изменении климата Арктического макрорегиона // Науч. тр.: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2020. № 18. С. 395–408.
- Савицкая Т.А., Иванова А.В., Исаева Г.Ш., Решетникова И.Д., Трифонов В.А., Зиятдинов В.Б., Серова И.В., Сафронов В.А. Оценка эпидемиологической ситуации по геморрагической лихорадке с почечным синдромом в мире и России, прогноз на 2020 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2020. № 2. С. 62–70.
- Сидоров Г.Н., Полещук Е.М., Сидорова Д.Г. Природные очаги бешенства в России в XX – начале XXI веков // Ветеринарная патология. 2004. № 3(10). С. 86–101.
- Токаревич Н.К., Стоянова Н.А. Эпидемиологические аспекты антропогенного влияния на эволюцию лептоспирозов // Инфекция и иммунитет. 2011. № 1(1). С. 67–76.
- Desvars A., Furberg M., Hjertqvist M., Vidman L., Sjöstedt A., Rydén P., Johansson A. Epidemiology and Ecology of Tularemia in Sweden, 1984–2012. *Emerging Infectious Diseases*, 2015, vol. 2, no. 1, p. 32–39, DOI: 10.3201/eid2101.140916.
- Dupouy-Camet J., Bourée P., Yera H. Trichinella and polar bears: A limited risk for humans, *Journal of Helminthology*, 2017, vol. 9, no. 4, p. 440–446, DOI: 10.1017/S0022149X17000219.
- Eliasson H., Bäck E. Tularaemia in an emergent area in Sweden: An analysis of 234 cases in five years. *Scandinavian Journal of Infectious Diseases*, 2007, vol. 39, no. 10, p. 880–889, DOI: 10.1080/00365540701402970.
- Goyette S., Cao Z., Libman M., Ndao M., Ward B.J. Sero-prevalence of parasitic zoonoses and their relationship with social factors among the Canadian Inuit in Arctic regions, *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 2014, vol. 78, no. 4, p. 404–410, DOI: 10.1016/j.diagmicrobio.
- Hansen C.M., Vogler A.J., Keim P., Wagner D.M., Hueffer K. Tularemia in Alaska, 1938–2010, *Acta veterinaria Scandinavica*, 2011, vol. 53, no. 1, p. 61, DOI: 10.1186/1751-0147-53-61.

- Hedlund C., Blomstedt Y., Schumann B. Association of climatic factors with infectious diseases in the Arctic and subarctic region – a systematic review, *Global Health Action*, 2014, no. 7, p. 24161, DOI: 10.3402/gha.v7.24161.
- Hoberg E.P., Polley L., Jenkins E.J., Kutz S.J., Veitch A.M., Elkin B.T. Integrated approaches and empirical models for investigation of parasitic diseases in northern wildlife *Emerging Infectious Diseases*, 2008, vol. 14, no. 1, p. 10–17, DOI: 10.3201/eid1401.071119.
- Hotez P.J. Neglected Infections of Poverty among the Indigenous Peoples of the Arctic. *PLoS Negl Trop Dis*, 2010, vol. 4, no. 1, p. e606, DOI: 10.1371/journal.pntd.0000606.
- Hueffer K., Parkinson A.J., Gerlach R., Berner J. Zoonotic infections in Alaska: disease prevalence, potential impact of climate change and recommended actions for earlier disease detection, research, prevention and control, *International Journal of Circumpolar Health*, 2013, vol. 72, no. 1, DOI: 10.3402/ijch.v72i0.19562.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, 2013, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Kutz S.J., Hoberg E.P., Polley L., Jenkins E.J. Global warming is changing the dynamics of Arctic host-parasite systems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, vol. 272, no. 1581, p. 2571–2576.
- Larsson C., Comstedt P., Olsen B., Bergström S. First record of Lyme disease *Borrelia* in the Arctic. *Vector Borne Zoonotic Diseases*, 2007, vol. 7, no. 3, p. 453–256, DOI: 10.1089/vbz.2006.0644.
- Lindgren E., Gustafson R. Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change, *Lancet*, 2001, Jul 7, vol. 358, no. 9275, p. 16-8, DOI: 10.1016/S0140-6736(00)05250-8.
- Lindhusen Lindhé E., Hjertqvist M., Wahab T. Outbreak of tularaemia connected to a contaminated well in the Västra Götaland region in Sweden, *Zoonoses and Public Health*, 2017, vol. 65, no. 1, DOI: 10.1111/zph.12382.
- Malkhazova S., Pestina P., Prasolova A., Orlov D. Emerging natural focal infectious diseases in Russia: A medical-geographical study, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, no. 21.
- Milhano N., Korlund L., Evander M., Ahlm C., Vainio K., Dudman S., Andreassen A.K. Circulation and diagnostics of Puumala virus in Norway: Nephropatia epidemica incidence and rodent population dynamics. *APMIS: acta pathologica, microbiologica, et immunologica Scandinavica*, 2017, no. 125, DOI: 10.1111/apm.12712.
- Mørk T., Prestrud P. Arctic rabies – a review. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2004, vol. 45, no. 1–2, p. 1–9, DOI: 10.1186/1751-0147-45-1.
- New D., Elkin B., Armstrong T., Epp T. Anthrax in the Mackenzie wood bison (*Bison bison athabasca*) population: 2012 anthrax outbreak and historical exposure in nonoutbreak years, *Journal of Wildlife Diseases*, 2017, vol. 53, no. 4, p. 769–780, DOI: 10.7589/2016-11-257.
- Ogden N.H., Maarouf A., Barker I.K., Bigras-Poulin M., Lindsay L.R., Morshed M.G., O'Callaghan C.J., Ramay F., Waltner-Toews D., Charron D.F. Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada, *International Journal for Parasitology*, 2006, vol. 36, no. 1, p. 63–70, DOI: 10.1016/j.ijpara.2005.08.016.
- Olsen B., Duffy D.C., Jaenson T.G., Gylfe Å., J Bonnedahl J., Bergström S. Transhemispheric exchange of Lyme disease spirochetes by seabirds, *Journal of Clinical Microbiology*, 1995, vol. 33, p. 3270–3274.
- Omazic A., Bylund H., Boqvist S., Högberg A., Björkman C., Tryland M., Evengård B., Koch A., Berggren C., Malogolovkin A., Kolbasov D., Pavelko N., Thierfelder T., Albiñ A. Identifying climate-sensitive infectious diseases in animals and humans in Northern regions, *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2019a, vol. 61, p. 61–53, DOI: 10.1186/s13028-019-0490-0.
- Omazic A., Berggren C., Thierfelder T., Koch A., Evengård B. Discrepancies in data reporting of zoonotic infectious diseases across the Nordic countries – a call for action in the era of climate change, *International Journal of Circumpolar Health*, 2019b, vol. 78, 1601991, DOI: 10.1080/22423982.2019.1601991.
- Pakanen V.M., Sormunen J.J., Sippola E., Blomqvist D., Kallio E.R. Questing abundance of adult taiga ticks *Ixodes persulcatus* and their *Borrelia* prevalence at the north-western part of their distribution, *Parasites and Vectors*, 2020, vol. 13, no. 1, p. 384, DOI: 10.1186/s13071-020-04259-z.
- Pakharukova M.Y., Mordvinov V.A. The liver fluke *Opisthorchis felinus*: biology, epidemiology and carcinogenic potential. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 2016, vol. 110, no. 1, p. 28–36, DOI: 10.1093/trstmh/trv085, PMID: 26740360.
- Palo R.T. Time series analysis performed on nephropatia epidemica in humans of northern Sweden in relation to bank vole population dynamic and the NAO index, *Zoonoses and Public Health*, 2009, vol. 56, no. 150, p. 6.
- Palo R., Ahlm C., Tärnvik A. Climate variability reveals complex events for tularemia dynamics in man and mammals, *Ecology and Society*, 2005, vol. 10, no. 1, p. 22.
- Parkinson A.J., Evengard B., Semenza J.C., Ogden N., Børresen M.L., Berner J., Brubaker M., Sjöstedt A., Evander M., Hondula D.M., Menne B., Pshenichnaya N., Gounder P., Larose T., Revich B., Hueffer K., Albiñ A. Climate change and infectious diseases in the Arctic: establishment of a circumpolar working group, *International Journal of Circumpolar Health*, 2014, vol. 73, iss. 1, p. 25163, DOI: 10.3402/ijch.v73.25163.
- Petersson L., Boman J., Juto P., Evander M., Ahlm C. Outbreak of Puumala virus infection, Sweden, *Emerging Infectious Diseases*, 2008, vol. 14, no. 5, p. 808–810, DOI: 10.3201/eid1405.071124.
- Revich B.A., Tokarevich N.K., Parkinson A.J. Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic [Assessment of the epidemiological situation for hemorrhagic fever with renal syndrome in the world and in Russia, forecast for 2020], *International Journal of Circumpolar Health*, 2012, vol. 71, p. 18792, DOI: 10.3402/ijch.v71i0.18792.
- Roy-Dufresne E., Logan T., Simon J.A., Chmura G.L., Millien V. Poleward Expansion of the White-Footed Mouse (*Peromyscus leucopus*) under Climate Change: Implications for the Spread of Lyme Disease, *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 11, p. e80724, DOI: 10.1371/journal.pone.0080724.
- Rydén P., Bjork R., Schafer M.L., Lundstrom J.O., Petersen B., Lindblom A., Forsman M., Sjöstedt A., Johansson A. Outbreaks of tularemia in a boreal forest region depends on mosquito prevalence, *Journal of Infectious Diseases*, 2012, vol. 205, p. 297–304.

- Rydén P., Sjöstedt A., Johansson A. Effects of climate change on tularaemia disease activity in Sweden, *Global Health Action*, 2009, vol. 2, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2063.
- Salb A., Stephen C., Ribble C., Elkin B. Descriptive epidemiology of detected anthrax outbreaks in wild wood bison (*Bison bison athabasca*) in northern Canada, 1962–2008, *Journal of Wildlife Diseases*, 2014, vol. 50, no. 3, p. 459–468, DOI: 10.7589/2013-04-095.
- Scott J.D. Studies abound on how far north Ixodes scapularis ticks are transported by birds, *Ticks and Tick-Borne Diseases*, 2016, vol. 7, no. 2, p. 327–328, DOI: 10.1016/j.ttbdis.2015.12.001.
- Simon J.A., Marrotte R.R., Desrosiers N., Fiset J., Gaitan J., Gonzalez A., Koffi J.K., Lapointe F.J., Leighton P.A., Lindsay L.R., Logan T., Milord F., Ogden N.H., Rogic A., Roy-Dufresne E., Suter D., Tessier N., Millien V. Climate change and habitat fragmentation drive the occurrence of *Borrelia burgdorferi*, the agent of Lyme disease, at the northeastern limit of its distribution, *Evolutionary Applications*, 2014, vol. 7, no. 7, p. 750–764, DOI: 10.1111/eva.12165.
- Smith R.P.Jr., Muzaffar S.B., Lavers J., Lacombe E.H., Cahill B.K., Lubelczyk C.B., Kinsler A., Mathers A.J., Rand P.W. *Borrelia garinii* in seabird ticks (*Ixodes uriae*), Atlantic Coast, North America, *Emerging Infectious Diseases*, 2006, vol. 12, no. 12, p. 1909–1912, DOI: 10.3201/eid1212.060448.
- Soleng A., Edgar K.S., Paulsen K.M., Pedersen B.N., Okbaldet Y.B., Skjetne I.E.B., Gurung D., Vikse R., Andreassen Å.K. Distribution of *Ixodes ricinus* ticks and prevalence of tick-borne encephalitis virus among questing ticks in the Arctic Circle region of northern Norway, *Ticks and Tick Borne Diseases*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 97–103, DOI: 10.1016/j.ttbdis.2017.10.002.
- Sonne C., Andersen-Ranberg E., Rajala E.L., Agerholm J.S., Bonfeld-Jørgensen E., Desforges J.P., Eulaers I., Jensen B.M., Koch A., Rosing-Asvid A., Siebert U., Tryland M., Mulvad G., Härkönen T., Acquarone M., Nordøy E.S., Dietz R., Magnusson U. Seroprevalence for *Brucella* spp. in Baltic ringed seals (*Phoca hispida*) and East Greenland harp (*Pagophilus groenlandicus*) and hooded (*Cystophora cristata*) seals, *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2018, vol. 198, p. 14–18, DOI: 10.1016/j.vetimm.2018.02.005.
- Strathdee A.T., Bale J.S. Life on the edge: insect ecology in arctic environments, *Annual Review of Entomology*, 1998, vol. 43, p. 85–106.
- Tälleklint L., Jaenson T. Increasing Geographical Distribution and Density of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) in Central and Northern Sweden, *Journal of medical entomology*, 1998, vol. 35, iss. 4, p. 521–526, DOI: 10.1093/jmedent/35.4.521.
- Tokarevich N., Tronin A., Gnativ B., Revich B., Blinova O., Evengard B. Impact of air temperature variation on the ixodid ticks habitat and tick-borne encephalitis incidence in the Russian Arctic: the case of the Komi Republic, *International Journal of Circumpolar Health*, 2017, vol. 76, no. 1, 1298882. 13 p., DOI: 10.1080/22423982.2017.1298882.
- Tokarevich N.K., Tronin A.A., Blinova O.V., Buzinov R.V., Boltenev V.P., Yurasova E.D., Nurse J. The impact of climate change on the expansion of *Ixodes persulcatus* habitat and the incidence of tick-borne encephalitis in the north of European Russia, *Global Health Action*, 2011, vol. 4, 8448, DOI: 10.3402/gha.v4i0.8448.
- Tomaselli M., Elkin B., Kutz S., M., Elkin B., Kutz S., Harms N.J., Ingebjørg Nymo H., Davison T., Leclerc L.M., Branigan M., Dumond M., Tryland M., Checkley S. A Transdisciplinary Approach to *Brucella* in Muskoxen of the Western Canadian Arctic 1989–2016, *Ecohealth*, 2019, vol. 16, no. 3, p. 488–501, DOI: 10.1007/s10393-019-01433-3.
- Walsh M.G., Smalen de A.W., Mor S.M. Climatic influence on anthrax suitability in warming northern latitudes, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, 9269, DOI: 10.1038/s41598-018-27604-w.
- Zakharova O.I., Korennoy F.I., Toropova N.N., Burova O.A., Blokhin A.A. Environmental Risk of Leptospirosis in Animals: The Case of the Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation, *Pathogens*, 2020, vol. 9, p. 504, DOI: 10.3390/pathogens9060504.

Электронные ресурсы

- eLibrary.ru. Научная электронная библиотека. URL: <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp> (дата обращения 13.03.2021).
- Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения 10.03.2021).
- Pubmed.gov. National Library of Medicine. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> (дата обращения 03.03.2021).
- ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 28.02.2021).
- Overland J.E., Hanna E., Hanssen-Bauer I., Kim S.-J., Walsh J.E., Wang M., Bhatt U.S., Thoman R.L. Surface Air Temperature, Arctic Report: Update for 2017. URL: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/> Surface-Air-Temperature (дата обращения 10.05.2020).

Поступила в редакцию 05.04.2021

После доработки 22.06.2021

Принята к публикации 27.07.2021

NATURAL FOCAL DISEASES IN THE ARCTIC UNDER CHANGING CLIMATE

S.M. Malkhazova¹, V.A. Mironova², I.Kh. Bashmakova³¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography, Professor, Head of Department, D.Sc. in Geography; e-mail: sveta_geo@mail.ru² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: mironova.va@gmail.com³ Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR), University of Helsinki, University Researcher; e-mail: iryna.bashmakova@helsinki.fi

The review of 55 publications focuses on the problem of the spread of natural focal diseases in the Arctic region under the global climate change. The influence of factors of a changing environment on the functioning of the foci of natural focal diseases in the Arctic regions of Russia, Europe and North America is considered, as well as the issues of the northward shift of the areas of pathogens, their carriers and vectors in connection with climate warming, and the examples of outbreaks of natural focal diseases in the Arctic regions are given. The articles were selected on the Pubmed, ScienceDirect, e-Library and Cyberleninka platforms. The analysis of publications made it possible to identify 18 natural focal diseases, the most significant for the Russian and foreign Arctic. A survey of distribution in Russia and other countries with Arctic territories was carried out for ten of them. It might be supposed that tick-borne infections will move most intensively to the north under climate changes, following the expansion of vectors and warm-blooded carriers. In addition, new outbreaks of tularemia caused by high numbers of vectors (mosquitoes and horseflies) could not be excluded, as well as the reactivation of anthrax foci due to the degradation of permafrost and thawing of cattle burial grounds. Summarizing the data on diseases and pathologies of the Arctic population showed that the most vulnerable groups are those who live in remote areas, where adaptation to climate change is most difficult due to insufficient economic support or lacking infrastructure. In general, there are a limited number of studies considering the spread of natural focal diseases under the changing environment, particularly for the most remote regions.

Keywords: zoonoses, environmental factors, global climate change

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60037). The research was carried out under the State Task 121051100137-4 “Spatio-temporal organization of ecosystems under environmental changes” and the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change”.

REFERENCES

- Be'er S.A. *Biologiya vozbuditelya opisthorkhoza* [Biology of the causative agent of opisthorchiasis], Moscow, Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK Publ., 2005, 336 p. (In Russian)
- Bobyreva N.S., Korneeva Ya.A., Degteva G.N. Analiz zabolevaemosti parazitozami v Nenetskom avtonomnom okruge [Analysis of the incidence of parasitoses in the Nenets Autonomous Okrug], *Gigiena i sanitariya*, 2016, no. 2, p. 157–162. (In Russian)
- Desvars A., Furberg M., Hjertqvist M., Vidman L., Sjöstedt A., Rydén P., Johansson A. Epidemiology and Ecology of Tularemia in Sweden, 1984–2012, *Emerging Infectious Diseases*, 2015, vol. 2, no. 1, p. 32–39, DOI: 10.3201/eid2101.140916.
- Dudarev A.A., Gorbanev S.A., Fridman K.B. Sotrudnichestvo FBUN “Severo-Zapadnyj nauchnyj tsentr gigieny i obshchestvennogo zdorovya” v ramkah mezhdunarodnyh proektov v oblasti gigieny okruzhayushchey sredy Arktiki [Cooperation of the FBSI “North-West Scientific Center for Hygiene and Public Health” in the framework of international projects in the field of environmental hygiene in the Arctic], *Gigiena i sanitariya*, 2017, vol. 96, no. 7, p. 601–606, DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-7-601-606. (In Russian)
- Dupouy-Camet J., Bourée P., Yera H. Trichinella and polar bears: A limited risk for humans, *Journal of Helminthology*, 2017, vol. 9, no. 4, p. 440–446, DOI: 10.1017/S0022149X17000219.
- Eliasson H., Bäck E. Tularaemia in an emergent area in Sweden: An analysis of 234 cases in five years, *Scandinavian Journal of Infectious Diseases*, 2007, vol. 39, no. 10, p. 880–889, DOI: 10.1080/00365540701402970
- Goyette S., Cao Z., Libman M., Ndao M., Ward B.J. Sero-prevalence of parasitic zoonoses and their relationship with social factors among the Canadian Inuit in Arctic regions, *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 2014, vol. 78, no. 4, p. 404–410, DOI: 10.1016/j.diagmicrobio.
- Hansen C.M., Vogler A.J., Keim P., Wagner D.M., Hueffer K. Tularemia in Alaska, 1938–2010, *Acta veterinaria Scandinavica*, 2011, vol. 53, no. 1, p. 61, DOI: 10.1186/1751-0147-53-61.
- Hedlund C., Blomstedt Y., Schumann B. Association of climatic factors with infectious diseases in the Arctic and subarctic region – a systematic review, *Global Health Action*, 2014, no. 7, p. 24161, DOI: 10.3402/gha.v7.24161.
- Hoberg E.P., Polley L., Jenkins E.J., Kutz S.J., Veitch A.M., Elkin B.T. Integrated approaches and empirical models for investigation of parasitic diseases in northern wildlife *Emerging Infectious Diseases*, 2008, vol. 14, no. 1, p. 10–17, DOI: 10.3201/eid1401.071119.

- Hotez P.J. Neglected Infections of Poverty among the Indigenous Peoples of the Arctic, *PLoS Negl Trop Dis*, 2010, vol. 4, no. 1, p. e606, DOI: 10.1371/journal.pntd.0000606.
- Hueffer K., Parkinson A.J., Gerlach R., Berner J. Zoonotic infections in Alaska: disease prevalence, potential impact of climate change and recommended actions for earlier disease detection, research, prevention and control, *International Journal of Circumpolar Health*, 2013, vol. 72, no. 1, DOI: 10.3402/ijch.v72i0.19562.
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, 2013, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Kershengots B.M., Chernyavskiy V.F., Repin V.E., Nikiforov O.I., Sofronova O.N. Vliyaniye global'nykh klimaticheskikh izmeneniy na realizatsiyu potentsiala infektsionnykh zabolevaniy naseleniya v Rossijskoj Arktike (na primere Yakutii). Obzor [The impact of global climate change on the realization of the potential of infectious diseases of the population in the Russian Arctic (the example of Yakutia). Overview], *Ekologiya cheloveka*, 2009, no. 6, p. 34–39. (In Russian)
- Kudryavtseva T.Yu., Popov V.P., Mokrievich A.N., Mazeпа A.V., Okunev L.P., Kholin A.V., Kulikalova E.S., Khramov M.V., Dyatlov I.A., Trankvilevskiy D.V. Epidemiologicheskii i epizootologicheskii analiz situatsii po tulyaremii v Rossiyskoy Federatsii v 2016 g., prognoz na 2017 g. [Epidemiological and epizootic analysis of the tularemia situation in the Russian Federation in 2016, forecast for 2017], *Problemy osobo opasnykh infektsiy*, 2017, no. 2. (In Russian)
- Kutz S.J., Hoberg E.P., Polley L., Jenkins E.J. Global warming is changing the dynamics of Arctic host-parasite systems, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, vol. 272, no. 1581, p. 2571–2576.
- Larsson C., Comstedt P., Olsen B., Bergström S. First record of Lyme disease *Borrelia* in the Arctic, *Vector Borne Zoonotic Diseases*, 2007, vol. 7, no. 3, p. 453–256, DOI: 10.1089/vbz.2006.0644.
- Layshev K.A., Zabrodin V.A., Prokudin A.V., Samandas A.M. Otsenka epizooticheskoy situatsii v populyatsiyah dikih severnykh oleney Arkticheskoy zony RF (obzor literatury) [Assessment of the epizootic situation in wild reindeer populations within the Arctic zone of the Russian Federation (literature review)], *Aktualnye voprosy veterinarnoy biologii*, 2015, vol. 4, no. 28. (In Russian)
- Lindgren E., Gustafson R. Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change, *Lancet*, 2001, Jul 7, vol. 358, no. 9275, p. 16–8, DOI: 10.1016/S0140-6736(00)05250-8.
- Lindhusen Lindhé E., Hjertqvist M., Wahab T. Outbreak of tularaemia connected to a contaminated well in the Västra Götaland region in Sweden, *Zoonoses and Public Health*, 2017, vol. 65, no. 1, DOI: 10.1111/zph.12382.
- Malkhazova S., Pestina P., Prasolova A., Orlov D. Emerging natural focal infectious diseases in Russia: A medical-geographical study, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, no. 21. *Mediko-geograficheskii atlas Rossii Prirodnoochagovye bolezni*, 2-e izdanie [Medico-geographical atlas of Russia Natural focal diseases, 2nd edition], ed. by S.M. Malkhazova, T.V. Vatlina, T.V. Kotova, S.M. Malkhazova et al., Moscow, Geograficheskij fakul'tet MGU, 2017, 216 p. (in Russian)
- Milhano N., Korslund L., Evander M., Ahlm C., Vainio K., Dudman S., Andreassen A.K. Circulation and diagnostics of Puumala virus in Norway: Nephropatia epidemica incidence and rodent population dynamics, *APMIS: acta pathologica, microbiologica, et immunologica Scandinavica*, 2017, no. 125, DOI: 10.1111/apm.12712.
- Mørk T., Prestrud P. Arctic rabies – a review, *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2004, vol. 45, no. 1–2, p. 1–9, DOI: 10.1186/1751-0147-45-1.
- New D., Elkin B., Armstrong T., Epp T. Anthrax in the Mackenzie wood bison (*Bison bison athabascae*) population: 2012 anthrax outbreak and historical exposure in non-outbreak years, *Journal of Wildlife Diseases*, 2017, vol. 53, no. 4, p. 769–780, DOI: 10.7589/2016-11-257.
- Ogden N.H., Maarouf A., Barker I.K., Bigras-Poulin M., Lindsay L.R., Morshed M.G., O'Callaghan C.J., Ramay F., Waltner-Toews D., Charron D.F. Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada, *International Journal for Parasitology*, 2006, vol. 36, no. 1, p. 63–70, DOI: 10.1016/j.ijpara.2005.08.016.
- Olsen B., Duffy D.C., Jaenson T.G., Gylfe Å., Bonnedahl J., Bergström S. Transhemispheric exchange of Lyme disease spirochetes by seabirds, *Journal of Clinical Microbiology*, 1995, vol. 33, p. 3270–3274.
- Omazic A., Berggren C., Thierfelder T., Koch A., Evengård B. Discrepancies in data reporting of zoonotic infectious diseases across the Nordic countries – a call for action in the era of climate change, *International Journal of Circumpolar Health*, 2019b, vol. 78, 1601991, DOI: 10.1080/22423982.2019.1601991.
- Omazic A., Bylund H., Boqvist S., Högberg A., Björkman C., Tryland M., Evengård B., Koch A., Berggren C., Malogolovkin A., Kolbasov D., Pavelko N., Thierfelder T., Albihn A. Identifying climate-sensitive infectious diseases in animals and humans in Northern regions, *Acta Veterinaria Scandinavica*, 2019a, vol. 61, p. 61–53, DOI: 10.1186/s13028-019-0490-0.
- Pakanen V.M., Sormunen J.J., Sippola E., Blomqvist D., Kallio E.R. Questing abundance of adult taiga ticks *Ixodes persulcatus* and their *Borrelia* prevalence at the northwestern part of their distribution, *Parasites and Vectors*, 2020, vol. 13, no. 1, p. 384, DOI: 10.1186/s13071-020-04259-z.
- Pakharukova M.Y., Mordvinov V.A. The liver fluke *Opisthorchis felinus*: biology, epidemiology and carcinogenic potential, *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 2016, vol. 110, no. 1, p. 28–36, DOI: 10.1093/trstmh/trv085, PMID: 26740360.
- Palo R., Ahlm C., Tärnvik A. Climate variability reveals complex events for tularaemia dynamics in man and mammals, *Ecology and Society*, 2005, vol. 10, no. 1, p. 22.
- Palo R.T. Time series analysis performed on nephropatia epidemica in humans of northern Sweden in relation to bank vole population dynamic and the NAO index, *Zoonoses and Public Health*, 2009, vol. 56, no. 150, p. 6.
- Parkinson A.J., Evengard B., Semenza J.C., Ogden N., Børresen M.L., Berner J., Brubaker M., Sjöstedt A., Evander M., Hondula D.M., Menne B., Pshenichnaya N., Gounder P., Larose T., Revich B., Hueffer K., Albihn A. Climate change and infectious diseases in the Arctic:

- establishment of a circumpolar working group, *International Journal of Circumpolar Health*, 2014, vol. 73, p. 25163, DOI: 10.3402/ijch.v73.25163.
- Pettersson L., Boman J., Juto P., Evander M., Ahlm C. Outbreak of Puumala virus infection, Sweden, *Emerging Infectious Diseases*, 2008, vol. 14, no. 5, p. 808–810, DOI: 10.3201/eid1405.071124.
- Popova A.Yu., Demina Yu.V., Ezhlova E.B., Kulichenko A.N., Ryazanova A.G., Maleev V.V., Ploskireva A.A., Dyatlov I.A., Timofeev V.S., Nechepurenko L.A., Harkov V.V. Vspysyška sibirskoy yazvy v Yamalo-Nenetskom avtonomnom okruge v 2016 godu, epidemiologicheskie osobennosti Anthrax outbreak in the Yamal-Nenets Autonomous Okrug in 2016, epidemiological features], *Problemy osobo opasnykh infektsiy*, 2016, vol. 4, p. 42–46, DOI: 10.21055/0370-1069-2016-4-42-46, DOI: 10.21055/0370-1069-2016-4-42-46 DOI: 10.21055/0370-1069-2016-4-42-46 (In Russian)
- Revich B.A. Riski zdorovya naseleniya pri izmenenii klimata Arkticheskogo makroregiona [Public health risks due to climate change in the Arctic macroregion], *Nauchnye trudy: Institut narodnohozyaystvennogo prognozirovaniya RAN*, 2020, no. 18, p. 395–408. (In Russian)
- Revich B.A., Tokarevich N.K., Parkinson A.J. Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic [Assessment of the epidemiological situation for hemorrhagic fever with renal syndrome in the world and in Russia, forecast for 2020], *International Journal of Circumpolar Health*, 2012, vol. 71, p. 18792, DOI: 10.3402/ijch.v71i0.18792.
- Roy-Dufresne E., Logan T., Simon J.A., Chmura G.L., Millien V. Poleward Expansion of the White-Footed Mouse (*Peromyscus leucopus*) under Climate Change: Implications for the Spread of Lyme Disease, *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 11, p. e80724, DOI: 10.1371/journal.pone.0080724.
- Rydén P., Björk R., Schafer M.L., Lundström J.O., Petersen B., Lindblom A., Forsman M., Sjöstedt A., Johansson A. Outbreaks of tularemia in a boreal forest region depends on mosquito prevalence, *Journal of Infectious Diseases*, 2012, vol. 205, p. 297–304.
- Rydén P., Sjöstedt A., Johansson A. Effects of climate change on tularaemia disease activity in Sweden, *Global Health Action*, 2009, vol. 2, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2063.
- Salb A., Stephen C., Ribble C., Elkin B. Descriptive epidemiology of detected anthrax outbreaks in wild wood bison (*Bison bison athabasca*) in northern Canada, 1962–2008, *Journal of Wildlife Diseases*, 2014, vol. 50, no. 3, p. 459–468, DOI: 10.7589/2013-04-095.
- Savitskaya T.A., Ivanova A.V., Isayeva G.Sh., Reshetnikova I.D., Trifonov V.A., Ziatdinov V.B., Serova I.V., Saffronov V.A. Otsenka epidemiologicheskoy situatsii po gemorragicheskoy likhoradke s pochechnym sindromom v mire i Rossii, prognoz na 2020 g. [Assessment of the epidemiological situation of hemorrhagic fever with renal syndrome in the world and in Russia, forecast for 2020], *Problemy osobo opasnykh infektsiy*, 2020, no. 2, p. 62–70. (In Russian)
- Scott J.D. Studies abound on how far north *Ixodes scapularis* ticks are transported by birds, *Ticks and Tick Borne Diseases*, 2016, vol. 7, no. 2, p. 327–328, DOI: 10.1016/j.ttbdis.2015.12.001.
- Sidorov G.N., Poleshchuk E.M., Sidorova D.G. Priridnye ochagi beshenstva v Rossii v XX – nachale XXI vekov [Natural foci of rabies in Russia in the XX – early XXI centuries], *Veterinarnaya patologiya*, 2004, vol. 2, no. 10, p. 86–101. (In Russian)
- Simon J.A., Marrotte R.R., Desrosiers N., Fiset J., Gaitan J., Gonzalez A., Koffi J.K., Lapointe F.J., Leighton P.A., Lindsay L.R., Logan T., Milord F., Ogden N.H., Rogic A., Roy-Dufresne E., Suter D., Tessier N., Millien V. Climate change and habitat fragmentation drive the occurrence of *Borrelia burgdorferi*, the agent of Lyme disease, at the northeastern limit of its distribution, *Evolutionary Applications*, 2014, vol. 7, no. 7, p. 750–764, DOI: 10.1111/eva.12165.
- Smith R.P.Jr., Muzaffar S.B., Lavers J., Lacombe E.H., Cahill B.K., Lubelczyk C.B., Kinsler A., Mathers A.J., Rand P.W. *Borrelia garinii* in seabird ticks (*Ixodes uriae*), Atlantic Coast, North America, *Emerging Infectious Diseases*, 2006, vol. 12, no. 12, p. 1909–1912, DOI: 10.3201/eid1212.060448.
- Soleng A., Edgar K.S., Paulsen K.M., Pedersen B.N., Okbaldet Y.B., Skjetne I.E.B., Gurung D., Vikse R., Andreassen Å.K. Distribution of *Ixodes ricinus* ticks and prevalence of tick-borne encephalitis virus among questing ticks in the Arctic Circle region of northern Norway, *Ticks and Tick Borne Diseases*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 97–103, DOI: 10.1016/j.ttbdis.2017.10.002.
- Sonne C., Andersen-Ranberg E., Rajala E.L., Agerholm J.S., Bonefeld-Jørgensen E., Desforges J.P., Eulaers I., Jensen B.M., Koch A., Rosing-Asvid A., Siebert U., Tryland M., Mulvad G., Härkönen T., Acquarone M., Nordøy E.S., Dietz R., Magnusson U. Seroprevalence for *Brucella* spp. in Baltic ringed seals (*Phoca hispida*) and East Greenland harp (*Pagophilus groenlandicus*) and hooded (*Cystophora cristata*) seals, *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2018, vol. 198, p. 14–18, DOI: 10.1016/j.vetimm.2018.02.005.
- Strathdee A.T., Bale J.S. Life on the edge: insect ecology in arctic environments, *Annual Review of Entomology*, 1998, vol. 43, p. 85–106.
- Tälleklint L., Jaenson T. Increasing Geographical Distribution and Density of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) in Central and Northern Sweden, *Journal of medical entomology*, 1998, vol. 35, iss. 4, p. 521–526, DOI: 10.1093/jmedent/35.4.521.
- Tokarevich N., Tronin A., Gnativ B., Revich B., Blinova O., Evengard B. Impact of air temperature variation on the ixodid ticks habitat and tick-borne encephalitis incidence in the Russian Arctic: the case of the Komi Republic, *International Journal of Circumpolar Health*, 2017, vol. 76, no. 1, 1298882, 13 p., DOI: 10.1080/22423982.2017.1298882.
- Tokarevich N.K., Stoyanova N.A. Epidemiologicheskiye aspekty antropogennoy vliyaniya na evolutsiyu leptospirozov [Epidemiological aspects of anthropogenic influence on the evolution of leptospiroses], *Infektsiya i immunitet*, vol. 1, no. 1, p. 67–76. (In Russian)
- Tokarevich N.K., Tronin A.A., Blinova O.V., Buzinov R.V., Boltenev V.P., Yurasova E.D., Nurse J. The impact of climate change on the expansion of *Ixodes persulcatus* habitat and the incidence of tick-borne encephalitis in the north of European Russia, *Global Health Action*, 2011, vol. 4, p. 8448, DOI: 10.3402/gha.v4i0.8448.
- Tomaselli M., Elkin B., Kutz S., Harms N.J., Ingebjørg Nymo H., Davison T., Leclerc L.-M., Branigan M., Dumond M., Tryland M., Checkley S. A Transdisciplinary Approach to *Brucella* in Muskoxen of the Western Canadian Arctic

- 1989–2016, *Ecohealth*, 2019, vol. 16, no. 3, p. 488–501, DOI: 10.1007/s10393-019-01433-3.
- Vatlina T.V., Timonin S.A., Malkhazova S.M. Prostranstvennyy analiz sfery meditsinskogo obsluzhivaniya v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii [Spatial analysis of the healthcare sector in the Arctic zone of the Russian Federation], *Priroda i obshchestvo: v poiskah garmonii*, 2019, vol. 5, p. 32–44. (In Russian)
- Walsh M.G., Smalen de A.W., Mor S.M. Climatic influence on anthrax suitability in warming northern latitudes, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, 9269, DOI:10.1038/s41598-018-27604-w.
- Zakharova O.I., Korennoy F.I., Toropova N.N., Burova O.A., Blokhin A.A. Environmental Risk of Leptospirosis in Animals: The Case of the Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation, *Pathogens*, 2020, vol. 9, p. 504, DOI: 10.3390/pathogens9060504.
- Web sources*
- Cyberleninka, URL: <https://cyberleninka.ru> (access date 10.03.2021).
- eLibrary, URL: <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp?> (access date 13.03.2021).
- Overland J.E., Hanna E., Hanssen-Bauer I., Kim S.-J., Walsh J.E., Wang M., Bhatt U.S., Thoman R.L. Surface Air Temperature, *Arctic Report: Update for 2017*, URL: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/> Surface-Air-Temperature (access date 10.05.2020).
- Pubmed, URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> (access date 03.03.2021).
- ScienceDirect, URL: <https://www.sciencedirect.com> (access date 28.02.2021).

Received 05.04.2021

Revised 22.06.2021

Accepted 20.07.2021

ДИНАМИКА ФЛОРИСТИЧЕСКОГО СОСТАВА И ГРАНИЦ ВЫСОТНЫХ ПОЯСОВ ГОРНЫХ МАССИВОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Е.И. Голубева¹, Г.У. Рис², М.В. Зимин³, М.Л. Ковальчук⁴, Ю.И. Тимохина⁵

^{1,3,5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

² Институт полярных исследований имени Скота, Кембриджский университет, Великобритания, проф.

⁴ ООО «Стройтрансгаз Трубопроводстрой», вед. специалист

¹ Кафедра рационального природопользования, проф., д-р биол. наук; e-mail: egolubeva@gmail.com

³ Лаборатория аэрокосмических методов, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: zimimv@mail.ru

⁵ Кафедра рационального природопользования, асп.; e-mail: timokhina2701@gmail.com

Многoletние антропогенные нагрузки и современные климатические тренды привели к значительным изменениям в структуре и видовом составе растительного покрова экосистем во многих регионах России. Растительность как один из индикаторов воздействия четко отражает пространственно-временную динамику экосистем, в особенности на территориях, испытывающих многолетнюю интенсивную техногенную нагрузку. Одним из таких примеров является Мончегорский район (центральная часть Кольского полуострова). По классификации В.В. Крючкова, данный регион относится к зонам полного и частичного нарушения экосистем. Проведенное исследование направлено на оценку изменений во флористическом составе, структуре растительного покрова и динамике границ высотных поясов горного массива Мончетундра, находящегося под техногенным воздействием комбината «Североникель» (г. Мончегорск) в условиях современных климатических изменений. По литературным данным и материалам аэросъемки была восстановлена структура высотной поясности горного массива Мончетундра до индустриального освоения региона. Для изучения современного состояния и динамики экосистем были выбраны модельные территории, наиболее контрастные по экспозиции склонов и обуславливающие распределение загрязняющих веществ. Сравнение структуры высотной поясности до индустриального освоения региона с современным состоянием позволило оценить общую тенденцию в динамике границ высотных поясов и определить основные изменения в растительности исследуемого региона за период индустриального освоения. Общее улучшение экологической ситуации в регионе и современные климатические изменения привели к позитивным процессам и частичному восстановлению растительного покрова на деградированных территориях. Однако, учитывая экстремальные природные условия, этот процесс идет медленно, хотя тенденции позволяют прогнозировать улучшение ситуации в совокупности с принимаемыми комбинатом «Североникель» мерами по внедрению новых технологий по снижению выбросов загрязняющих веществ. Комплексная оценка состояния растительного покрова экосистем, основанная на использовании наземных и дистанционных данных, позволила наиболее точно описать современное состояние, а также изменения в структуре растительных сообществ.

Ключевые слова: состояние экосистем, техногенное воздействие, растительность, высотная поясность, Кольский полуостров, данные дистанционного зондирования

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятков лет структура растительного покрова экосистем практически всех регионов России претерпела значительные изменения, связанные как с климатическими трендами, так и с интенсивным развитием промышленности, автотранспорта, городской инфраструктуры и других видов антропогенной нагрузки.

Увеличение нагрузки оказало наибольшее влияние на состав, структуру растительных сообществ и их пространственно-временную динамику в экстремальных природных условиях, в том числе в одном из крупных и экономически развитых регионов европейского Севера России – Мурманской области. Здесь располагается один из ярких при-

меров импактной территории – Мончегорский район (центральная часть Кольского полуострова), где экосистемы испытывают на себе многолетнюю интенсивную техногенную нагрузку [Красовская, Евсеев, 2009; Крючков, Сыроид, 1984, 1990; Крючков, Макарова, 1989; Куваев, 2006; Раменская, 1983].

Известно, что растительность является одним из наиболее информативных компонентов экосистем, хорошо различается на многозональных космических снимках и отражает различные категории их состояния. Поэтому при проведении исследования по изучению состояния, структуры и динамики экосистем под влиянием природных (преимущественно климатических) и антропогенных факторов нами применялся комплексный подход, включающий на-

земные и дистанционные методы [Миркин и др., 2002; Пузаченко, 2004; Hofgaard et al., 2010].

Структура высотной поясности определяется рядом как природных факторов, так и степенью антропогенных воздействий. В арктическом регионе в экстремальных условиях роста и развития растений воздействие этих факторов четко отражается на структуре растительного покрова и изменении границ высотных поясов, где они наиболее отчетливо видны.

Цель исследования – оценка современной структуры растительного покрова и динамики границ высотной поясности горного массива Мончетундра в условиях техногенного воздействия (в зоне воздействия комбината «Североникель», г. Мончегорск).

Были поставлены и решались следующие задачи:

1) восстановить структуру высотной поясности горного массива Мончетундра до индустриального освоения региона по литературным данным и материалам аэрофотосъемки;

2) проанализировать современную структуру высотной поясности в практически ненарушенных экосистемах (условно фоновых);

3) оценить динамику границ высотных поясов и особенности растительности горного массива Мончетундра за период индустриального освоения района.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве модельных территорий нами были выбраны несколько возвышенностей хребта Мончетундра, находящиеся в непосредственной близости от комбината «Североникель» (г. Мончегорск, Мурманская область): южная вершина основного

хребта, крайний восточный его отрог – Ниттис, предгорья – Сопча и Нюд (рис. 1).

На выбранных участках вдоль противоположных склонов были размечены линии опорных профилей, на которых закладывались пробные площади (точки полевых описаний) в пределах каждого из высотных поясов. На каждой пробной площади проводилась GPS-привязка, составлялось геоботаническое описание по высотным поясам [Корчагин, 1976], анализировались материалы дистанционного зондирования [Книжников и др., 2011; Лабутина, Балдина, 2013; Mikheeva et al., 2017] (космические снимки за 2008–2018 гг.; табл.).

Таблица

Материалы космической съемки

Спутник	Дата съемки	Пространственное разрешение, м
IKONOS	14.06.2002/ 22.08.2002	0,9
GeoEye-1	30.08.2010	0,5
WorldView-4	12.07.2018	0,5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ аэрофотоснимков и результатов детального описания растительности Мончетундры и выделения высотных поясов, проведенного Л.Н. Бобровой и М.Х. Качуриным [1936], показал, что распределение границ и характеристика растительности по склонам хребта Мончетундра до



Рис. 1. Основные районы исследований хребта Мончетундра

Fig. 1. Main research areas of Monchetundra Range

индустриального освоения имели следующие особенности:

I. **Лесной таежный пояс** представлен ельниками и сосняками. Их распределение по высоте и видовой состав представлены следующими сообществами: еловое редколесье с воронично-черничным покровом (до 300 м над уровнем моря); смешанное редколесье (ель, сосна, береза) с воронично-черничным покровом (230 м); ельник чернично-разнотравный; заболоченные ельники; сосняк с примесью ели и березы в комплексе с чернично-лишайниковым покровом, сосняк лишайниковый, сосняк с комплексным молиниевом-вересковым покровом и сосняк сфагновый.

II. **Полоса березовых криволесий.** На склонах на высоте 250–400 м, выше лесного пояса, протягивается узкая полоса низкого березового криволесья, граничащая с безлесными тундровыми ценозами, занимающая склоны различной крутизны и экспозиции. Здесь встречается березовое криволесье с воронично-черничным покровом или сосново-березовое криволесье с лишайниковым покровом. В некоторых частях склонов среди криволесья встречается ерниковая тундра. Между густыми зарослями ерника (*Betula nana*) растут черника (*Vaccinium myrtillus*), голубика (*Vaccinium uliginosum*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*) и др.

III. **Пояс тундр.** Разреженная гемикриофитная растительность вершинного каменистого плато и верхних частей склонов основного хребта представлена горной лишайниковой тундрой с толокнянкой (*Arctous alpine*) на вершинах и склонах предгорий. В нижней части обычна тундра с березой и лишайниками на каменистых террасовидных склонах и вершинах, граничащая с полосой криволесья. Альпийская тундровая разреженная растительность поднимается выше и покрывает большую часть основного хребта. Она приурочена к крупнокаменистому вершинному плато. Горной лишайниковой тундрой покрыты главным образом вершины и склоны небольших вытянутых с севера-запада на юго-восток возвышенностей – 350–400 м над уровнем моря.

Некоторые различия высотного распределения растительности различных отрогов хребта Мончетундра, связанные с высотой, экспозицией и крутизной склонов, подробнее будут рассмотрены при их сравнении с особенностями современного размещения.

Прежде чем приступить к сравнительному анализу структуры экосистем и особенностей распределения растительности в их пределах на основе данных 1930-х гг. и современных материалов, следует отметить следующее. Поскольку рассматриваемая территория находится в непосредственной близости от комбината, она практически повсемест-

но подвержена воздействию промышленных выбросов. По классификации В.В. Крючкова [1990], исследуемая территория относится к зонам полного и частичного нарушения экосистем. Для изучения динамики экосистем как наиболее показательные были выбраны наветренные и подветренные склоны, обуславливающие распределение загрязняющих веществ. Ветровой режим характеризуется преобладанием ветров южных (до 45–50%) и северных румбов (повторяемость от 33% зимой до 45% летом). Ветры в широтном направлении редки (2–4%) [Экология Севера, 2003]. Как уже отмечалось, преимущественный перенос загрязнителей осуществляется в меридиональном направлении. Наличие штилей, слабых ветров и температурных инверсий в течение года приводят к застою воздуха и скоплению загрязняющих веществ в приземном слое на высоте 350–400 м. В связи с этим деградация растительности и почвенного покрова экосистем по высотным поясам на одинаковом расстоянии от источника загрязнения могут существенно различаться. В целом деградация растительности в разной степени наблюдается практически повсеместно. На обращенных к комбинату склонах горы Мончетундра (восточный) и на тыловом склоне горы Ниттис (юго-западный) на месте техногенной пустоши отмечаются признаки восстановления. Обращенный к комбинату западный склон горы Нюд, находящейся, как и все рассматриваемые сопки, в непосредственной близости от комбината, пострадал в меньшей степени благодаря особенностям ветрового режима. Полностью отсутствует растительность и почвенный покров на северном склоне горы Сопча, который находится на пути часто повторяющихся северных ветров, принимая на себя основную массу загрязняющих веществ. В меньшей степени загрязнению оказались подвержены западные склоны гор Мончетундра и Ниттис, а также восточный склон горы Нюд.

Говоря о высотной поясности, следует отметить, что на склонах гор Мончетундра, Ниттис и Нюд наблюдается типичная смена высотных поясов, однако их границы в некоторых случаях смещены и образуют пояс лишь фрагментарно. На склонах гор Сопча и Ниттис (преимущественно восточной экспозиции) сложно выделить какие-либо пояса, т. к. растительный покров практически полностью уничтожен. Лишь в последние десятилетия на юго-западном склоне г. Сопча отмечаются признаки восстановления растительности. Подробнее рассмотрим современное состояние растительности и ее распределение по высотным поясам.

1. **Гора Мончетундра.** В наибольшей степени техногенное воздействие выражено на склонах восточной экспозиции. Характерные для лесного пояса

чистые еловые леса с воронично-черничным покровом, с кустами можжевельника, рябины и ивы в подлеске, простирающиеся от подножия склона до высоты 250 м, сменились техногенной пустошью с признаками восстановления. Появились отдельные экземпляры ивы (*Salix*) и березы пушистой (*Betula pubescens*), деформированной ели стланиковой формы, листовые пластины и хвоя поражены некрозом, в кустарничковом ярусе вороника (*Empetrum nigrum*). Полностью выпали травяной и мохово-лишайниковый ярусы. Исчезли следующие виды кустарников: багульник (*Ledum palustre*); кустарничков: черника, брусника, голубика, филлодоце голубая (*Phyllodocea caerulea*); из травяного яруса: луговик извилистый (*Deschampsia flexuosa*), грушанка однобокая и круглолистная (*Pirola secunda*, *P. rotundifolia*), плаун колючий (*Lycopodium pungens*), герань лесная (*Geranium silvaticum*), линнея северная (*Linnaea borealis*), золотарник (*Solidago virgaurea*), марьянник луговой (*Melampyrum pratense*), мытник лапландский (*Pedicularis lapponica*), колосок обыкновенный (*Anthoxanthum odoratum*); из мохово-лишайникового яруса: *Entodon Schreberi*, *Hylocomium proliferum*, *Cladonia rangiferina*, *Nephroma arcticum*. Проективное покрытие растительного покрова составляет не более 20%, сомкнутость крон лишь 0,1 (рис. 2).

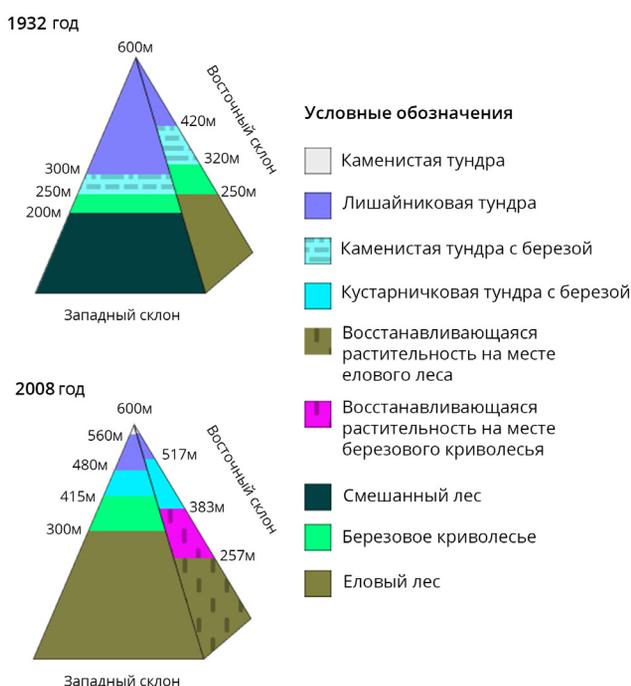


Рис. 2. Структура высотной поясности горы Мончетундра по данным 1932 и 2008–2018 гг.

Fig. 2. The structure of the altitudinal zonation of Monchetundra according to 1932 and 2008–2018 data

Для сравнения современного состава растений с периодом доиндустриального освоения расчи-

тывался коэффициент флористического сходства [Пузаченко, 2004; Семкин, Горшков, 2010; Sørensen, 1948]. В сравнении с современным составом флоры его значение в этом поясе составляет менее 10%. Встречаются мертвые остатки древесных растений, следы пожаров, поваленные стволы деревьев, сухие ели. Границу пояса определить достаточно сложно, ориентировочно она проходит на высоте 260 м.

Выше по склону по данным 1932 г. до 320 м поднималось березовое криволесье. Современные экосистемы здесь также значительно трансформированы, хотя и отмечаются восстановительные процессы. Каменистая поверхность с практически отсутствующим почвенным покровом составляет почти половину пояса. Полностью выпали древесный и кустарниковый ярусы, в подросте преобладает береза пушистая, встречается сосна (*Pinus sylvestris*), ель стланиковой формы (*Picea obovata*). В кустарничковом ярусе доминирует карликовая береза. Мохово-лишайниковый ярус сильно угнетен. Исчезли типичные представители флоры. Среди кустарничков – это вереск обыкновенный, арктоуз альпийский, багульник, вороника, черника, брусника; представителей травяного яруса – луговик извилистый, линнея северная, золотарник, грушанка однобокая, плаун, мохово-лишайникового яруса – кладонии (*Cladonia alpestris*, *Cl. rangiferina*). Надо отметить появление карликовой березы, можжевельника (*Juniperus communis*), толокнянки, филлодоце голубой. Общее проективное покрытие растительного покрова составляет 50%. Сомкнутость крон – 0,3. Коэффициент флористического сходства – 40%. Современная граница пояса проходит на высоте 400 м.

За поясом березового криволесья тянулась до высоты 420 м каменистая тундра с березой. В современной структуре высотной поясности исследуемого склона выделяется каменистая тундра, также как каменистая кустарничково-лишайниковая тундра с березой. Она поднимается до высоты 520 м. Каменистая поверхность с практически полным отсутствием почвенного покрова составляет около 40%, а 10% покрыто накипными лишайниками (рис. 3). Встречаются низкорослые экземпляры березы пушистой и единично сосна. Устойчивыми оказались вороника, карликовая береза, толокнянка, можжевельник, ситник трехраздельный (*Juncus trifidus*), осока (*Carex hyperborean*), овсяница (*Festuca supine*), лишайник цетрария (*Cetraria islandica*). Исчезли арктоуз альпийский, голубика, брусника, черника, лузалеурия (*Loiseleuria procumbens*), диапенсия лапландская (*Diapensia lapponica*), плаун альпийский, луговик извилистый, дриада восьмилепестная (*Dryas octopetala*), филлодоце, багульник, виды лишайника (*Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*,

C. mitis, *Cetraria nivalis*). Проективное покрытие составляет 60%. Сомкнутость крон – менее 0,1. Коэффициент флористического сходства 40%.

Выше 420 м господствовала альпийская разреженная растительность каменистых осыпей и россыпей. На сегодняшний день по полевым данным и анализу космической съемки здесь можно выделить кустарничково-злаковую тундру, верхняя граница которой фрагментарно отмечается на высоте 520 м. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют толкнянка и ситник трехраздельный. Устойчивым видом здесь является лишайник *Cetraria islandica*. Исчезли следующие виды: голубика, золотая розга, *Cetraria nivalis*, *Alectoria ochroleuca*, *A. nigricans*, *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*, *C. chrysantha*, *C. mitis*, *C. crispata*, *C. coccifera*, *C. bellidiflora*, *C. cornuta*, *Sphaerophorus globosus* Sph. *Fragilis*, *Stereocaulon denudatu*. Появились ива, единично сосна угнетенной формы, карликовая береза, можжевельник, вороника, дриада восьмилепестная. Проективное покрытие составляет 80%, коэффициент флористического сходства чуть более 30%.



Рис. 3. Привершинная часть западного склона горы Мончетундра. Фото М.Л. Ковальчук

Fig. 3. Near-top part of the western slope of Monchetundra. Photo by M. Kovalchuk

Склон западной экспозиции горы Мончетундра пострадал в наименьшей степени, т. к. он оказался защищенным от воздействия промышленных выбросов, будучи обращенным в сторону, противоположную комбинату. Здесь наблюдается естественная смена фитоценозов, однако границы высотных поясов заметно смещены вверх.

Лесная растительность здесь была представлена сосново-еловым лесом с примесью березы, с воронично-черничным покровом, местами встречались участки чистого елового леса. Пояс поднимался до 200 м над уровнем моря. В настоящее время лесной пояс здесь также представлен еловым лесом с

воронично-черничным покровом, местами появляется сосна. Лес густой, с валежником, встречается сухостой, гнилые пни. Древесный ярус представлен в основном елью (*Picea obovata*) с участием березы извилистой (*Betula tortuosa*). В травяно-кустарничковом ярусе доминирует черника. Общими являются следующие виды: брусника, вороника, линнея северная. Исчезли голубика, осока, ожика волосистая (*Luzula pilosa*), золотарник, луговик извилистый, грушанки однобокая и круглолистная, майник двулистный, марьянник луговой (*Melampyrum pratense*), щитовник Линнея (*Dryopteris linnaeana*), плаун колючий, лишайники и мхи. Появились в составе ива, можжевельник, рябина (*Sorbus glabrata*). Проективное покрытие растительного покрова составляет 90%, сомкнутость крон – 0,8. Коэффициент флористического сходства составляет 20%. Пояс простирается до абсолютной высоты 340 м.

Как и раньше, выше по склону поднимается березовое криволесье. Однако граница его смещена: по данным 1932 г. она проходила на высоте около 250 м, по современным данным – на уровне 410–420 м. Древесный ярус формируют береза извилистая и береза пушистая, сосна. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют вороника и карликовая береза. Общими видами являются черника, голубика, луговик извилистый, плаун. Исчезли следующие виды: багульник, брусника, линнея северная, арктоуз альпийский, золотарник, грушанка, вереск обыкновенный, *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*. Появились осока (*Carex hyperborean*), овсяница (*Festuca supine*), ива, можжевельник, рябина, филлодоце голубая, *Cetraria islandica*, *Cladonia borealis*. Проективное покрытие растительного покрова составляет 90%, сомкнутость крон – 0,5. Коэффициент флористического сходства – 50%.

Далее вверх по склону, по данным Л.И. Бобровой и М.Х. Качурина, до 300 м над уровнем моря, а по современным данным до 480 м над уровнем моря, тянется каменистая тундра с березой. Пояс сформирован отдельно стоящими деревьями: березой извилистой, сосной, единичными экземплярами ели. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют карликовая береза, голубика, луазелеурия; в мохово-лишайниковом ярусе – *Cetraria islandica*. Общими являются следующие виды: можжевельник, вороника, голубика, толкнянка, осока, дриада восьмилепестная, плаун альпийский. Исчезли багульник, арктоуз альпийский, брусника, черника, ситник, овсяница, диапенсия лапландская, луговик извилистый, филлодоце, различные виды рода *Cladonia*. Появились новые виды: горец живородящий (*Polygonum viviparum*), золотарник лапландский, ястребинка альпийская (*Hieracium alpinum*), астрагал субарктический (*Astragal us-*

subpolaris), бартсия альпийская (*Bartsia alpine*), грушанка круглолистная. Проективное покрытие составляет 90%, коэффициент флористического сходства – 50%.

По современным данным выше 480 м фрагментарно встречается лишайниково-злаковая тундра. Из растущих здесь ранее сохранились следующие виды: *Cetraria islandica* и *C. nivalis*. Исчезли голубика, золотая розга, *Alectoria ochroleuca*, *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*, *C. chrysantha*, *C. Hiascens*, *C. mitis*, *C. crispata*, *C. uncialis*, *C. coccifera*, *C. bellidiflora*, *C. cornuta*, *Alectoria nigricans*, *Sphaerophorus globosus*, *Sph. Fragilis*, *Stereocaulon denudatum*. Появились следующие виды: ива, карликовая береза, можжевельник, толокнянка, единично луазелеурия, плауна льпийский. Проективное покрытие растительного покрова составляет 75%, коэффициент флористического сходства – 20%.

2. **Гора Ниттис.** По современным данным склон восточной экспозиции почти полностью лишен растительного покрова, поэтому определение границы высотных поясов не представляется возможным. Фрагментарно наблюдаются восстановительные процессы с участием ивы, карликовой березы, злаков, мхов и лишайников (рис. 4, 5).



Рис. 4. Седловина основного хребта, западный склон горы Ниттис. Фото М.Л. Ковальчук

Fig. 4. Saddle of the main ridge, western slope of the Nittis mountain. Photo by M. Kovalchuk

Склон юго-западной экспозиции также пострадал от воздействия промышленных выбросов, однако, в меньшей степени. Подножие склона является седловиной главного хребта, высота над уровнем моря составляет 220–260 м, поэтому на этой части склона отсутствует пояс лесной растительности. По данным 1930-х гг. здесь до 270 м простиралась полоса березового криволесья, которая переходила до высоты 330 м в каменистую тундру со злаками и участием березы. По материалам современных полевых исследований и анализу космических

снимков с высоты от 260 до 415 м простирается травяно-кустарничковая тундра с участием березы. В небольшом понижении, хорошо защищенном от выбросов комбината, выделяется елово-березовый разреженный лес с преобладанием в древостое березы пушистой и участием ели и сосны. В кустарниковом ярусе встречаются ива и можжевельник, в травяном – злаки, мохово-лишайниковый ярус практически не выражен.

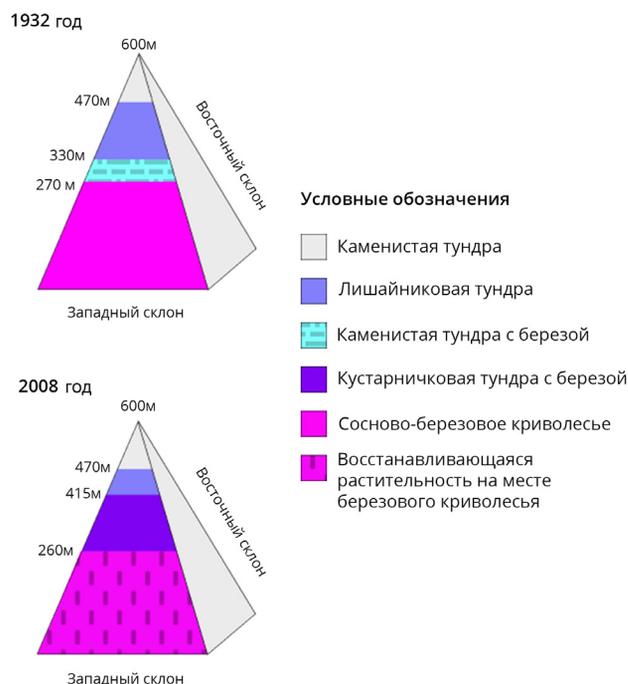


Рис. 5. Структура высотной поясности горы Ниттис по данным 1932 и 2008–2018 гг.

Fig. 5. The structure of the altitudinal zonation of the Nittis Mountain according to 1932 and 2008–2018 data

Травяно-кустарничковая тундра с участием березы покрывает большую часть склона. В древостое – береза пушистая и единичные экземпляры сосны. В кустарниковом ярусе доминируют ива и можжевельник, разнообразный состав кустарничков, травяном – злаки. Из растущих здесь ранее сохранились вороника, голубика, толокнянка, карликовая береза, арктоуз альпийский, филлодоце, луговик извилистый, ситник трехраздельный, овсяница, лишайник *Cetraria nivalis*. Исчезли брусника, черника, диапенсия лапландская, луазелеурия, дриада восьмилепестная, осока, плауны (*Lycopodium alpinum*, *L. appressum*), лишайники *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*, *C. mitis*, *Cetraria islandica*. Появились такие виды, как вереск обыкновенный, *Cladonia borealis*, *Polytrichum commune*. Проективное покрытие составляет 90%, сомкнутость крон – 0,2, коэффициент флористического сходства – почти 50%.

По данным 1932 г., выше 330 м формировалась каменистая тундра, представленная растительно-

стью каменистых осыпей и россыпей. По современным данным нижняя граница каменистой злаково-лишайниковой тундры проходит на высоте 460–470 м. Около 60% площади покрывает злаковая растительность. Из растущих здесь ранее сохранились *Cetraria nivalis*, *Cladonia mitis*. Исчезли голубика, золотая розга, *Alectoria ochroleuca*, *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*, *C. crispata*, *C. uncialis*, *C. coccifera*, *C. bellidiflora*, *C. cornuta*. Появились ива, можжевельник, карликовая береза, луазелеурия, арктоуз альпийский, ситник трехраздельный. Проективное покрытие составляет 90%, коэффициент флористического сходства – менее 20%. Верхний предел распространения сосны на этом склоне отмечается на высоте 475 м.

3. Гора Нюд. Нижнюю часть склона восточной экспозиции, по данным 1932 г., до 250 м занимал еловый воронично-черничный лес. На сегодняшний день нижнюю часть склона до 280 м занимает елово-березовое редколесье с черничным покровом. В формировании древостоя участвуют береза пушистая, ива, ель. Сомкнутость крон составляет 0,7, встречаются мертвые ели. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует черника. Из растущих ранее здесь сохранились вороника, луговик извилистый, багульник, голубика, линнея северная. Исчезли брусника, филлодоце, грушанки однобокая и круглолистная, герань лесная, плаун, золотарник *Entodon Schreberi*, *Hylocomium proliferum*, *Cladonia rangiferina*. Появились можжевельник, карликовая береза, дерен шведский, *Cetraria islandica*, *Cladoniaborealis*. Проективное покрытие составляет 80%, коэффициент флористического сходства – 40% (рис. 6, 7).

Выше по склону протягивается неширокая полоса березового криволесья. По данным 1932 г., нижняя граница пояса проходит на высоте 250 м, верхняя – на высоте 325 м, по современным данным пояс тянется от 280 до 300–320 м. Древесный ярус представлен березой пушистой и извилистой, встречаются сосна и ель. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют злаки и карликовая береза. Проективное покрытие составляет 90%. Из растущих ранее здесь сохранились багульник, вороника, голубика, луговик извилистый, осока. Выпали: черника, плаун, брусника, линнея северная, арктоуз альпийский, золотарник, грушанка однобокая, вереск обыкновенный. Появились луазелеурия и *Cetraria nivalis*. Сомкнутость крон составляет 0,4, коэффициент флористического сходства – 40%.

Выше по склону с 325 м по данным 1932 г. и с 300–320 м по современным данным вплоть до самой вершины простирается горная кустарничково-лишайниковая тундра. Встречаются отдельные низкорослые экземпляры ели и сосны. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует толокнянка.

Проективное покрытие составляет 90%. Из ранее растущих сохранились вороника, луговик извилистый, филлодоце голубая, плаун альпийский, *Cetraria nivalis*. Выпали из состава голубика, брусника, черника, карликовая береза, луазелеурия, дианпенсия лапландская, дриада восьмилепестная, багульник, осока, ситник трехраздельный, овсяница, *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*, *C. mitis*, *Cetraria islandica*. Появились бартсия альпийская (*Bartsia alpina*), *Cetraria nivalis*. Коэффициент флористического сходства составляет 40%.

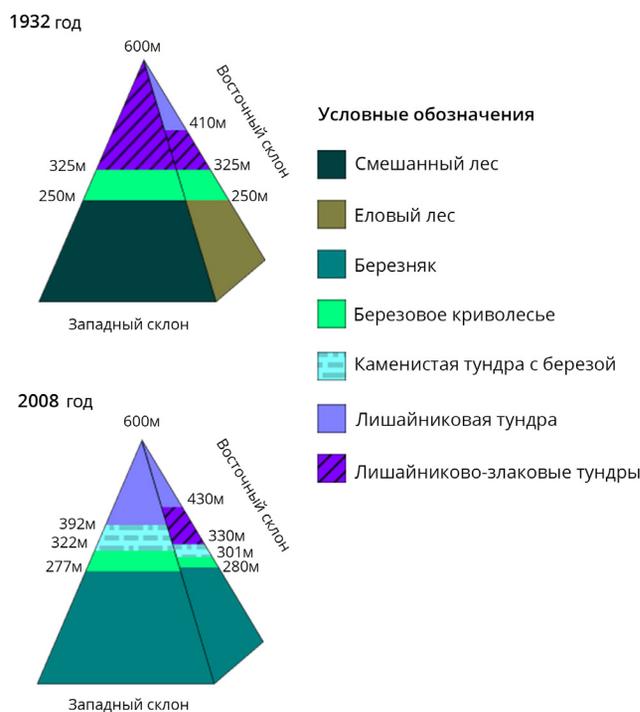


Рис. 6. Структура высотной поясности горы Нюд по данным 1932 и 2008–2018 гг.

Fig. 6. The structure of the altitudinal zonation of the Nyud Mountain according to 1932 and 2008–2018 data

Склон западной экспозиции горы Нюд обращен к комбинату. Подножие склона по данным 1932 г. занимали сосново-еловые леса, поднимаясь до 250 м. По современным данным здесь сформировался лес с участием березы пушистой, осины (*Populus tremula*), ольхи (*Alnus incana*), ивы, рябины, верхняя граница которого продвинулась до 280 м. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует черника. Общее проективное покрытие составляет 90%. Встречаются мертвые ели. Из растущих ранее здесь сохранились голубика, брусника, осока, луговик извилистый, линнея северная, *Entodon Schreberi*, *Hylocomium proliferum*. Сомкнутость крон составляет 0,9, коэффициент флористического сходства – 35%.

Границы пояса березового криволесья практически не изменились (до 325 м – по данным 1932 г. и до 320–330 м – по современным). В формировании

древесного яруса участвуют береза пушистая и рябина. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует хвощ. Общее проективное покрытие составляет 75%. Из растущих ранее здесь сохранились золотарник, луговик извилистый. Выпали: багульник, вороника, брусника, черника, голубика, арктоуз альпийский, осока, плаун, линнея северная, грушанка однобокая, вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris*). Появились: толокнянка (*Arctostaphylos uva-ursi*), иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium*), хвощи (*Equisetum*). Общая сомкнутость крон составляет 0,5%, а коэффициент флористического сходства – 20%.



Рис. 7. Склон северо-восточной экспозиции горы Нюд.
Фото М.Л. Ковальчук

Fig. 7. North-eastern slope of the Nyud Mountain.
Photo by M. Kovalchuk

Выше по склону по материалам полевых исследований идет узкая переходная зона между березовым криволесьем и горной тундрой – тундра с березой до высоты 390–400 м. Встречаются береза извилистая, сосна. В травяно-кустарничковом ярусе преобладает толокнянка, часто встречается багульник. Сомкнутость крон составляет 0,2, проективное покрытие – 80%.

Выше по склону вплоть до самой вершины простирается горная кустарничково-лишайниковая тундра. Единичные экземпляры сосны поднимаются до самой вершины сопки. Большую часть площади покрывает злаковая растительность. Проективное покрытие составляет 75%. Из растущих ранее здесь сохранились диапенсия лапландская, карликовая береза, луговик извилистый, овсяница, ситник трехраздельный, филлодоце голубая, *Cetraria islandica*. Выпали из состава фитоценоза следующие виды: багульник, вороника, голубика, брусника, черника, арктоуз альпийский, толокнянка, луазелеурия, дриада восьмилепестная, плаун альпийский, *Cetraria*

nivalis, *Cladonia alpestris*, *C. rangiferina*, *C. mitis*. Появилась ива. Коэффициент флористического сходства – 50%.

Нами проведен сравнительный анализ материалов полевых геоботанических исследований и данных космической съемки за 2018 и 2008 гг. Можно отметить, что границы высотных поясов на рассматриваемых горных массивах изменились незначительно – на первые метры или максимум 10–20 м лишь на отдельных склонах. Однако за прошедшее десятилетие можно отметить некоторые тенденции:

1. На **хребте Мончетундра** на склоне западной экспозиции отмечается незначительное увеличение густоты лесного пояса. Пояс криволесья также отличается увеличением сомкнутости крон и густотой нижних ярусов и продвижением вверх по склону на 1–3 м. На склоне восточной экспозиции по пустоши наблюдается усиление эрозионных процессов, что может быть связано с увеличением количества осадков. В нижних частях этого склона увеличивается густота растительности в лесном поясе.

2. На **горе Нюд** на привершинных частях склона по понижениям отмечается увеличение густоты лесного пояса, а на выровненных – усиление эрозионных процессов. На склоне восточной экспозиции границы поясов стабильны, лишь отдельные экземпляры молодых деревьев, преимущественно березы, появились выше границы криволесья на 2–3 м.

3. На **горе Ниттис** также повсеместно наблюдается некоторое увеличение густоты растительного покрова нижних поясов, также за счет подроста, кустарничкового и кустарничкового ярусов. В привершинных частях склона изменений не отмечается.

4. На **горе Сонче**, отличающейся деградацией в наибольшей степени, наблюдается схожая для остальных горных массивов тенденция: более активно идет восстановление растительности нижних поясов, медленнее – в привершинных частях склона, хотя здесь отчетливо наблюдается увеличение покрытия кустарничками и мхами.

ВЫВОДЫ

Анализ современных данных о состоянии растительности горного массива Мончетундра по наземным наблюдениям и данным дистанционного зондирования в сравнении с характеристиками, полученными в 1930-х гг. до индустриального освоения региона, отражает общие тенденции, характерные для экосистем в сфере техногенного воздействия, и свидетельствует о значительных изменениях в структуре растительного покрова, часто необратимых.

В меньшей степени подверженными техногенному воздействию оказались западные склоны главного хребта Мончетундра, его отрога Ниттис,

а также восточный склон горы Нюд. Это объясняется ориентированностью по отношению к комбинату и особенностями ветрового режима района. В наибольшей степени претерпели изменения наветренные склоны: восточные склоны Мончетундры и Ниттиса; северный, западный и восточный склоны Сопчи; северный, западный склоны Нюда. Существенно сократилось видовое разнообразие растительного покрова практически на всей территории исследования, местами наблюдается выпадение целых ярусов, снизился процент общего проективного покрытия.

Современная структура высотной поясности горного массива Мончетундра представляет собой определенную закономерную смену высотных поясов, с тенденцией смещения их границ. Исключением составляют восточные склоны главного хребта

(Мончетундра) и его отрога (Ниттис), обращенные к комбинату, где первые два пояса представлены техногенной пустошью с признаками процессов восстановления.

В последнее десятилетие наблюдается почти повсеместное «позеленение» склонов за счет увеличения густоты (проективного покрытия) нижних ярусов, развития подроста древесных пород, увеличения сомкнутости крон, особенно в нижних частях склонов и по ложбинам стока.

Восстановление растительности, учитывая экстремальные природные условия, идет медленно, однако отмеченные тенденции в совокупности с внедрением новых технологий по снижению выбросов загрязняющих веществ комбинатом «Североникель» позволяют прогнозировать улучшение ситуации.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта «Методология оценки состояния и динамики наземных экосистем Арктики в условиях антропогенного воздействия» по данным ДЗЗ (грант РФФИ, № 18-05-60221), научных тем гос. задания кафедры рационального природопользования «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования» и кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества». Материалы космической съемки получены через ЦКП «Геопортал». Исследование частично выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боброва Л.И., Качурин М.Х.* Очерк растительности Мончетундры // Труды СОПС. Серия Кольская. Вып. 2. М.: Л., 1936. С. 95–121.
- Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Академия, 2011. 416 с.
- Корчагин А.А.* Строение растительных сообществ // Полевая геоботаника. 1976. Т. 5. С. 7–313.
- Красовская Т.М., Евсеев А.В.* Комплексный подход к изучению и картографированию современного природопользования в северных районах России // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 6. С. 144–150.
- Крючков В.В., Сыроид Н.А.* Почвенно-ботанический мониторинг в центральной части Кольского полуострова // Мониторинг природной среды Кольского Севера. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1984. С. 15–26.
- Крючков В.В., Сыроид Н.А.* Лишайники как биоиндикаторы качества окружающей среды в северной тайге // Экология. 1990. № 6. С. 63–66.
- Крючков В.В., Макарова Т.Д.* Аэротехногенное воздействие на экосистемы Кольского Севера. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1989. 96 с.
- Куваев В.Б.* Флора субарктических гор Евразии и высотное распределение ее видов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 566 с.
- Лабутина И.А., Балдина Е.А.* Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков»: учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2013. 168 с.
- Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломец А.И.* Современная наука о растительности. М.: Логос, 2002. 264 с.
- Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.
- Раменская М.А.* Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 215 с.
- Семкин Б.И., Горшков М.В.* Об оценке сходства и различия в серии флористических и фитоценологических описаний // Комаровские чтения. 2010. Вып. LVII. С. 203–220.
- Экология Севера: дистанционные методы изучения нарушенных экосистем / под ред. А.П. Капицы. М.: Научный мир, 2003. 248 с.
- Mikheeva A.I., Tutubalina O.V., Zimin M.V., Golubeva E.I.* A sub-pixel classification of multispectral satellite imagery for interperetation of tundra-taiga ecotone vegetation (case study on Tuliok river valley, Khibiny, Russia), *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 53, no. 9, p. 1164–1173.
- Hofgaard A., Rees G., Tommervik H., Tutubalina O., Golubeva E., Lukina N., Høgda K.A., Karlsen S.R., Isaeva L., Kharuk V.* Role of disturbed vegetation in mapping the

boreal zone in northern Eurasia, *Applied Vegetation Science*, 2010, vol. 13, no. 4, p. 460–472.
 Sørensen T. A Method of Establishing Groups of Equal Amplitudes in Plant Sociology Based on Similarity of

Species Content and Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons, *Kongelige Danske Videnskaberne Selskab, Biologiske Skrifter*, 1948, vol. V, no. 4, p. 1–34.

Поступила в редакцию 04.03.2021

После доработки 03.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

DYNAMICS OF FLORISTIC COMPOSITION AND BOUNDARIES OF THE ALTITUDE ZONES WITHIN MOUNTAIN MASSIFS OF THE KOLA PENINSULA UNDER THE ANTHROPOGENIC IMPACT

E.I. Golubeva¹, W.G. Rees², M.V. Zimin³, M.L. Kovalchuk⁴, Yu.I. Timokhina⁵

^{1,3,5} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

² *Scott Polar Research Institute, University of Cambridge, Cambridge, UK*

³ *Laboratory of Aerospace Methods,*

⁴ *ООО “Stroytransgaz Truboprovodstroy”, Moscow*

¹ *Department of Environmental Management, Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: egolubeva@gmail.com*

² *Professor*

³ *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ziminmv@mail.ru*

⁴ *Leading Specialist*

⁵ *Department of Environmental Management, post-graduate student; e-mail: timokhina2701@gmail.com*

Long-term anthropogenic pressure and current climatic trends have led to significant changes in the structure and species composition of the vegetation cover of ecosystems in many regions of Russia. As an impact indicator vegetation clearly reflects the spatiotemporal dynamics of ecosystems, especially in the areas experiencing long-term intensive technogenic stress. An example is the Monchegorsk district in the central part of the Kola Peninsula. According to V.V. Kryuchkov's classification, this region belongs to the zones of complete and partial disturbance of ecosystems. The aim of the study is to assess changes in the structure of vegetation cover and the dynamics of the boundaries of altitude zones in the Monchetundra mountain range, which experiences the technogenic impact of the Severonikel plant (Monchegorsk), under the modern climate change. The literature data and space imagery were used to reconstruct the structure of altitudinal zonation in the Monchetundra mountain range before the industrial development of the region. To study the current state and dynamics of ecosystems, the model territories were selected that are most contrasting in the exposure of slopes, determining the distribution of pollutants. A comparison of the structure of altitudinal zonation before the industrial development of the region with the current state made it possible to assess the general trend in the dynamics of the boundaries of altitudinal zones and determine main changes in the vegetation cover of the studied region during the period of industrial development. General improvement of the ecological situation in the region and the current climate changes have led to positive processes and partial restoration of vegetation cover within the degraded territories. However, under the extreme natural conditions this process is slow, although the identified trends in combination with measures taken by the Severonikel plant to introduce new technologies to reduce emissions of pollutants allow us to predict an improvement of the situation. Complex assessment of the state of vegetation cover of ecosystems based on the use of ground-based and remote sensing data made it possible to most accurately describe the current state, as well as the changes in the structure of plant communities.

Keywords: state of ecosystems, technogenic impact, vegetation, altitudinal zonation, Kola Peninsula, Earth remote sensing data

Acknowledgments. The work was financially supported by the Russian Foundation of Basic Research (project no. 18-05-60221 Methodology for assessing the state and dynamics of Arctic terrestrial ecosystems under anthropogenic impact based on remote sensing data) and carried out under the scientific topics of the state task of the departments of Environmental Management “Sustainable development of territorial systems of nature management” and Cartography and Geoinformatics “Development of methods and technologies of cartography, geoinformatics and aerospace sensing for studying of nature and society”. The access to remote sensing data was supported by the Geoportal Centre of collective usage, Lomonosov Moscow State University. The study was partially carried out within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change”.

REFERENCES

- Bobrova L.I., Kachurin M.Kh. [Overview of the vegetation of Monchetundra], *Trudy SOPS* [Proc. of the Council for the Study of Productive Forces], Ser. *Kol'skaya*, pt. 2, Moscow, Leningrad, 1936, p. 95–121. (In Russian)
- Ekologiya Severa: distantsionnye metody izucheniya narushennykh ekosistem* [Ecology of the North: remote sensing methods for studying disturbed ecosystems], A.P. Kapitsa (ed.), Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2003, 248 p. (In Russian)
- Hofgaard A., Rees G., Tommervik H., Tutubalina O., Golubeva E., Lukina N., Høgda K.A., Karlsen S.R., Isaeva L., Kharuk V. Role of disturbed vegetation in mapping the boreal zone in northern Eurasia, *Applied Vegetation Science*, 2010, vol. 13, no. 4, p. 460–472.
- Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy* [Aerospace methods of geographical research], Moscow, Akademiya Publ., 2011, 416 p. (In Russian)
- Korchagin A.A. Stroenie rastitel'nykh soobshchestv [The structure of plant communities], *Polevaya geobotanika*, 1976, vol. 5, p. 7–313. (In Russian)
- Krasovskaya T.M., Evseev A.V. Kompleksnyi podkhod k izucheniyu i kartografirovaniyu sovremennogo prirodopol'zovaniya v severnykh raionakh Rossii [An integrated approach to the study and mapping of modern nature management in the northern regions of Russia], *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2009, no. 6, p. 144–150. (In Russian)
- Kryuchkov V.V., Makarova T.D. *Aerotekhnologicheskoe vozdeistvie na ekosistemy Kol'skogo Severa* [Aerotechnogenic impact on ecosystems of the Kola North], Apatity, 1989, 96 p. (In Russian)
- Kryuchkov V.V., Syroid N.A. [Soil botanical monitoring in the central part of the Kola Peninsula], *Monitoring prirodnoi sredy Kol'skogo Severa* [Monitoring of natural environment of the Kola North], Apatity, 1984, p. 15–26. (In Russian)
- Kryuchkov V.V., Syroid N.A. Lishainiki kak bioindikatory kachestva okruzhayushchei sredy v severnoi taige [Lichens as bio-indicators of environmental quality in the northern taiga], *Ekologiya Publ.*, 1990, no. 6, p. 63–65. (In Russian)
- Kuvaev V.B. *Flora subarkticheskikh gor Evrazii i vysochnoe raspredelenie ee vidov* [Flora of the subarctic mountains of Eurasia and the altitudinal distribution of its species], Moscow, KMK Publ., 2006, 566 p. (In Russian)
- Labutina I.A., Baldina E.A. *Praktikum po kursu "Deshifirovaniye aerokosmicheskikh snimkov"* [Practical course "Interpretation of space images"], Moscow St. Un-t Publ., 2013, 168 p. (In Russian)
- Mikheeva A.I., Tutubalina O.V., Zimin M.V., Golubeva E.I. A subpixel classification of multispectral satellite imagery for interpretation of tundra-taiga ecotone vegetation (case study on Tuliok river valley, Khibiny, Russia), *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, vol. 53, no. 9, p. 1164–1173.
- Mirkin B.M., Naumova L.G., Solomeshch A.I. *Sovremennaya nauka o rastitel'nosti* [The Modern Science of vegetation], Moscow, Logos Publ., 2002, 264 p. (In Russian)
- Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Environmental and Geographical Investigations], Moscow, Akademiya Publ., 2004, 416 p. (In Russian)
- Ramenskaya M.A. *Analiz flory Murmanskoi oblasti i Karelii* [Analysis of flora of the Murmansk Oblast and Karelia], Leningrad, Nauka Publ., 1983, 215 p. (In Russian)
- Semkin B.I., Gorshkov M.V. Ob otsenke skhodstva i razlichiya v serii floristicheskikh i fitotsenoticheskikh opisaniy [Assessment of similarities and differences between floristic and phytocenotic descriptions], *Komarovskie chteniya*, 2010, no. LVII, p. 203–220. (In Russian)
- Sörensen T. A Method of Establishing Groups of Equal Amplitudes in Plant Sociology Based on Similarity of Species Content and Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons, *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Biologiske Skrifter*, 1948, vol. V, no. 4, p. 1–34.

Received 04.03.2021

Revised 03.06.2021

Accepted 20.07.2021

УДК 913+551.4.08

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЛЬЕФА НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НИЖНЕГО ПРИОБЬЯ

Е.А. Еременко¹, Ю.Н. Фузеина², М.В. Власов³, Е.В. Ворошилов⁴,
А.А. Деркач⁵, А.В. Бредихин⁶

^{1, 2, 4-6} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии
³ ООО «ФРЭКОМ», г. Москва

¹ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

² Доц., канд. геогр. наук; e-mail: donaldw@bk.ru

³ Главный специалист; e-mail: vlasov-maxim@mail.ru

⁴ Магистрант; e-mail: voroshilov@yahoo.com

⁵ Преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: derkach1977@yandex.ru

⁶ Зав. кафедрой, проф., д-р геогр. наук; e-mail: avbredikhin@yandex.ru

Для оценки масштабов и выделения видов антропогенной трансформации рельефа при хозяйственном освоении территории Нижнего Приобья выполнены комплексные геоморфологические исследования в районе городов Салехарда и Лабытнанги, включавшие крупномасштабную геоморфологическую съемку, аэрофотосъемку с БПЛА, дешифрирование космических снимков и анализ цифровой модели рельефа. Установлено, что на территории Нижнего Приобья прямая трансформация рельефа при освоении существенно преобладает над косвенной (площадь подверженных участков составляет 42,6 км² и 3,7 км² соответственно). Среди положительных антропогенных форм распространены площадные (в том числе отвалы карьеров, свалки ТБО и опилок) и дорожные насыпи (общая площадь – 16,4 км², объем – около 30 млн м³). Отрицательные формы представлены карьерами и выемками, дренажными канавами (3,8 км² и около 25 млн м³). Определены морфологические параметры антропогенных форм и показана их зависимость от функционального назначения. Площадь участков искусственного выравнивания и террасирования поверхности без отсыпок составила до 22,4 км², косвенной трансформации рельефа (участков активизации термокарста, линейной эрозии, делювиального смыва) – 3,7 км². Наибольшей трансформации в результате хозяйственного освоения Нижнего Приобья подвергся естественный рельеф долинного комплекса Оби, Полуя и Соби: 59% от площади ареала прямой трансформации приходится на поймы, I и II надпойменные террасы. При этом освоение пойменных уровней (как и междуречных поверхностей) сопровождается сооружением крупных положительных форм (насыпей), в то время как при строительстве на речных террасах производится чаще всего выравнивание рельефа без масштабной отсыпки грунта. Показано, что масштаб антропогенного воздействия (в том числе создаваемых форм антропогенного рельефа) определяется двумя основными факторами – типом природопользования и природными условиями (в частности геолого-геоморфологическими и геоэкологическими). При этом значимость второго фактора на территории Арктической зоны РФ существенно возрастает в сравнении с другими территориями, что обуславливает необходимость комплексной оценки природных условий на перспективных участках освоения с целью снижения затрат и минимизации неблагоприятных и опасных последствий природопользования.

Ключевые слова: Харп, Лабытнанги, Салехард, Аксарка, антропогенный рельеф, антропогенное воздействие, хозяйственное освоение Арктики

ВВЕДЕНИЕ

Нижнее Приобье – один из крупнейших районов хозяйственного освоения Российской Арктики, имеющий длительную историю становления. Это важнейший в западносибирской Арктике транспортный узел, значимость которого в последние десятилетия неуклонно возрастает [Деттер, Константинова, 2016; Замятина, Гончаров, 2020]. Соседство судоходной водной артерии (Обь, впадающая в Обскую губу с выходом к Северному морскому пути (СМП)), уникальных рудных месторождений Полярного Урала и залежей угле-

водородов Ямала создало благоприятные предпосылки для формирования здесь крупной (по арктическим меркам) городской агломерации, включающей административный центр Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) г. Салехард, г. Лабытнанги и пгт Харп. История освоения природных ресурсов Нижнего Приобья насчитывает несколько столетий, однако на первом и наиболее продолжительном этапе (до начала XX в.) ведущими типами природопользования оставались традиционные оленеводство, охота и рыболовство. Широкомасштабная трансформация природных

комплексов в результате строительства и горнодобычи началась здесь около ста лет назад и сопровождается изменением естественного рельефа территории и спектра характерных геоморфологических процессов [Деттер, Константинова, 2016].

Целью исследования являлась количественная оценка масштабов и выделение типов антропогенной трансформации рельефа Нижнего Приобья в районе Салехарда и Лабытнанги.

Несмотря на длительную историю природопользования, а также повышенный научный интерес к природным и природно-антропогенным комплексам севера Западной Сибири в последние десятилетия, инвентаризация антропогенного рельефа и антропогенно обусловленных изменений естественного хода геоморфологических процессов ранее в крупном масштабе для территории всей агломерации не проводилась. В обобщающих работах последних лет (например, [Эколого-геоморфологический анализ..., 2020]) выделены основные геоэкологические проблемы и геоморфологические последствия хозяйственного освоения, в частности территории Салехарда, однако количественных параметров антропогенной трансформации (площадь воздействия, объемы антропогенных отложений и пр.) до сих пор получено не было. В то же время изучение антропогенной трансформации рельефа крупнейшего транспортного узла и столичного центра ЯНАО интересно, во-первых, с точки зрения количественного сравнения последствий хозяйственной деятельности с аналогичными последствиями в других арктических ареалах освоения, а во-вторых, с точки зрения выявления ключевых направлений изменения рельефа и современных геоморфологических процессов для разработки стратегии снижения рисков активизации неблагоприятных и опасных природных процессов в районах перспективного освоения.

Масштаб и типы антропогенных трансформаций рельефа в ходе освоения определяются, прежде всего, типом природопользования [Бредихин и др., 2020]. Однако существенную роль играют также геоморфологическое строение территории, литологический состав поверхностных отложений, криогенное строение и льдистость грунтов. Все эти условия определяют конструкции зданий и сооружений, их взаиморасположение, мощность насыпей, а также спектр антропогенно обусловленных геоморфологических процессов в зонах освоения. Выполненные исследования нацелены в том числе на выявление и количественную оценку взаимосвязи между степенью антропогенной трансформации и природными условиями территории в крупном масштабе.

Для изучаемого района характерен в целом равнинный рельеф. Город Салехард и п. Аксарка

(административный центр Приуральяского района ЯНАО) располагаются на правом берегу Оби в пределах Обь-Полуйского междуречья, которое в виде субширотной вытянутой гряды возвышается над Нижнеобской низменностью и широкой долиной Полуя.

Максимальные отметки абсолютных высот достигают здесь 135–145 м, характерны значительные глубина (до 50–100 м) и густота эрозионного расчленения. Междуречные поверхности в пределах зоны освоения сложены аллювиально-морскими отложениями позднего плейстоцена (пески, супеси, реже – суглинки), в днищах крупных долин выражены поймы и серия надпойменных террас, сложенные песчаным и супесчаным аллювием позднеплейстоцен-голоценового возраста. Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение на междуречьях, вблизи долин крупных рек местами отсутствуют или кровля заглублена на первые десятки метров, мощность не превышает 300 м, температура изменяется от –1 до –3°C [Атлас..., 2004].

Город Лабытнанги расположен на левом берегу Оби в пределах полого снижающейся с запада на восток равнины с абсолютными отметками от 300–400 м (к востоку от п. Харп) до 50–100 м (в г. Лабытнанги). Залегающие с поверхности четвертичные отложения характеризуются горизонтальной и вертикальной неоднородностью состава. Аллювиальные и аллювиально-морские преимущественно песчаные позднеплейстоценовые отложения при движении с востока на запад (в сторону предгорий Полярного Урала) сменяются в районе мкр. Обская ледниковыми (супеси и суглинки с валунами, галькой и щебнем) и водно-ледниковыми (пески, супеси, суглинки) отложениями позднего плейстоцена, покров которых прерывается в районе низкогорий окрестностей п. Харп. Западная часть изученной территории является наиболее возвышенной, отметки абсолютных высот приближаются к 500 м и морфологический облик рельефа начинает напоминать низкогорный. Поселок Харп располагается на абсолютных отметках от 70 до 120 м в основном в пределах долины Соби, пересекающей здесь денудационное низкогорье с отметками высот до 300–350 м, где на поверхность выходят магматические и метаморфические породы палеозоя, а четвертичные отложения представлены коллювиально-делювиально-солифлюкционными образованиями пестрого литологического состава (от глыб и щебня до глин с включением обломочного материала). Многолетнемерзлые породы характеризуются сплошным распространением, мощность составляет от 100 до 300 м, температура – от –1 до –5°C [Атлас..., 2004], под долинами рек и ручьев кровля мерзлоты опускается на 15–20 м.

Краткая история хозяйственного освоения.

Изучаемый район расположен на широте Северного полярного круга, климат здесь суровый, с холодной и снежной зимой, однако с древнейших времен высокий песчаный берег в устье Полуя был обжитым: первые известные стоянки людей на территории нынешнего центра г. Салехарда относятся к концу IV – началу III тысячелетия до н. э. [Тупахина, Тупахин, 2019], значительная часть археологических памятников принадлежит середине II тысячелетия до н. э. [Зах, 1997]. Поселения древних людей имели нередко характер временных стоянок, однако отмечены и этапы длительного проживания на Ангальском мысу Салехарда в эпоху энеолита. В пределах поселений происходило выравнивание естественного рельефа, мощность культурного слоя достигает 1–1,5 м [Тупахина, Тупахин, 2019]. Археологические находки, относящиеся к I тысячелетию н. э., свидетельствуют о том, что проживавшие здесь племена занимались охотой и рыболовством, обработкой железа, а в целом деятельность человека не приводила к существенному изменению естественного рельефа территории.

В истории хозяйственного освоения территории во II тысячелетии н. э. можно выделить несколько этапов [Деттер, Константинова, 2016; Колева, 2019]. До 1595 г. основными жителями территории нынешнего Приуралья ЯНАО были ненцы и ханты, занимавшиеся пастбищным оленеводством, охотой и рыболовством. Их поселения были невелики по площади, значительная часть населения вела кочевой образ жизни. В 1595 г. казаки Березовского воеводы Никифора Траханиотова срубили острог на мысу у впадения р. Полуя в Обь – Обдорскую крепость (с 1635 г. – Обдорская застава, с 1807 г. – село Обдорск, с 1933 г. – районный поселок Салехард, с 1938 г. – город). Являясь административным и торговым центром, а также форпостом России на СМП, Обдорск контролировал значительную часть Нижнего Приобья. Здесь велась торговля рыбой и пушниной [Деттер, Константинова, 2016], с середины XIX в. на ежегодные ярмарки приезжали купцы из Москвы, Петербурга и Архангельской губернии. На противоположном берегу Оби на месте нынешнего г. Лабытнанги (с 1952 г. – рабочий поселок, с 1975 г. – город) уже во второй половине XIX в. существовало небольшое коми-зырянское поселение выходцев из Архангельской губернии, занимавшихся охотой, рыболовством и торговлей. С приходом советской власти село Обдорск разрасталось, численность населения неуклонно увеличивалась, с 1930-х гг. начал работу Обдорский консервный комбинат (ныне – ООО «Салехардский комбинат») – крупнейшее рыбоперерабатывающее предприятие ЯНАО. В 1935 г. начал работу аэродром г. Салехарда, однако лишь в конце 1990-х гг.,

благодаря завершению строительства железобетонной взлетно-посадочной полосы, он получил возможность принимать большегрузные самолеты.

Более ста лет (с середины XIX в. до 1950-х гг.) Салехард и его окрестности оставались местом ссылки, значительная часть транспортных магистралей и промышленных объектов строилась силами заключенных. В 1947 г. стартовало строительство железнодорожной Трансполярной магистрали, которая должна была соединить побережье Баренцева моря с Дальним Востоком и Чукоткой. Участок Чум – Лабытнанги оказался одним из первых, который построили и запустили уже в конце 1948 г., и одним из немногих, который уцелел и функционирует до сих пор. На строительстве железной дороги с 1946 по 1952 г. работали около 22 тыс. заключенных девяти колоний, объединенных в Строительно-производственное отделение № 5, базировавшееся на территории Обской (нынешний микрорайон г. Лабытнанги). В 1950 г. для обеспечения стройки была создана Лабытнангская лесоперевалочная база (функционировала до 1986 г.), которая на три ближайших десятилетия стала основным и единственным градообразующим предприятием. С 1954 г. в г. Лабытнанги существует исправительная колония строгого режима «Белый медведь» (или ИК-8), при которой с середины XX в. работали цеха металлообработки, швейно-сапожный и деревообрабатывающий, с 2003 г. колония выпускает строительные материалы и тротуарную плитку.

С 1960-х гг. возросла роль Салехарда и Лабытнанги как отправных пунктов геологоразведочных работ на Ямале, а с начала XXI в. и широкомаштабного строительства газотранспортной инфраструктуры при освоении крупнейших месторождений [Иванов и др., 2008]. Реализация крупных проектов по освоению недр способствовала росту численности населения Салехардской агломерации, площадь хозяйственного освоения с начала века постепенно увеличивается (лишь с конца 1980-х по начало 2000-х гг. наблюдался некоторый перерыв и снижение скорости освоения).

Строительство автомобильных и железных дорог для обеспечения транспортной доступности месторождений углеводородов Ямала и руд Полярного Урала, а также жилищных и промышленных объектов производилось с использованием местных грунтовых строительных материалов – песчано-гравийных смесей и щебня, как следствие, в окрестностях агломерации возникла серия крупных участков открытых горных разработок, многие из которых функционируют до сих пор. Самые большие участки добычи песчано-гравийного сырья расположены в непосредственной близости от населенных пунктов (Харп, Лабытнанги, Салехард),

сырье использовалось при сооружении дорожных насыпей и отсыпки площадок строительства жилых и производственных зданий. В окрестностях п. Харп в 1969 г. открылся первый карьер для добычи щебня, рядом с которым построили дробильно-сортировочную фабрику, поставившую сырье, в том числе, на завод железобетонных изделий, где работали заключенные колонии ИК-8 (завод закрыт в 2002 г.). В настоящее время в окрестностях Харпа функционирует несколько крупных предприятий, занимающихся добычей и сортировкой щебня (в том числе на месторождении «Амфиболитовое»).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выделении временных рубежей разных направлений хозяйственного освоения и изучении технологии трансформации рельефа использованы сведения из опубликованной литературы [Атлас..., 2004; Иванов и др., 2008; Ильясов, 2015; Колева, 2019; Моргун, Абакумов, 2019; Рогачев, 2008], фондовые материалы и материалы экспозиций ГБУ ЯНАО «Ямало-Ненецкий окружной музейно-выставочный комплекс имени И.С. Шемановского» и Городского краеведческого музея г. Лабытнанги. Выполнено дешифрирование космических снимков высокого разрешения (использованы открытые данные ресурса SAS Planet) и выделены основные ареалы прямой и косвенной трансформации рельефа в окрестностях Лабытнанги и Салехарда.

Для получения сведений о строении антропогенного рельефа на территории Нижнего Приобья, а также изменении естественного спектра геоморфологических процессов в результате освоения осенью 2020 г. выполнены полевые геоморфологические исследования, включавшие крупномасштабную геоморфологическую съемку (1:25 000). Полевые исследования проведены на всех участках антропогенной трансформации рельефа: на территории населенных пунктов (гг. Салехард, Лабытнанги (с микрорайоном Обской), п. Харп, с. Аксарка), вдоль существующих транспортных магистралей (автомобильных и железных дорог, трубопроводов), на участках открытой добычи полезных ископаемых и их переработки. В маршрутах фиксировались типы прямой трансформации рельефа (типы и подтипы антропогенных форм), их морфологические параметры (высота, глубина, площадь и др.), состав антропогенных отложений, а также участки развития антропогенно спровоцированных геоморфологических процессов (криогенных, склоновых, флювиальных и др.). Для детального исследования морфологии и оценки объемов отдельных крупных антропогенных форм рельефа выполнена съемка территории с помощью БПЛА

вертолетного типа DJI Phantom 3 Advanced на семи ключевых участках: месторождении «Амфиболитовое» близ п. Харп, карьерах по добыче песчано-гравийной смеси в районе п. Харп, г. Лабытнанги, с. Аксарка, а также на участке мостового перехода автомобильной дороги Салехард–Надым через р. Нядаяха. Съемка БПЛА выполнялась с высоты от 50 до 120 м. Ручное управление осуществлялось при помощи пульта управления с подключенным устройством, оснащенным модулем Wi-Fi и установленным приложением DJI Go. Беспилотная авиационная система DJI Phantom 3 Advanced включает в себя интегрированную навигационную систему, приемник спутниковой навигационной системы (GPS), накопитель полетной информации (карта памяти формата MicroSD), цифровую фото-видеокамеру GoPro Panasonic модели FC300C (угол обзора – 94°) с системой стабилизации изображения. Обработка результатов съемки выполнена с использованием программного обеспечения Agisoft Metashape (версия 1.7). Для получения морфометрических параметров наиболее крупных форм антропогенного рельефа, недоступных для полевого обследования в связи с ведущимися горнодобычными работами, использована цифровая модель рельефа Arctic DEM [Arctic DEM Explorer..., 2020] с разрешением 2 м.

На камеральном этапе исследований составлены крупномасштабные геоморфологические карты участков обследования, содержащие информацию о естественном и антропогенном рельефе территории, а также районах развития антропогенно спровоцированных геоморфологических процессов (минимальный размер учтенных составил 30×30 м). Расчет площади и объемов антропогенного рельефа (в том числе отдельных его подтипов) выполнен с использованием инструментов программного комплекса ArcMAP.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геоморфологические позиции изученных населенных пунктов Приуральского района ЯНАО в целом похожи: большая часть освоенных территорий располагается в пределах долин крупных рек – Оби, Полуя и Соби. На позднеплейстоценовых надпойменных террасах (I и II НПТ), сложенных песчаными и супесчаными отложениями, располагаются центральные части населенных пунктов, и лишь отдельные новые микрорайоны и промышленные объекты спускаются на более низкие или поднимаются на более высокие гипсометрические уровни рельефа. Первоочередному освоению песчаных террас способствовали выровненный характер их поверхности, легкий состав поверхностных грунтов и, нередко, заглубленное положение кровли

многолетней мерзлоты (до 10–15 м), что облегчало строительство и снижало риски эксплуатации хозяйственных объектов.

Основными видами природопользования в Нижнем Приобье в настоящее время являются фоновое, очаговое и крупноочаговое [Красовская, Евсеев, 2008]. К первому виду относятся традиционное (оленьеводство, охота, рыболовство и сбор дикоросов – развиты более чем на 80% территории Приуральского района [Ильясов, 2015]) и сельскохозяйственное природопользование (развито ограничено, в основном в черте городов). Фоновое природопользование не приводит на изучаемой территории к значительным прямым трансформациям рельефа (антропогенный рельеф не образуется), но является причиной косвенных: на участках с нарушенным почвенно-растительным покровом наблюдается активизация термокарста, заболачивания, линейной эрозии. К участкам распространения очагового природопользования можно отнести п. Харп (характерные типы природопользования: промышленное, транспортное, селитебное) и с. Аксарка (селитебное и рыбопромысловое). Города Салехард и Лабытнанги являются ядром крупного очага природопользования, в пределах которого интенсивность антропогенного воздействия на ландшафты велика и экологическое состояние территории оценивается как кризисное [Красовская, Евсеев, 2010]. Спектр типов природопользования довольно широк: промышленное, транспортное, селитебное, а также, в меньшей степени, сельскохозяйственное и рыбопромысловое [Ильясов, 2015].

На основе результатов геоморфологической съемки выделены основные типы антропогенных трансформаций рельефа и виды антропогенных форм на изучаемой территории (рис. 1), подсчитаны площади их распространения и объемы (табл. 1). Результатом прямой трансформации рельефа является создание антропогенных форм, косвенная трансформация выражается в изменении условий развития рельефа и, как следствие, спектра характерных геоморфологических процессов [Еременко и др., 2021].

Антропогенная трансформация рельефа в п. Харп и его окрестностях. Поселок Харп (численность постоянного населения – 5850 чел. на 01.01.2020 [Численность..., 2020]) расположен на левобережье р. Соби в створе устья р. Енгаю (рис. 2), в пределах I и II

позднеплейстоценовых НПТ, слабо наклоненных к руслу р. Соби, и частично захватывает площадку долинного зандра сартанского возраста. Выровненный характер рельефа НПТ, грубообломочный состав слагающих их отложений (а значит – высокий коэффициент фильтрации) и близость кровли скальных пород определили основной спектр характерных прямых и косвенных антропогенных трансформаций рельефа. На большей части территории поселка при строительстве производилось выравнивание поверхностей без масштабных отсыпок (около 47% (189 га) от площади всей зоны антропогенной трансформации рельефа, табл. 2).

Насыпи распространены ограничено (в основном под промышленными зонами, в настоящее время разрушенными), сложены щебнем (высота – до 2 м). Южную часть поселка занимает территория заброшенного завода ЖБК, представляющая собой загроможденную строительным мусором и обломками железобетонных конструкций площадку. Мощность техногенных грунтов достигает здесь 1–1,5 м. В окрестностях завода – скопление неглубоких выемок, образованных в результате добычи песчано-гравийной смеси для нужд завода и городского строительства. В пределах селитебной зоны есть и участки косвенной трансформации рельефа: в тыловой части I НПТ зафиксирован обширный участок затопления и заболачивания, образовавшийся в результате подпруживания поверхностного стока насыпями автомобильных дорог (см. рис. 1).

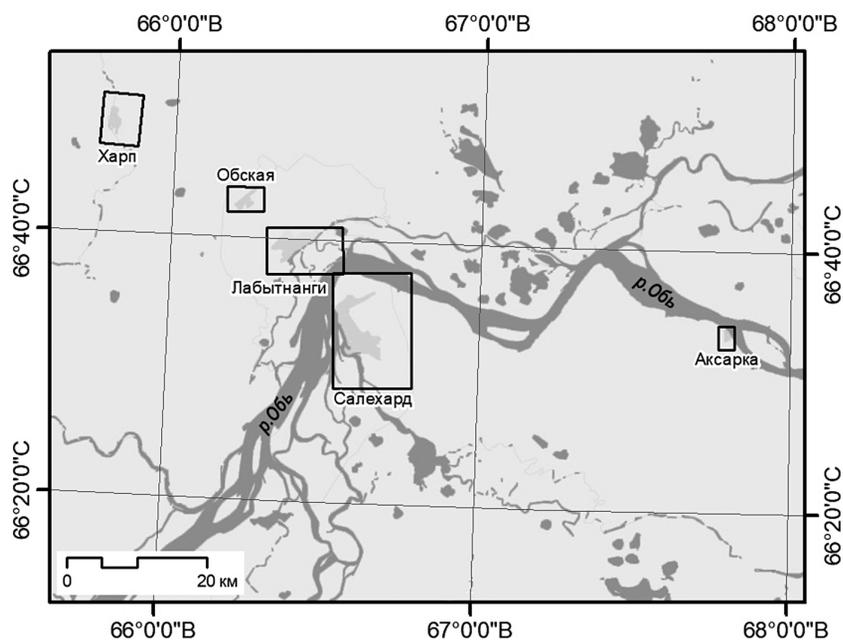


Рис. 1. Местоположение участков геоморфологической съемки в Приуральском районе ЯНАО

Fig. 1. Location of geomorphological survey sites in the Priuralsky district of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug

Характеристика антропогенного рельефа и ареалов косвенной трансформации естественного рельефа в пределах Салехарда, Лабитнанги, Харпа, Аксарки и их ближайших окрестностей

Виды форм рельефа		Основные морфометрические параметры	Занимаемая площадь, км ² (га)	Общий объем форм рельефа, тыс. м ³
<i>Антропогенные формы рельефа</i>				
Насыпи площадные	Песчаные и песчано-гравийные	Высота до 2 м, крутизна склонов 10–25°	6,94 (694)	6 340
		Высота 2–5 м, крутизна склонов 20–30°	0,84 (84)	2 960
		Высота 5–10 м, крутизна склонов 20–30°	0,09 (9)	680
	Сложенные щебнем (в т. ч. отвальные поля карьеров)	Высота до 2 м, крутизна склонов 20–35°	0,33 (33)	410
		Высота 2–5 м, крутизна склонов 30–35°	1,66 (166)	5 820
		Высота 5–15 м, крутизна склонов 30–40°	0,23 (23)	1 740
		Высота 15–25 м, крутизна склонов 30–40°	0,11 (11)	1 760
	Сложенные строительным мусором	Высота до 2 м, прерывистые, включают остовы железобетонных конструкций	0,74 (74)	370
Сложенные опилками	Высота до 2 м, крутизна склонов 10–15°	0,36 (36)	360	
Сложенные ТБО	Высота до 6 м, крутизна склонов 10–30°	0,51 (51)	1 530	
Насыпи дорожные	Песчаные и песчано-гравийные	Высота до 2 м, крутизна склонов 10–25°, общая длина – 194,7 км	1,94 (194)	2 070
		Высота 2–4 м, крутизна склонов 15–30°, общая длина – 54,9 км	1,37 (137)	3 050
		Высота 4–12 м, крутизна склонов 20–30°, общая длина – 3,2 км	0,13 (13)	520
	Сложенные щебнем	Высота 2–4 м, крутизна склонов 20–35°	1,19 (119)	2 840
<i>ИТОГО: площадь и объем положительных форм антропогенного рельефа</i>			<i>16,44 (1 644)</i>	<i>30 450</i>
Карьеры	Песчано-гравийные	Глубина до 2 м, крутизна склонов 10–25° (встречаются в виде ареалов хаотично разбросанных выемок, в основном заброшенные)	1,72 (172)	3 440
		Глубина 2–5 м, крутизна склонов 25–45° (нередко – до 80–90°)	0,86 (86)	3 430
		Глубина 5–15 м, крутизна склонов 25–45° (нередко – до 80–90°)	0,64 (64)	8 290
	В скальных породах (участки добычи щебня)	Глубина 5–15 м, крутизна склонов 60–90° (склоны ступенчатые)	0,19 (19)	2 790
		Глубина 15–25 м, крутизна склонов 60–90° (склоны ступенчатые)	0,29 (29)	7 350
Дренажные канавы (крупные)	В рыхлых грунтах	Глубина 2–3 м, ширина по бровкам – до 12 м, крутизна склонов – до 20–25°, общая длина – 7,2 км	0,09 (9)	130
<i>ИТОГО: площадь и объем отрицательных форм антропогенного рельефа</i>			<i>3,79 (379)</i>	<i>25 430</i>
<i>Участки выравнивания и, реже, террасирования рельефа при строительстве (без отсыпки грунта)</i>				
Пологие склоны и субгоризонтальные поверхности, созданные путем нивелировки микронеровностей рельефа, реже, склоны, искусственно террасированные перемещением грунта		Относительная высота искусственных террас – до 2 м, ширина – до 50 м	22,4 (2 241)	Глубина воздействия при выравнивании поверхности оценивается в 0,5–1 м, при искусственном террасировании до 2 м (на склонах долин)

Продолжение таблицы 1

Виды форм рельефа		Основные морфометрические параметры	Занимаемая площадь, км ² (га)	Общий объем форм рельефа, тыс. м ³
Участки косвенной антропогенной трансформации рельефа				
Сельскохозяйственные угодья (огороды, пашни)	Используемые	Субгоризонтальные поверхности надпойменных террас, преимущественно прямоугольные в плане до 600 м по длинной оси	0,32 (32)	–
	Неиспользуемые	Субгоризонтальные поверхности надпойменных террас и междуречий, до 1 км по длинной оси	1,16 (116)	–
Участки развития антропогенно стимулированного заболачивания, затопления и термокарста	В пределах населенных пунктов и вдоль насыпей дорог	Субгоризонтальные поверхности и пологие склоны вблизи площадных и дорожных насыпей	2,21 (221)	–

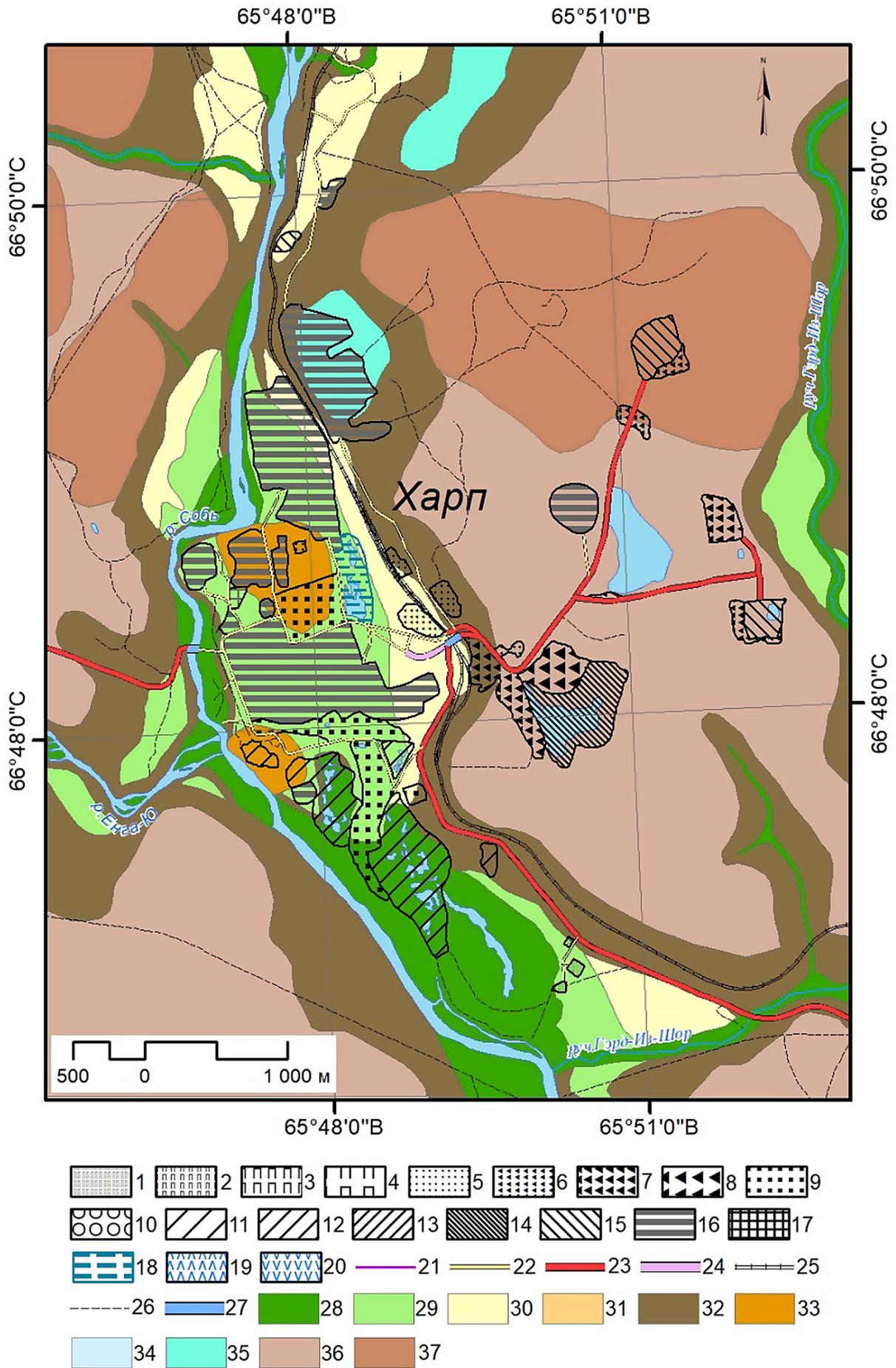
К востоку от поселка Харп в пределах поверхностей выравнивания, сложенных метаморфическими породами палеозоя (амфиболиты, кристаллические сланцы), расположены крупные карьеры по добыче щебня и дробильно-сортировочные фабрики, соединенные автомобильными дорогами на щебнистых насыпях высотой до 4 м. Карьеры (до 600 м по длинной оси, глубина – до 25 м, крутизна склонов до 90°), окружены отвалами из глыб и щебня высотой до 25 м (материал, подготовленный для транспортировки на дробильно-сортировочную фабрику), крутизна склонов – до 40°. Высота терриконов на участках дробления и сортировки достигает 15 м, их крутизна – 30–35°. Площади, занимаемые насыпями, составляют 178 га. Общие объемы отрицательных антропогенных форм, созданных в ходе добычи щебня, оцениваются в 10,1 млн м³ (см. табл. 1), занимаемая площадь – около 111 га.

Результаты выполненного обследования и расчетов показывают, что при селитебном освоении и добыче песчано-гравийного сырья наибольшей трансформации подвергся естественный рельеф поймы и I НПТ р. Соби, в результате добычи щебня – рельеф междуречной поверхности. Абсолютно преобладают участки прямой антропогенной трансформации рельефа (более 90% от всей площади зоны освоения), где естественный рельеф частично или полностью изменен в результате земляных работ. Косвенное влияние хозяйствования на рельеф связано, преимущественно, с транспортным освоением: как и на прочих изученных участках вдоль насыпей автомобильных дорог в результате подпруживания стока и увеличения альбедо поверхности из-за запыленности в зимне-весенний период

активизируются термокарст и термоэрозия. Существенно изменены естественные условия развития рельефа вдоль трассы магистрального газопровода (к востоку от автодороги Лабытнанги–Харп), где получили широкое развитие процессы термокарста и криогенного пучения.

Антропогенная трансформация рельефа в г. Лабытнанги. Исторический центр Лабытнанги (деревня коми в конце XIX в.) располагался на поверхности I НПТ р. Оби, современная зона жилой застройки (численность постоянного населения – 26 295 чел. на 01.01.2020 [Численность..., 2020]) занимает обширную поверхность II НПТ, а северо-западная часть города поднимается на уровень III–IV аллювиально-морских террас позднеплейстоценового возраста (рис. 3). Промышленные предприятия Лабытнанги (ныне заброшенные) расположены, в том числе, на поверхности поймы Оби, ширина которой достигает здесь 4,5 км.

Рельеф расчленен небольшими долинами, впадающими в протоку Выл-Посл, 55% городской территории расположено в пределах эрозионных склонов (крутизна до 15–20°). Песчаный и супесчаный состав аллювиальных отложений, значительная густота эрозионного расчленения и сниженное положение кровли многолетнемерзлых грунтов (до 5–10 м) предопределили отсутствие необходимости в сооружении обширных насыпей при строительстве жилых и промышленных объектов. Около 62% (около 680 га) всей площади антропогенной трансформации приходится на участки выравнивания рельефа и террасирования (см. табл. 2). Лишь в районе тылового шва II НПТ, где отмечается периодическое подтопление и сток затруднен, при



строительстве производилась отсыпка песчано-гравийной смеси, которая добывалась в карьерах в юго-западной части города. Также на отсыпках в начале XX в. построены некоторые промышленные объекты газотранспортной инфраструктуры, емкости для хранения ГСМ, вертолетная площадка. Необходимо отметить, что далеко не всегда искусственное выравнивание рельефа в Лабытнанги и Салехарде приводит к снижению интенсивности неблагоприятных геоморфологических процессов. В частности, на участках пожарищ мощность культурного слоя и его внутренняя литологическая неоднородность существенно возрастают, что приводит к активизации процессов суффозии, заболачивания и пр. Наиболее обширные щебнистые насыпи возведены в пойме Оби (порт Лабытнанги), а также на левом берегу протоки Выл-Посл (под объектами инфраструктуры железной дороги, судоремонтными цехами, рыбопромысловыми предприятиями, складами), высота их достигает 3–5 м. Общая площадь всех насыпей в городе (включая дорожные)

составляет около 499 га. В тыловой части поймы, на правом берегу протоки Выл-Посл на месте Лабытнангской лесоперевалочной базы осталась насыпь из опилок и отходов деревообработки высотой до 2 м (36 га). Отрицательные формы антропогенного рельефа представлены песчано-гравийными карьерами (в настоящее время в основном заброшенными) глубиной до 15 м (34 га), реже – выемками глубиной до 2 м (их сооружение при прокладке дорог возможно благодаря сниженному положению кровли многолетней мерзлоты на значительной части городской территории). Насыпи на территории города занимают примерно в 14 раз большую площадь в сравнении с выемками, что во многом предопределено геоморфологической позицией промышленных объектов на пойме. В результате хозяйственной деятельности наиболее измененным оказался естественный рельеф поверхности II НПТ и эрозионных склонов в пределах города (суммарно здесь расположено около 60% всех антропогенных форм, см. табл. 2), в меньшей степени – поймы (около 17%).

Рис. 2. Геоморфологическое строение и антропогенная трансформация рельефа п. Харп и его окрестностей.

Условные обозначения к рис. 2–6:

I. Антропогенный рельеф. *Отвалы и насыпи; сложенные песчано-гравийным материалом:* 1 – фрагментарные мощностью до 2 м (под отдельные здания); сплошные мощностью: 2 – до 2 м; 3 – 2–5 м; 4 – 5–10 м. *Отвалы и насыпи; сложенные щебнем;* сплошные мощностью: 5 – до 2 м; 6 – 2–5 м; 7 – 5–15 м; 8 – 15–25 м. *Насыпи из техногенных образований:* 9 – из обломков железобетонных конструкций; сплошные мощностью до 2 м; 10 – из опилок и других продуктов деревообработки. *Карьеры песчано-гравийные* глубиной: 11 – до 2 м (скопления хаотически разбросанных по поверхности выемок); 12 – 2–5 м; 13 – 5–10 м. *Карьеры по добыче щебня* глубиной: 14 – 15–25 м; 15 – 5–15 м. *Прочие участки площадной трансформации:* 16 – участки выравнивания рельефа без отсыпки (в т. ч. кладбища); 17 – свалки ТБО; 18 – зоны развития антропогенно спровоцированного затопления; заболачивания и термокарста; *сельскохозяйственные угодья:* 19 – заброшенные; 20 – используемые. *Линейные антропогенные формы:* 21 – крупные дренажные каналы. *Дорожные насыпи:* автомобильных дорог высотой: 22 – до 2 м; 23 – 2–4 м; 24 – более 4 м; 25 – железных дорог высотой 2–4 м; 26 – лесные дороги; дорожные колеи в тундре; 27 – мосты.

II. Естественный рельеф. *Флювиальный и водно-ледниковый:* 28 – поверхность поймы (3–8 м над урезом) и днища малых эрозионных форм; 29 – поверхность первой надпойменной террасы (8–25 м над урезом); 30 – поверхность второй надпойменной террасы (13–40 м над урезом); 31 – уровни третьей и четвертой аллювиально-морских террас (40–70 м над урезом); 32 – эрозионные склоны долин и малых эрозионных форм; 33 – эрозионно-денудационные останцы в днищах долин; 34 – поверхности озерно-ледниковой аккумуляции; 35 – фрагменты долинных зандров. *Созданный комплексной денудацией* (возвышенные равнины и низкогорья): 36 – пологоволнистые вершинные поверхности; 37 – холмисто-увалистые вершинные поверхности

Fig. 2. Geomorphologic structure and the anthropogenic transformation of relief in the Kharp settlement and its neighborhood.

Legend for fig. 2–6:

I. Anthropogenic relief. *Dumps and embankments; composed of sand and gravel material:* 1 – fragmentary up to 2 m thick (for separate buildings); 2 – solid up to 2 m thick; 3 – solid 2–5 m thick; 4 – solid 5–10 m thick; and embankments; folded with crushed stone: 5 – solid up to 2 m thick; 6 – solid 2–5 m thick; 7 – solid 5–15 m thick; 8 – solid 15–25 m thick. *Embankments from manmade formations:* 9 – from debris solid reinforced concrete structures with a thickness of up to 2 m; 10 – from sawdust and other woodworking products. *Sand and gravel pits:* 11 – up to 2 m deep (accumulations of excavations randomly scattered over the surface); 12 – 2–5 m deep; 13 – 5–10 m deep. *Crushed stone quarries:* 14 – 15–25 m deep; 15 – 5–15 m deep. Other areas of areal transformation: 16 – areas of relief leveling (including cemeteries); 17 – solid waste dumps; 18 – zones of development of anthropogenically induced flooding; groundwater rise and thermokarst; 19 – agricultural land (abandoned); 20 – agricultural land (used). *Linear anthropogenic forms:* 21 – large drainage ditches. *Road embankments:* 22 – highways up to 2 m high; 23 – highways 2–4 m high; 24 – highways over 4 m high; 25 – railways 2–4 m high; 26 – forest roads; road tracks in the tundra; 27 – bridges.

II. Natural relief. *Fluvial and water-glacial relief:* 28 – the surface of the floodplain (3–8 m above the edge) and the bottom of small erosional forms; 29 – the surface of the first above-floodplain terrace (8–25 m above the edge); 30 – the surface of the second above-floodplain terrace (13–40 m above the shoreline); 31 – levels of the third and fourth alluvial-marine terraces (40–70 m above the shoreline); 32 – erosional slopes of valleys and small erosional forms; 33 – erosion-denudation remnants in the bottoms of valleys; 34 – the surface of lacustrine-glacial accumulation; 35 – fragments of water-glacial valleys. *The relief created by complex denudation* (high plains and low mountains): 36 – gently undulating interfluves; 37 – hilly-ridged interfluves

Геоморфологическая позиция антропогенного рельефа в обследованных населенных пунктах

Формы и элементы рельефа, затронутые антропогенной трансформацией	Площадь антропогенных форм в населенных пунктах, га						
	п. Харп	Обской (микрорайон г. Лабытнанги)	г. Лабытнанги (без микрорайона Обской)	г. Салехард	с. Аксарка		
Насыпи (площадные)							
Поймы рек	0,1	0,7	169,0	41,6	4,0		
I НПТ	34,2		12,8	56,9			
II НПТ	6,1		82,6	155,6	42,0		
III–IV НПТ (аллювиально-морские)			42,4	158,2	33,0		
Эрозионные склоны	23,8	0,5	67,8	19,5	3,9		
Долинные зандры, озерно-ледниковые котловины	–	156,6					
Поверхности выравнивания на междуречьях	38,1						
Общая площадь	103,2	157,8	374,6	431,9	82,9		
Карьеры и мелкие выемки							
Поймы рек	45,6	–	–	0,4	–		
I НПТ	6,2		–	–			
II НПТ	2,5		21,3	79,3	15,0		
III–IV НПТ (аллювиально-морские)			5,7	7,4	8,1		
Эрозионные склоны	10,5	–	7,2	114,4	0,3		
Долинные зандры, озерно-ледниковые котловины	–	–					
Поверхности выравнивания на междуречьях	46,3						
Общая площадь	111,1	0,0	34,2	201,5	23,4		
Участки выравнивания рельефа, в т. ч. искусственно террасированные склоны							
Поймы рек	–	1,2	17,4	152,7	0,3		
I НПТ	108,3		63,2	359,4			
II НПТ	18,1		244,7	447,3	38,5		
III–IV НПТ (аллювиально-морские)			127,3	155,9	7,1		
Эрозионные склоны	27,2	6,4	227,2	79,0	9,7		
Долинные зандры, озерно-ледниковые котловины	26,1	114,8					
Поверхности выравнивания на междуречьях	9,3						
Общая площадь	189,0	122,4	679,8	1 194,3	55,6		
Площадь зоны трансформации естественного рельефа в результате хозяйственного освоения							
	Поймы рек	I НПТ	II НПТ	III–IV НПТ	Эрозионные склоны	Водно-ледниковый рельеф	Поверхности выравнивания
Общая площадь всех участков прямой трансформации в пределах формы или элемента рельефа, га	433,0	640,9	1 153,1	545,1	597,5	297,5	84,4
% от общей площади антропогенного рельефа	11,5	17,1	30,8	14,6	15,9	7,9	2,2

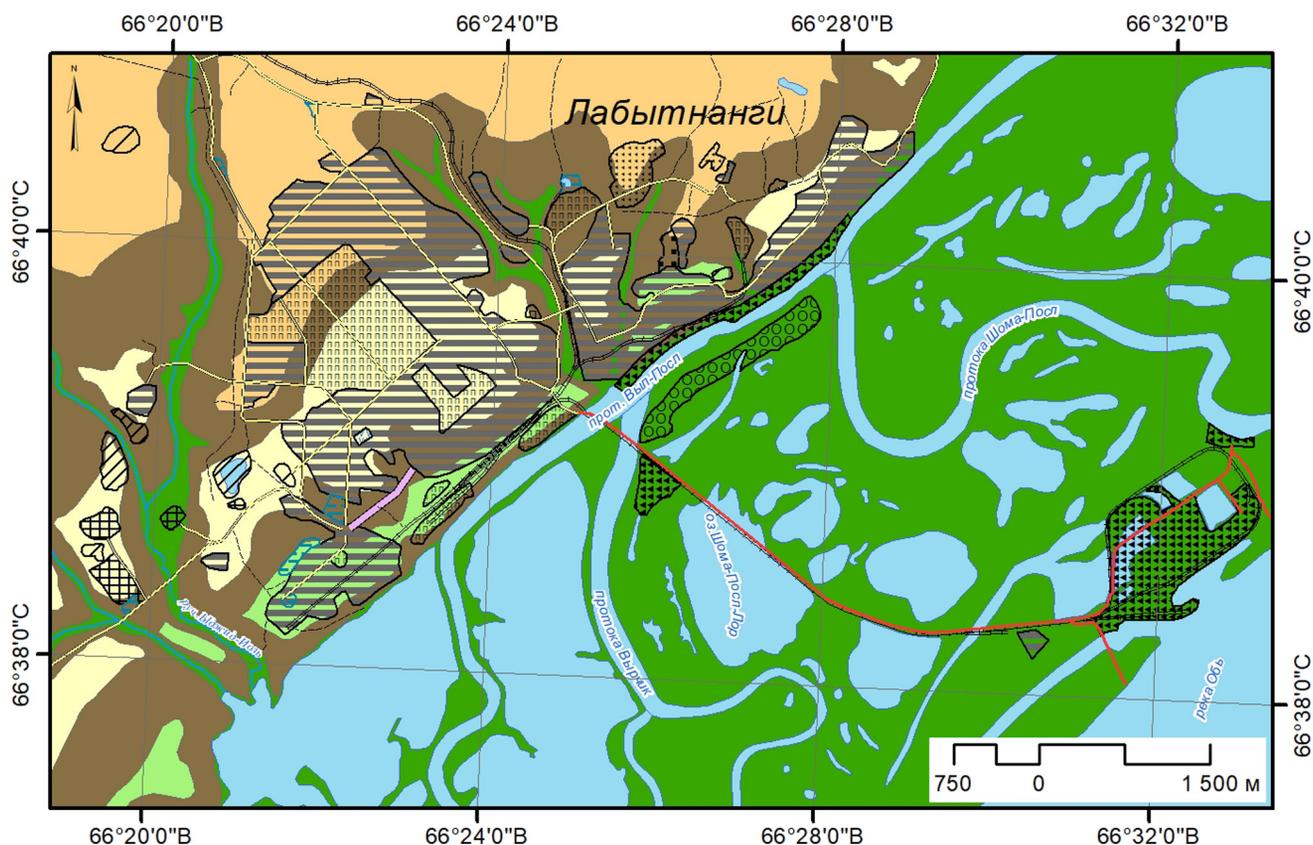


Рис. 3. Геоморфологическое строение и антропогенная трансформация рельефа в г. Лабытнанги. Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 3. Geomorphologic structure and the anthropogenic transformation of relief in the Kharp settlement and its neighborhood. For legend see fig. 2

В административные границы Лабытнанги входит микрорайон Обской, расположенный в 6 км к северо-западу от города (см. рис. 1), в пределах поверхности озерно-ледниковой аккумуляции позднелепистоценового возраста, прорезаемой долиной р. Вындяда. Жилые кварталы поселка занимают приподнятые участки междуречья Ханмея и Вындяды, разделяющие их понижения заняты небольшими термокарстовыми озерами (рис. 4). Антропогенный рельеф представлен песчано-гравийными насыпями (дорожными и под производственными объектами, в том числе инфраструктурой крупной ж/д станции «Обская») высотой до 5 м (56% площади, 305 га). Жилые кварталы, в основном, возведены на искусственно выровненной поверхности (122 га). Плоский характер поверхности озерно-ледниковой аккумуляции, высокая льдистость суглинистых отложений и отсутствие дренажных сооружений предопределили широкое развитие естественного и антропогенно стимулированного термокарста (39 га – наибольшие площади среди всех обследованных населенных пунктов).

Антропогенная трансформация рельефа в г. Салехарде. Жилые кварталы и большая часть

промышленных объектов административного центра ЯНАО (численность постоянного населения города – 50 976 чел. на 01.01.2020 [Численность..., 2020]) располагаются в пределах I и II НПТ р. Оби (возраст – позднелепистоценовый, сложены песками и супесями, абсолютные высоты 20–30 м) в районе ее слияния с р. Полуей (рис. 5). Северная часть города, где располагаются участки сельскохозяйственных угодий (ныне заброшенные), добычи песчано-гравийного сырья (заброшенные), аэропорт и отдельные небольшие производственные объекты, занимает возвышенную часть междуречья (Ангальский мыс) с абсолютными отметками высот 80–100 м (III и IV аллювиально-морские террасы, возраст – позднелепистоценовый, сложены песками, супесями, реже – суглинками). На территории города естественный рельеф выровнен в ходе строительства, и его перегибы сильно сглажены. Более 90% жилых кварталов возведены на искусственно выровненной поверхности террас без масштабных отсыпок, участки террасирования рельефа отмечены фрагментарно (на эрозионном склоне долины Полуи). Общая площадь участков выравнивания составляет 1194 га (см. табл. 2).

Промышленные объекты и дороги расположены на песчано-гравийных и щебнистых насыпях высотой до 5 м (в основном до 2 м) (404 и 174 га соответственно). Связано это, в том числе, с положением производственных зон: они удалены от бровок террас более чем на 1 км. На этих участках затруднен дренаж, и кровля многолетней мерзлоты поднимается близко к поверхности. Насыпи поли-

гонов складирования ТБО расположены к юго-востоку от города и в районе аэропорта (высота 4–6 м, общая площадь – 15 га). Отрицательные формы антропогенного рельефа представлены карьерами по добыче ПГС (глубина до 15 м, частично заброшены) и дренажными каналами глубиной до 3 м (216 га). Немногочисленные выемки иного назначения приурочены к участкам «таликов».

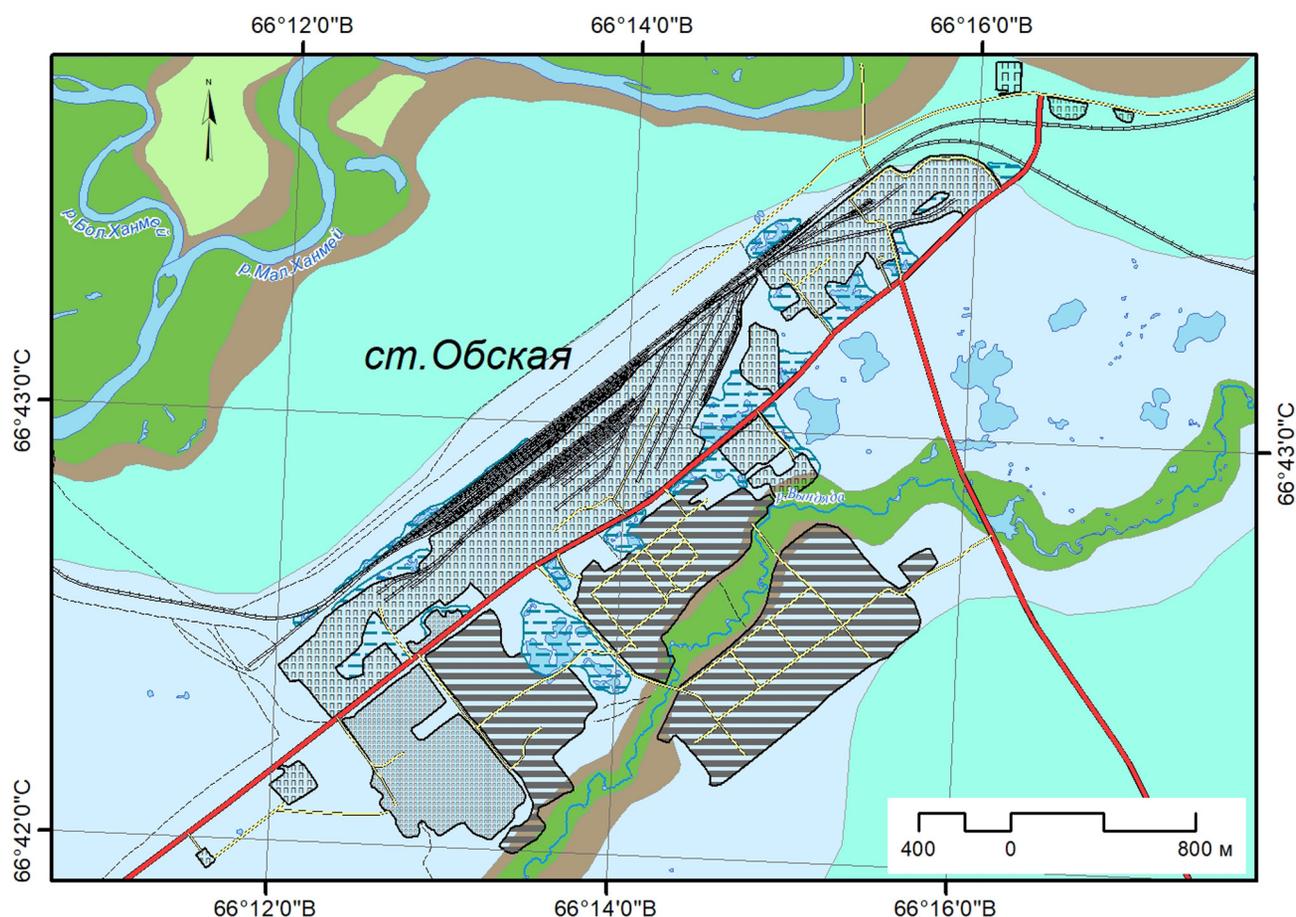


Рис. 4. Геоморфологическое строение и антропогенная трансформация рельефа в микрорайоне Обской г. Лабитнанги. Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 4. Geomorphologic structure and the anthropogenic transformation of relief in the Obsky microdistrict of the town of Labytnangi. For legend see fig. 2

Косвенная трансформация рельефа проявляется локально по периферии насыпей, вдоль трубопроводов и на пахотных угодьях. В частности, в Салехарде берет начало региональная автомобильная дорога Салехард–Надым (сооружена на насыпи высотой до 4 м), в притрассовой полосе которой зафиксированы локальные проявления термокарста и заболачивания. В самом городе участки антропогенно спровоцированного проявления этих неблагоприятных процессов сравнительно редки и сосредоточены в зоне промышленного освоения (25 га). Некогда обширные пахотные угодья (с 1907 по 2007 г. в Салехарде работала опытная

станция НИИ полярного земледелия, животноводства и промышленного хозяйства [Моргун, Абакумов, 2019]) сегодня по большей части заброшены (около 120 га). Обрабатываемые поля сохранились лишь к юго-востоку от города на хорошо дренированной супесчаной поверхности поймы и I НПТ, их общая площадь составляет около 30 га (возделываются с 1933 г. [Моргун, Абакумов, 2019]). В весеннее время здесь развивается дефляция и бороздовая эрозия.

Салехард – наибольший по площади и численности населения из всех рассматриваемых населенных пунктов, на его долю приходится 38% площади всех выявленных положительных ан-

тропогенных форм, 54% – отрицательных и 53% участков выравнивания рельефа при освоении. Широкое распространение выемок – следствие активной добычи ПГС в прошлом при масштабном жилищном, транспортном и промышленном строительстве.

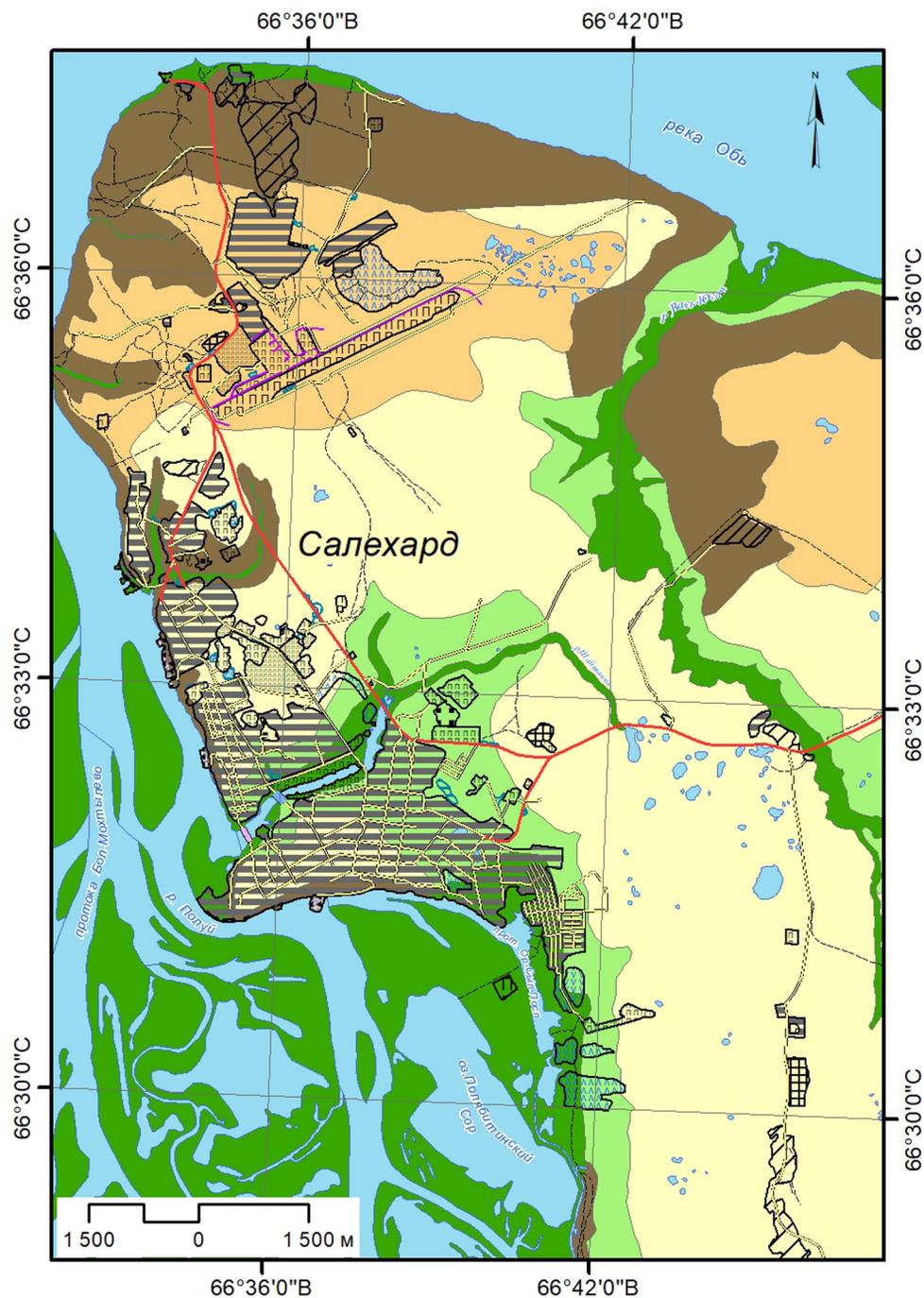


Рис. 5. Геоморфологическое строение и антропогенная трансформация рельефа в г. Салехарде. Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 5. Geomorphologic structure and the anthropogenic transformation of relief in the town of Salekhard. For legend see fig. 2

Антропогенная трансформация рельефа в с. Аксарка. Село Аксарка расположено на высоком правом берегу Оби в 60 км к востоку от Салехарда (численность постоянного населения – 4929 чел. на 01.01.2020 [Численность..., 2020]). История хо-

зяйственного освоения насчитывает более 100 лет (в 1900 г. здесь был открыт филиал консервного завода). Основные типы природопользования – рыболовство, сельскохозяйственное (в прошлом – земледелие, в настоящее время – стойловое

животноводство) и селитебное. Село располагается на поверхности II НПТ Оби и лишь его периферийные части (в основном – участки ИЖС) поднимаются на поверхности III–IV аллювиально-морской террасы (междуречье Оби и р. Первый Лог) (рис. 6). Рельеф расчленен небольшими по длине, но глубо-

кими долинами ручьев – правых притоков Оби, что обеспечивает в целом хорошую дренированность поверхности. Многолетнемерзлые грунты имеют сплошное распространение, их кровля несколько снижается вблизи бровки долины Оби и в долинах ручьев.

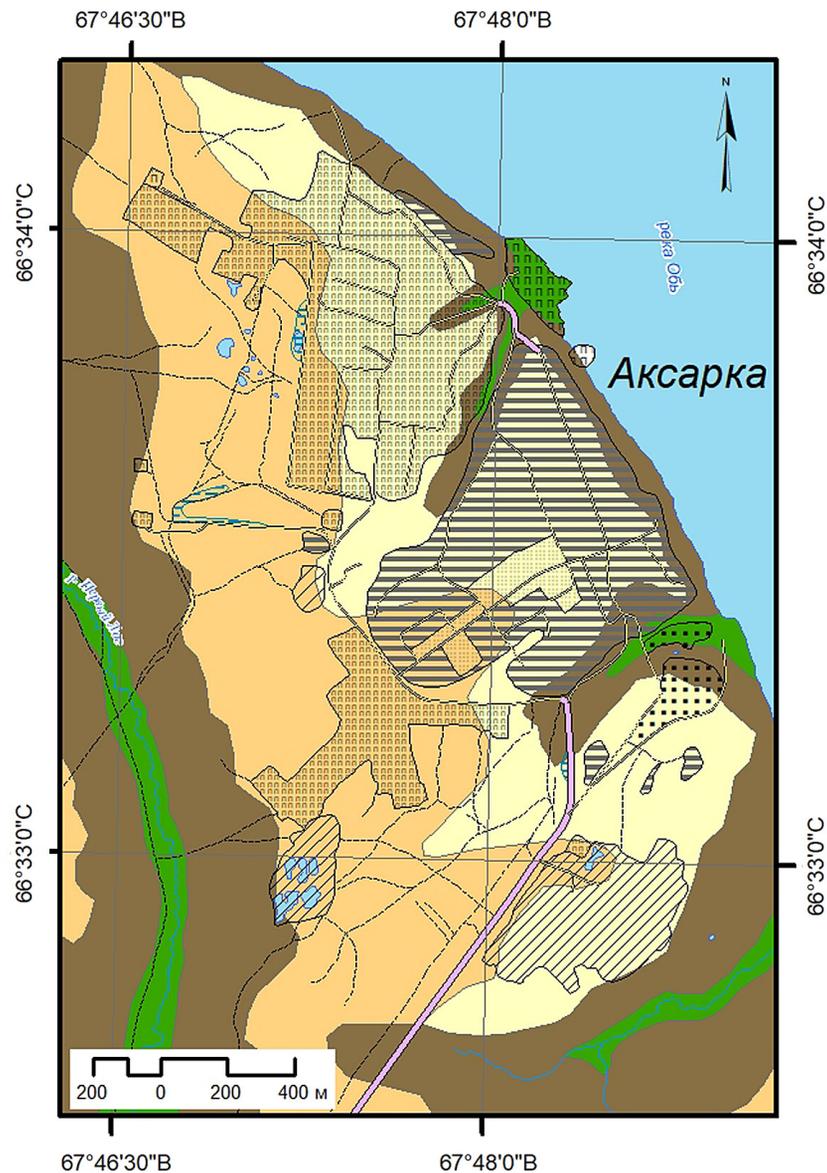


Рис. 6. Геоморфологическое строение и антропогенная трансформация рельефа в с. Аксарка.
Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 6. Geomorphologic structure and the anthropogenic transformation of relief in the village of Aksarka.
For legend see fig. 2

Антропогенный рельеф села представлен песчано-гравийными насыпями автодорог и площадными насыпями под жилой застройкой (общая площадь – 83 га, см. табл. 2) высотой до 2 м, реже – до 5 м (в районе порта). Они сооружались на плоских и слабодренированных поверхностях террас лишь там, где развиваются процессы термокарста и забо-

лачивания (тыловые части террас и уровень междуречий, где в составе отложений присутствуют прослойки и линзы супесей и суглинков). В центральной части села рельеф изменен выравниванием и террасированием. Отрицательные антропогенные формы представлены крупными (до 10 м глубиной) песчаными карьерами к югу от села (в основном

заброшены, 23 га). Геоморфологическая позиция и литологический состав поверхностных грунтов во многом предопределили характер антропогенной трансформации рельефа: на хорошо дренированных участках локальных водоразделов, сложенных песчаным аллювием, необходимости в сооружении насыпей не было, и площадки строительства лишь выравнивались (56 га). Косвенная трансформация рельефа развита ограниченно (заболачивание и термокарст зафиксированы лишь вблизи крупных насыпей, общая площадь таких участков – около 4 га).

Результаты выполненных работ показывают, что на территории Нижнего Приобья прямая трансформация рельефа при освоении существенно преобладает над косвенной (площадь подверженных ей участков составляет 42,6 км² и 3,7 км² соответственно). При этом к участкам косвенной трансформации были отнесены, безусловно, не все участки тундры и лесотундры, где «оставила свой след» в микро-рельефе деятельность человека (их минимальный учитываемый размер составил 30×30 м, таким образом, отдельные мелкие несанкционированные свалки, пожарища и остовы зданий не учитывались, как и колеи от проезда большегрузной вездеходной техники). Среди положительных антропогенных форм распространены площадные (в т. ч. отвалы карьеров, свалки ТБО и опилок) и дорожные песчано-гравийные и щебнистые насыпи, общей площадью 16,4 км² и объемом около 30 млн м³. Отрицательные формы антропогенного рельефа представлены карьерами и выемками, дренажными канавами (общая площадь 3,8 км², объем около 25 млн м³). Высота (глубина) антропогенных форм определяется их функциональным назначением (наиболее крупные формы образованы в районах горнодобычи), а крутизна склонов – составом слагающих отложений (для песчано-гравийных отложений – до 25–30°, для щебня и глыб – до 40°). Велика площадь участков искусственного выравнивания рельефа без отсыпок – до 22,4 км². Исключительно косвенная трансформация рельефа характерна для сельскохозяйственных угодий (в т. ч. огородов), где отмечается активизация процессов линейной (бороздовой) эрозии и дефляции (локально, в пределах не более 1,5 км², см. табл. 1). Кроме того, в результате подпруживания поверхностного стока насыпями развиваются процессы подтопления, затопления, заболачивания и термокарст (общая площадь таких участков в черте населенных пунктов – около 0,9 км², вдоль связывающих их трасс трубопроводов, автомобильных и железных дорог – около 1,3 км²).

Для сравнения, в пределах Воркутинского промышленного района (ВПП) (его площадь вдвое больше, чем изучаемый участок Нижнего Приобья) площади, подверженные прямой и косвенной транс-

формации, составляют 79 и 65 км² соответственно, а площади выравнивания рельефа при строительстве – менее 1 км² [Еременко и др., 2021]. Установлены две причины таких существенных различий. Нижнее Приобье – это, прежде всего, крупный транспортный узел и административный центр, промышленное производство (за исключением рыбопромысловой отрасли и производства щебня) удовлетворяет, в основном, местные нужды. ВПП – крупный центр горнодобычи (шахтным способом), в ходе которой на поверхность извлекается большой объем «пустой» породы, складываемой в огромных по площади отвалах (площадь отвалов на участках горнодобычи достигает 15 км² [Еременко и др., 2021], в то время как в Нижнем Приобье – менее 0,5 км²). Кроме того, сравниваемые зоны освоения расположены в разных геолого-геоморфологических и геоэкологических условиях. В частности, ВПП расположен в пределах ледниково-аккумулятивной равнины, где широко распространены суглинистые грунты, и многолетняя мерзлота имеет сплошной характер. Строительство капитальных сооружений в таких условиях возможно исключительно на насыпях, вблизи которых возникают обширные очаги активизации термокарста и заболачивания. Зоны хозяйственного освоения Нижнего Приобья занимают, в основном, уровни песчаных надпойменных террас крупных рек, хорошо дренированные поверхности, где кровля мерзлоты нередко опускается ниже 10 м. Как следствие, необходимость в отсыпках грунта при жилищном строительстве возникает далеко не всегда.

Выполненный сравнительный анализ и оценка масштабов антропогенной трансформации показывают, что площади и объемы создаваемых форм рельефа находятся в прямой зависимости от типа природопользования и исходного рельефа территории. Наибольшими масштабами прямого воздействия отличаются участки горнопромышленного освоения, причем чем выше там косвенное воздействие на рельеф, тем ниже эрозионная расчлененность и шире развита многолетняя мерзлота. Селитебное и транспортное освоение уступают по масштабам как прямого, так и косвенного воздействия на рельеф. При этом наименьшие трансформации характерны для населенных пунктов, расположенных в долинах крупных рек, наибольшие – для населенных пунктов на междуречьях.

ВЫВОДЫ

Общая площадь территории Нижнего Приобья, рельеф которой был изменен вследствие хозяйственного освоения, составляет 46,3 км². Участки прямой трансформации рельефа (создание антропогенных форм, выравнивание поверхности и террасирование) занимают в 10 раз большую площадь

в сравнении с ареалами косвенной трансформации (участки развития спровоцированных освоением неблагоприятных и опасных геоморфологических процессов вне ареалов развития антропогенных форм с минимальным размером 30 × 30 м).

Антропогенный рельеф представлен положительными (дорожные и площадные насыпи, отвалы горнодобычи, терриконы, насыпи из продуктов деревообработки, ТБО и строительного мусора) и отрицательными формами (карьеры по добыче песчано-гравийной смеси и щебня, дренажные канавы). Их площадь составляет 16,44 и 3,79 км², а объем – 30,5 и 25,4 млн м³ соответственно. В ходе освоения на значительной части площади (22,4 км²) выполнялось выравнивание микрорельефа и искусственное террасирование склонов.

Косвенная трансформация рельефа при освоении имеет ограниченное распространение (3,7 км²) как в пределах населенных пунктов, так и в их ближайших окрестностях и отмечена лишь на пахотных угодьях (активизация дефляции, делювиального смыва и бороздовой эрозии) и вблизи насыпей (локально).

Наибольшей трансформации в результате хозяйственного освоения Нижнего Приобья под-

вергся естественный рельеф долинного комплекса Оби, Полуя и Соби: 59% от площади ареала прямой трансформации приходится на поймы, I и II надпойменные террасы. При этом освоение пойменных уровней (как и междуречных поверхностей) сопровождается сооружением крупных положительных форм (насыпей), в то время как при строительстве на речных террасах производится, чаще всего, выравнивание рельефа без масштабной отсыпки грунта.

Результаты количественного анализа и сравнения подтверждают, что масштаб антропогенного воздействия (в том числе создаваемых форм антропогенного рельефа) определяется двумя основными факторами – типом природопользования и природными условиями (в частности, геолого-геоморфологическими и геокриологическими). При этом значимость второго фактора на территории Арктической зоны РФ существенно возрастает в сравнении с другими территориями, что обуславливает необходимость комплексной оценки природных условий на перспективных участках освоения с целью снижения затрат и минимизации неблагоприятных и опасных последствий природопользования.

Благодарности. Исследования выполнены Еременко Е.А., Фузеиной Ю.Н. и Бредихиным А.В. за счет средств проекта РФФИ № 18-05-60200, обработка фондовых и архивных материалов выполнена Деркач А.А. в рамках темы госзадания «Эволюция природной среды в кайнозой, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования». Авторы выражают благодарность сотрудникам Городского краеведческого музея г. Лабытнанги Сафроновой И.И. и ГБУ «Ямало-Ненецкий окружной музейно-выставочный комплекс имени И.С. Шемановского» Поленовой Г.А. за предоставленные материалы и содействие в выполнении работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / гл. ред. С.И. Ларин. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
- Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Большов С.И., Фузеина Ю.Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 1. С. 42–56.
- Деттер Г.Ф., Константинова Т.С. Ямал – прошлое, настоящее, будущее // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2016. №3(92). С. 125–131.
- Еременко Е.А., Фузеина Ю.Н., Ворошилов Е.В., Власов М.В., Бредихин А.В. Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 1. С. 3–15.
- Зяматина Н.Ю., Гончаров Р.В. Арктическая урбанизация: феномен и сравнительный анализ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 4. С. 69–82.
- Зах В.А. Многослойное поселение Паром 1 у Салехарда // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 1997. № 1. С. 24–34.
- Иванов А.В., Марченко А.Н., Мулявин С.Ф. Характеристика ресурсной базы Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), история и перспективы развития // Нефтепромышленное дело. 2008. № 12. С. 58–61.
- Ильясов Р.М. Ландшафтно-исторический анализ природопользования Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2015. № 3(88). С. 93–102.
- Колева Г.Ю. Основные этапы освоения арктических зон северо-западной части Западной Сибири // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 4(109). С. 4–11.
- Красовская Т.М., Евсеев А.В. Горячие точки Российской Арктики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2010. № 5. С. 48–52.
- Красовская Т.М., Евсеев А.В. Природопользование Севера России // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 1. С. 90–96.
- Моргун Е.Н., Абакумов Е.В. Исследования в области сельского хозяйства и урожайность сельскохозяйственных культур в ЯНАО: ретроспективный анализ (1932–2019 гг.) // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 3(104). С. 4–9.

- Рогачев С.В. Харп: на Полярном Урале формируется новая сырьевая база черной металлургии // География. Первое сентября. 2008. № 14. С. 33–38.
- Тупахина О.С., Тупахин Д.С. Культурная принадлежность и хронология многослойного поселения Салехард-4 в Нижнем Приобье // Самарский научный вестник. 2019. Т. 8. № 4(29). С. 131–138. DOI: 10.24411/2309-4370-2019-14203.
- Эколого-геоморфологический анализ Арктической зоны Российской Федерации / под ред. Э.А. Лихачевой, А.В. Кошкарёва. М.: Медиа-ПРЕСС, 2020. 120 с.
- Электронные ресурсы
Arctic DEM Explorer. URL: <https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/> (дата обращения 02.06.2020).
- Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям: информационно-аналитические материалы. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 20.06.2020).

Поступила в редакцию 02.04.2021

После доработки 05.06.2021

Принята к публикации 27.07.2021

ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF THE RELIEF OF THE LARGE SETTLEMENTS IN THE LOWER OB REGION

E.A. Eremenko¹, Y.N. Fuzeina², M.V. Vlasov³, E.V. Voroshilov⁴, A.A. Derkach⁵, A.V. Bredikhin⁶

^{1, 2, 4-6} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Palaeogeography*
³ *FRECOM Ltd*

¹ *Assistant professor, Ph.D. in Geography; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com*

² *Assistant professor, Ph.D. in Geography; e-mail: donaldw@bk.ru*

³ *Leading specialist, Ph.D. in Geography; e-mail: vlasov-maxim@mail.ru*

⁴ *Graduate student; e-mail: voroshilov@yahoo.com*

⁵ *Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: derkach1977@yandex.ru*

⁶ *Head of Department, D.Sc. in Geography; e-mail: avbredikhin@yandex.ru*

To assess the scale of anthropogenic transformation of relief during the economic development of the territory of the Lower Ob River region, comprehensive geomorphologic studies were carried out in Salekhard and Labytnangi including the large-scale geomorphologic survey, UAV aerial photography, interpretation of satellite images and analysis of a digital elevation model. It was found that the direct transformation of relief significantly predominates over the indirect one within the territory of the Lower Ob region (the affected areas are 42,6 km² and 3,7 km², respectively). Widespread positive anthropogenic forms include areal ones (quarry dumps, solid waste and sawdust dumps) and road embankments (total area – 16,4 km², volume – about 30 million m³). Negative forms are represented by quarries and excavations, as well as drainage ditches (3,8 km² and approx 25 million m³). The morphological parameters of anthropogenic forms have been determined and their functional dependence has been shown. The area of artificial surface leveling and terracing was up to 22,4 km², indirect transformation of relief (areas of thermokarst activation, linear erosion and deluvial washout) is pronounced over 3,7 km². Natural relief of the valley complex of the Ob, Poluy and Sob rivers has undergone the greatest transformation as a result of the economic development in the Lower Ob River region: floodplains and river terraces account for 59% of the direct transformation area. The development of floodplain levels (as well as the interfluves) is accompanied by the construction of large positive forms (embankments), while during construction on river terraces relief is most often leveled without large-scale dumping of ground. It is shown that the scale of anthropogenic impact, including man-made forms of relief, is determined by two main factors, i. e. the type of land-use and the natural conditions, for example geological-geomorphologic and geocryological ones. The importance of the second factor significantly increases within the Arctic zone of the Russian Federation in comparison with other territories. Thus, it becomes necessary to perform a complex assessment of natural conditions for the prime areas of development in order to reduce expenses and minimize adverse and dangerous effects of nature management.

Keywords: Kharp, Labytnangi, Salekhard, Aksarka, anthropogenic relief, human impact, economic development of the Arctic

Acknowledgements. The studies carried out by E.A. Eremenko, Yu.N. Fuzeina. and A.V. Bredikhin were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60200); stock and archival materials were processed by A.A. Derkach within the framework of the state assignment theme “Cenozoic evolution of the environment, the dynamics of the relief, geomorphological hazards and risks of land-use”. Authors express their gratitude to I.I. Safronova (Municipal Local History Museum of Labytnangi) and G.A. Polenova (The Shemanovsky Yamalo-Nenets Museum-Exhibition Complex) for their assistance and provided materials.

REFERENCES

- Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug] (Ed. S.I. Larin), Omsk, Omskaja kartograficheskaja fabrika, 2004, 303 p. (In Russian)
- Bredikhin A.V., Eremenko E.A., Kharchenko S.V., Belyaev Ju.R., Romanenko F.A., Bolysov S.I., Fuzeina Yu.N. Rajonirovanie rossijskoj Arktiki po tipam antropogennogo osvoenija i soputstvujushhej transformacii rel'efa na osnove klasternogo analiza [Regionalization of the Russian Arctic according to the types of anthropogenic development and associated relief transformation by applying the cluster analysis], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 1, p. 42–56. (In Russian)
- Detter G.F., Konstantinova T.S. Jamal – proshloe, nastojashhee, budushhee [Yamal – past, present and future], *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug*, 2016, no. 3(92), p. 125–131.
- Ekologo-geomorfologicheskij analiz Arkticheskoy zony Rossijskoj Federatsii* [Ecologo-geomorphological analysis of the Arctic zone of the Russian Federation], E.A. Likhacheva, A.V. Koshkarev (eds.), Moscow, Media-PRESS Publ., 2020, 120 p. (In Russian)
- Eremenko E.A., Fuzeina Yu.N., Voroshilov E.V., Vlasov M.V., Bredikhin A.V. Antropogennaya transformatsiya rel'efa Vorkutinskogo promyshlennogo raiona [Anthropogenic transformation of relief in Vorkuta industrial region], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 1, p. 3–15. (In Russian)
- Il'jasov R.M. Landshaftno-istoricheskij analiz prirodopol'zovaniya Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Landscape-historical analysis of the nature management of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug], *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug*, 2015, no. 3(88), p. 93–102. (In Russian)
- Ivanov A.V., Marchenko A.N., Muljavin S.F. Harakteristika resursnoj bazy Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga (YaNAO), istorija i perspektivy razvitija [Characteristics of the resource base of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, history and development prospects], *Neftepromyslovoe delo*, 2008, no. 12, p. 58–61. (In Russian)
- Koleva G.Ju. Osnovnye etapy osvoenija arkticheskikh zon severo-zapadnoj chasti Zapadnoj Sibiri [The main stages of the development of Arctic zones in the northwestern part of Western Siberia], *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug*, 2019, no. 4(109), p. 4–11. (In Russian)
- Krasovskaja T.M., Evseev A.V. Gorjachie tochki Rossijskoj Arktiki [Hot spots of the Russian Arctic], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2010, no. 5, p. 48–52. (In Russian)
- Krasovskaja T.M., Evseev A.V. Prirodopol'zovanie Severa Rossii [Nature management of the Russian North], *Theoretical and Applied Ecology*, 2008, no. 1, p. 90–96. (In Russian)
- Morgun E.N., Abakumov E.V. Issledovaniya v oblasti sel'skogo hozjajstva i urozhajnost' sel'skohozjajstvennykh kul'tur v YaNAO: retrospektivnyj analiz (1932–2019 gg.) [Research in the field of agriculture and crop yields in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: a retrospective analysis (1932–2019)], *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug*, 2019, no. 3(104), p. 4–9. (In Russian)
- Rogachev S.V. Harp: na Poljarnom Urale formiruetsja novaja syr'evaja baza chernoj metallurgii [Kharp: a new raw material base of ferrous metallurgy is being formed in the Polar Urals], *Geografija. Pervoe sentjabrja*, 2008, no. 14, p. 33–38. (In Russian)
- Tupahina O.S., Tupahin D.S. Kul'turnaja prinadlezhnost' i hronologija mnogoslojnogo poselenija Salehard-4 v Nizhnem Priob'e [Cultural affiliation and chronology of the Salekhard-4 multilayer settlement in the Lower Ob River region], *Samara Journal of Science*, 2019, vol. 8, no. 4(29), p. 131–138, DOI: 10.24411/2309-4370-2019-14203. (In Russian)
- Zah V.A. Mnogoslojnoe poselenie Parom 1 u Saleharda [Parom 1 multilayer settlement near Salekhard], *Vestnik Arheologii, Antropologii i Etnografii*, 1997, no. 1, p. 24–34. (In Russian)
- Zamyatina N.Yu., Goncharov R.V. Arkticheskaja urbanizacija: fenomen i sravnitel'nyj analiz [Arctic urbanization: a phenomenon and a comparative analysis], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 4, p. 69–82. (In Russian)

Web sources

- Arctic DEM Explorer, URL: <https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/> (access date 02.06.2020).
- Chislennost' naseleniya Rossijskoj Federatsii po munitsipal'nym obrazovaniyam: informatsionno-analiticheskie materialy. Rosstat [The population of the Russian Federation by municipalities: information and analytical materials. Rosstat], URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (access date 20.06.2020).

Received 02.04.2021

Revised 05.06.2021

Accepted 27.07.2021

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.466, 551.559

**ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ
КАРСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ
КОНФИГУРАЦИИ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ**

В.С. Платонов¹, С.А. Мысленков², В.С. Архипкин³, А.В. Кислов⁴

¹⁻⁴ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

¹ *Кафедра метеорологии и климатологии, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: vplatonov86@gmail.com*

² *Кафедра океанологии, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: stasocan@gmail.com*

³ *Кафедра океанологии, канд. геогр. наук, доц.; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com*

⁴ *Зав. кафедрой метеорологии и климатологии, д-р геогр. наук, проф.; e-mail: avkisllov@mail.ru*

Прибрежные зоны в Арктике характеризуются разнообразием опасных гидрометеорологических явлений, включая большие скорости ветра, штормовое волнение и нагоны. Обилие островов, горных хребтов и изрезанная береговая линия в Карском море способствуют возникновению мезомасштабных атмосферных циркуляций, что во многом определяет структуру прибрежных течений. В условиях разреженной наблюдательной сети для воспроизведения и исследования гидрометеорологических характеристик в данной работе применяется высокоразрешающее моделирование полей ветра, волнения, уровня и течений. Проведены эксперименты с мезомасштабной негидростатической атмосферной моделью COSMO-CLM для региона Карского моря с горизонтальным разрешением ~12 и ~3 км. В отличие от глобального реанализа NCEP/CFSR, модель с разрешением ~3 км оказалась способна воспроизводить такие явления, как мысовые струи, подветренные бури и вихревые цепочки в шхерах различного размера. Это является важным аспектом при использовании полей ветра COSMO-CLM в качестве форсинга при моделировании волнения и нагонов. Для моделирования волнения использована модель WAVEWATCH III, а для уровня и течений – ADCIRC. При моделировании волнения с использованием полей ветра высокого разрешения при ветрах с моря на берег отличия от реализации, использующей реанализ NCEP/CFSR, минимальны, а для ветра с берега на море влияние локальных ветровых условий вносит существенные изменения. При моделировании уровня моря с использованием полей ветра высокого разрешения в узких заливах и губах наблюдаются существенные отличия от реализации на основе реанализа NCEP/CFSR. Наибольшие рассчитанные величины нагонов в Карском море отмечаются в южной части Обской губы – до 2,5 м. Формирование нагонов в Обской губе происходит значительно чаще (примерно в 2 раза), чем в Байдаракской. Многолетние тренды изменения количества нагонов находятся в противофазе – в период с 1995 по 2005 гг. в Байдаракской губе наблюдалось наименьшее количество нагонов, в то время как в Обской губе, наоборот, наибольшее.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование высокого разрешения, ветровое волнение, ветровые нагоны, COSMO-CLM, WAVEWATCH III, ADCIRC, Карское море

ВВЕДЕНИЕ

Климат и экстремальные погодные явления в Арктике привлекают все большее внимание в связи арктическим усилением глобального потепления и сопутствующими изменениями природной среды, в частности рост температуры здесь наибольший на всем земном шаре [Johannessen, 2016]. Основной вклад в «арктическое усиление» глобального потепления вносят динамические процессы в атмосфере, осуществляющие перенос тепла к полюсу, «атлантификация» Северного Ледовитого океана (СЛО) и сокращение площади ледяного покрова в летний период [Polyakov et al., 2017; Vihma, 2014;

Vekryaev et al., 2010]. Освобождение поверхности СЛО ото льда также благоприятствует увеличению повторяемости экстремальных ветров и ветрового волнения [Francis, Vavrus, 2012].

Карское море и прилегающий материковый регион во многих чертах отражают эти основные особенности. Потепление в регионе Баренцева и Карского морей имеет не только региональный климатический эффект, но и через обратные связи в климатической системе оказывает влияние на Арктическое колебание [Yang et al., 2016], температурный режим над Евразией и, в частности, Сибирским регионом [Petoukhov, Semenov, 2010; Outten, Esau, 2012] и др.

Прибрежные районы в Арктической зоне характеризуются наиболее опасными гидрометеорологическими явлениями (ОЯ), обусловленными сочетанием крупномасштабных гидродинамических условий, особенностей подстилающей поверхности и мезомасштабных циркуляций (каньонные ветры, мысовые струи, барьерные эффекты, полярные мезоциклоны, подветренные бури [Moore, Renfrew, 2005; Shestakova et al., 2020]). Например, развитие и перемещение полярных мезоциклонов может вносить существенный вклад в формирование значительного волнения и штормовых нагонов [Дианский и др., 2019; 2020] в морях западного сектора Российской Арктики. Такие ОЯ, как экстремальные скорости ветра, волнение и штормовые нагоны в узких заливах и губах оказывают разрушительное воздействие на прибрежную портовую, транспортную инфраструктуру, объекты шельфовой нефте- и газодобычи, приводят к значительному материальному ущербу, а иногда и человеческим жертвам.

Скудость наземной наблюдательной метеорологической сети в Арктике, недостаточность имеющихся средств измерений, а также нерегулярность детализированной спутниковой информации приводят к необходимости использования ориентированных на процессы мезомасштаба данных моделирования, в том числе и высокого разрешения. Данные глобальных реанализов – например, ERA-Interim [Dee et al., 2011], ERA-5 [Hersbach et al., 2020], NCEP/CFSR [Saha et al., 2010] – имеют слишком грубое пространственное разрешение, чтобы адекватно воспроизводить метеорологические процессы в прибрежных зонах, а также опасные явления, обусловленные мезомасштабными и конвективными процессами. Отдельно стоит упомянуть Арктический реанализ (Arctic System Reanalysis, ASR v1 и v2) [Bromwich et al., 2018] и COSMO-CLM Russian Arctic hindcast [Platonov, Varentsov, 2021], которые являются единственными на данный момент примерами создания региональных модельных архивов в Арктике в длительных (17 и 37 лет соответственно) временных масштабах. Однако даже шаг сетки в 12–15 км позволяет воспроизводить явления с горизонтальным масштабом лишь порядка 50 км и более, что, безусловно, исключает из возможного анализа большой спектр опасных процессов мезо- α и частично мезо- β масштаба.

Большинство работ, посвященных ветровому волнению в Карском море, выполнено на основе результатов моделирования либо анализа спутниковых данных, т. к. прямые измерения практически отсутствуют. В работах [Дианский и др., 2014; Stopa et al., 2016; Duan et al., 2019; Myslenkov et al., 2021] рассмотрены основные особенности моделирования волнения в Карском море. В некоторых работах отмечено,

что площадь ледяного покрова в последнее десятилетие (2007–2018) уменьшается [Serreze, Stroeve, 2015], а высота волн увеличивается [Li et al., 2019].

Работ, посвященных непосредственному исследованию штормовых нагонов в Карском море, очень мало. В работе [Добровольский, Залогин, 1982] указано, что сгонно-нагонные колебания уровня в Карском море на материковом берегу могут быть более 1 м, а в заливах и губах в сезонах безо льда превышать 2 м. В статьях [Ашик и др., 1989; Ашик, 1994, 1997] основной упор делается лишь на численный прогноз сгонно-нагонных колебаний без дополнительных исследований механизмов их возникновения. При этом используемая расчетная сетка с большим пространственным шагом не дает возможности учесть влияние небольших островов и изрезанности береговой линии на динамику нагона. В других работах, где затрагиваются некоторые аспекты колебаний уровня в Карском море, сгонно-нагонные явления отдельно не рассматриваются [Дианский и др., 2014; Борисов, Раевский, 2016].

Наблюдения за уровнем в Карском море в настоящее время ведутся всего лишь на нескольких гидрометеорологических постах, удаленных друг от друга на сотни километров [Атлас..., 2007]. Учитывая сильную изрезанность береговой линии, наличие большого количества островов, архипелагов, фьордов, заливов и губ, а также большую временную дискретность наблюдений за уровнем моря на этих постах, не представляется возможным изучение закономерностей формирования штормовых нагонов и их пространственно-временной изменчивости по этим данным.

При этом именно в прибрежных зонах гидрометеорологическая информация высокого разрешения наиболее важна и востребована для широкого круга потребителей, строительства инфраструктуры, обеспечения морских операций в Арктике и других задач. С учетом растущего числа ОЯ [Cohen et al., 2018] и перспектив по освоению арктического побережья и Северного морского пути особую актуальность приобретает задача обеспечения региона детализированной гидрометеорологической информацией с горизонтальным разрешением по крайней мере в несколько километров. Основным методом исследования мезомасштабной динамики атмосферы, волнения и физических механизмов формирования опасных явлений, штормовых нагонов и их изменчивости в Карском море несомненно является использование высокоразрешающего численного моделирования.

Основной целью данной работы является исследование возможностей высокоразрешающего гидродинамического моделирования воспроизводить особенности атмосферной циркуляции, волнения

и штормовых нагонов в прибрежных зонах на примере такого сложного объекта, как Карское море, в условиях неоднородностей подстилающей поверхности на различных пространственных масштабах. В работе выполнен анализ полей ветра и волнения, нагонов в шхерах и заливах пространственного масштаба 2–15 км.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование атмосферы моделью COSMO-CLM. В качестве основного инструмента моделирования динамики атмосферы использовалась негидростатическая модель COSMO-CLM (версия 5.0) [Böhm et al., 2006; Rockel, Geyer, 2008]. Эта региональная мезомасштабная модель разрабатывается одноименным консорциумом (Consortium for Small-scale Modeling), включающим в себя национальные службы прогноза погоды ряда стран, развитие климатической версии модели осуществляется в рамках международного научного сообщества CLM-Community [The Climate..., 2005].

Модель COSMO-CLM (CCLM) основана на уравнениях Рейнольдса, описывающих динамику сжимаемой жидкости во влажной атмосфере. Модельные уравнения решаются на широтно-долготной сетке со смещенным положением Северного полюса, за счет чего минимизируется проблема сходимости меридианов в точке полюса. Численная схема реализована на сетке Аракавы типа C [Arakawa, Lamb, 1977]. В роли вертикальной координаты выступает гибридная координата Гал-Чена μ (σ - z -система), представленная аналогом σ -координаты от земной поверхности (Z_0) до промежуточного уровня Z_F , а выше уровня Z_F – обычной Z -координатой [Gal-Chen, Sommerville, 1975; Schär et al., 2002]. Существует возможность использования «спектрального наджинга» [Storch von et al., 2000]. Более подробное описание модели и ее документация приведены в [Cocle..., 2003].

Конфигурация модели была адаптирована с учетом специфики гидрометеорологических условий Арктического региона, в частности увеличено количество вертикальных уровней модели для лучшего разрешения процессов в приземном слое (50 уровней всего, в том числе в пограничном слое – до 10 уровней, высота нижнего уровня – 20 м). Это важно в том числе для корректного воспроизведения полей приземного ветра, которые являются основным предметом исследования в данной работе. Увеличение вертикального разрешения модели способствует более успешному воспроизведению, в частности, экстремальных скоростей ветра и порывов, алгоритм расчета которых в модели достаточно прост [Schulz, Heise, 2003; Platonov, Varentsov, 2018].

В данной работе эксперименты проводились по стандартной схеме «вложенных сеток», т. е. на «базовой расчетной области» в качестве начальных и граничных условий использовались данные глобального реанализа ERA-Interim с горизонтальным шагом сетки $0,7^\circ$ (~75 км) [Dee et al., 2011], а на вложенной расчетной области использовались выходные данные моделирования на базовой расчетной области с уменьшением горизонтального разрешения и района моделирования. Базовая расчетная область с разрешением $0,12^\circ$ (~13 км) охватывает, помимо Карского моря, Северную Атлантику, Баренцево море и приполярные районы. Такой охват учитывает преобладание западных процессов атмосферной циркуляции в регионе, а также распространение и влияние волнения и зыби в Атлантике на процессы в Карском море. Вложенная область моделирования с разрешением $0,03^\circ$ (~2,8–3 км) полностью охватывает акваторию Карского моря, имея также некоторое распространение на запад. Карта с границами расчетных областей приведена на рисунке 1. Далее в тексте эксперименты на расчетных областях с разрешением ~13 и ~3 км носят названия CCLM13 и CCLM3.

Эксперименты по описанной схеме проводились для двух периодов: август–октябрь 2012 г. и июль–сентябрь 2014 г. Все расчеты выполнялись на СК «Ломоносов-2» вычислительного комплекса МГУ [Voevodin et al., 2019]. Конфигурация модели была выбрана из различных вариантов на основе верификации по скорости ветра на метеорологических станциях Карского моря [Platonov, Kislov, 2020]. В окончательном варианте, рассматриваемом далее, использовался «спектральный наджинг» [Storch von et al., 2000] и увеличенный шаг по времени – 100 секунд. Данные о концентрации морского льда и температуре поверхности океана брались из данных реанализа ERA-Interim и обновлялись каждые шесть часов.

Моделирование ветрового волнения моделью WAVEWATCH III. Для расчета параметров ветрового волнения в Карском море использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07 [Tolman, 2019]. Эта волновая модель учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерные для закрытых и мелководных акваторий, эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах, а также влияние морского льда.

Для генерации волн использована схема ST6, для расчета нелинейных взаимодействий – схема DIA, для учета влияния льда – схема IC0. Для учета воздействия придонного трения используется схема JONSWAP, диссипация волновой энергии параметризуется в зависимости от отношения фазовой и

групповой скоростей волн, а также глубины в точке. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($\Delta\theta = 10^\circ$), частотный диапазон σ – 36 интервалов от 0,03 до 0,843 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового баланса составляет 15 минут, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии – 60 секунд, шаг по времени для передачи энергии по спектру – 450 секунд.

При моделировании волнения проводились эксперименты с использованием данных о ветре из результатов модели COSMO-CLM с разрешением ~ 3 и ~ 13 км (далее в тексте обозначены как WW3-CCLM13 и WW3-CCLM3), а также данных о ветре и концен-

трации льда с шагом по времени 1 час из реанализов NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением $\sim 0,3^\circ$ и NCEP/CFSv2 (2011–2019) с разрешением $\sim 0,2^\circ$ (далее в тексте обозначены как WW3-CFSR). Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 37729 узлов. Данная сетка покрывает акваторию Баренцева и Карского морей, а также всю северную часть Атлантического океана (рис. 2). Для Карского моря шаг составляет 10 км в открытом море и 700 м у берега. Более подробное описание конфигурации модели и особенности ветрового волнения в Карском и Баренцевом морях изложены в работах [Myslenkov et al., 2021; Мысленков, Маркина, 2018; Мысленков и др., 2017].

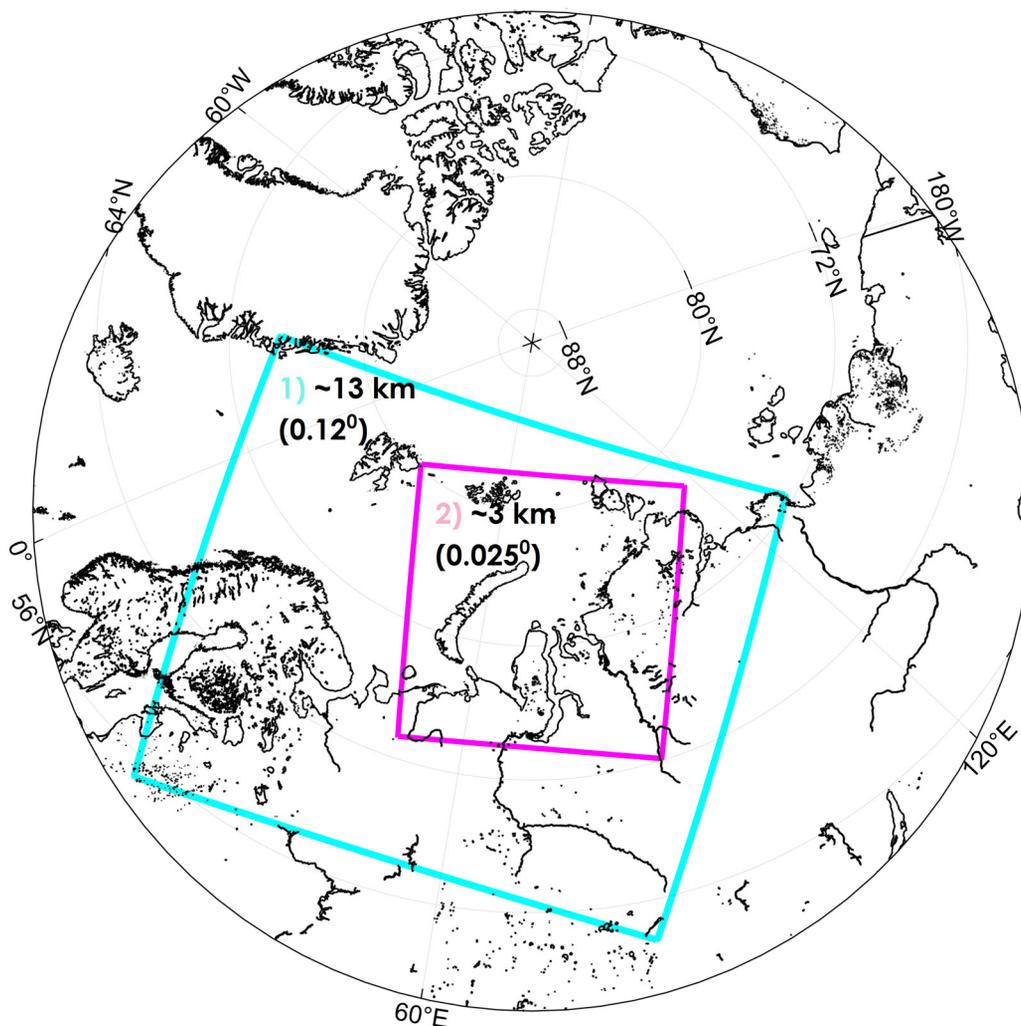


Рис. 1. Схема расположения границ базовой (1) и вложенной (2) расчетных областей COSMO-CLM

Fig. 1. Location of the COSMO-CLM base (1) and nested (2) domains' boundaries

Оценка качества моделирования скорости ветра и волнения с использованием различного ветрового форсинга производилась на основе спутниковых данных о скорости ветра и высоте волн из базы Integrated Marine Observing System (IMOS) [Young, Ri-

bal, 2019] и сравнения их с данными моделирования в ближайшем узле (в пределах 8 км). Статистические характеристики сравнения данных моделирования скорости ветра и высоты волн со спутниковыми данными за период сентябрь–октябрь 2012 г.

приведены в таблице 1. Также результаты моделирования CCLM13 и CCLM3 верифицировались по данным наблюдений метеорологических станций в пределах акватории Карского моря (табл. 2). Результаты сравнений показывают, что реализации CCLM3 и CCLM13 с использованием спектрального наджинга не уступают по качеству реанализу CFSR, как правило, ошибки близки либо несколько меньше. Учитывая, что CCLM3 воспроизводит различные локальные неоднородности в поле ветра с учетом подстилающей поверхности с высоким разрешением [Platonov, Kislov, 2020; Kislov и др., 2018], то использование этого форсинга, вероятно, более целесообразно для прибрежной зоны. Однако, из-за отсутствия данных инструментальных измерений по высоте волн в прибрежной зоне это крайне сложно подтвердить количественно.

Моделирование уровня моря и течений моделью ADCIRC. Для расчетов параметров штормовых нагонов в Карском море была выбрана модель ADCIRC (ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine waters [Blain et al., 2002]). Выбор этой модели обусловлен несколькими причинами: 1) она учитывает практически все силы, формирующие нагоны, а также факторы, влияющие на высоту нагонов; 2) она используется в оперативной практике США для прогноза штормовых нагонов в Мексиканском заливе и у восточного побережья США [Coastal..., 2021]; 3) данные наблюдений за уровнем моря соответствуют результатам моделирования в разных морях, омывающих Россию [Иванова и др., 2015; Кораблина и др., 2017; Pavlova et al., 2020]; 4) модель использует неструктурную расчетную сетку с разным пространственным шагом, что по-

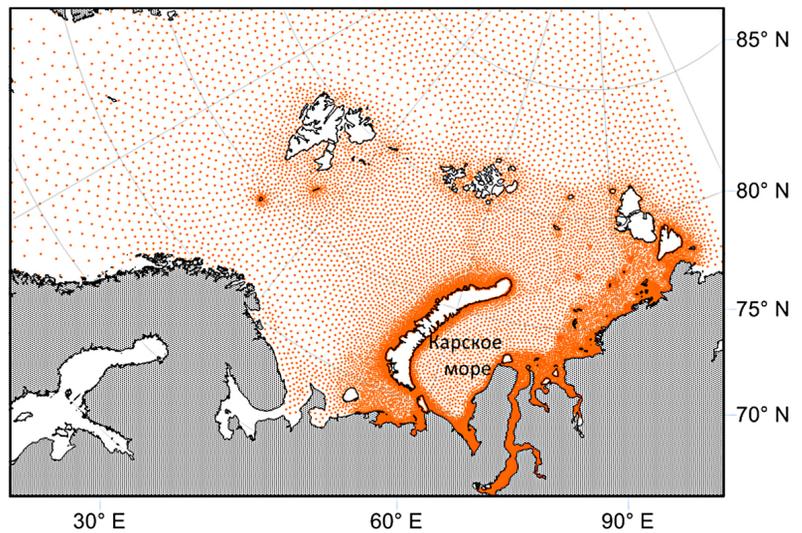


Рис. 2. Неструктурная сетка модели WAVEWATCH III для расчетов волнения

Fig. 2. The WAVEWATCH III model unstructured grid for waves simulations

зволяет уменьшить шаг в прибрежных районах, у островов и в проливах и увеличить его в открытых частях водоемов и, соответственно, значительно сократить вычислительные затраты. Существуют два варианта этой модели: трехмерная и двумерная; последняя использовалась в данной работе.

Уравнения гидродинамической модели ADCIRC формулируются с учетом гидростатического приближения и приближения Буссинеска на f -плоскости. Модель нестационарная, нелинейная. Учитываются такие силы, как сила Кориолиса, касательное ветровое напряжение, градиенты атмосферного давления, приливной потенциал и придонное трение. В модели можно задавать различные свойства подстилающей поверхности, а также осушку и затопление прилегающей суши. При необходимости учета речного стока, его можно задать через соответствующие граничные условия.

Таблица 1
Статистические характеристики сравнения данных моделирования скорости ветра и высоты волн со спутниковыми данными

Эксперимент	Систематическая ошибка	Среднеквадратическая ошибка	Коэффициент корреляции
<i>Оценка качества высоты волн, м</i>			
WW3-CFSR	-0,15	0,39	0,86
WW3-CCLM13	-0,20	0,41	0,87
WW3-CCLM3	-0,14	0,40	0,86
<i>Оценка качества скорости ветра, м/с</i>			
CFSR	-0,38	1,92	0,84
CCLM13	-0,42	1,79	0,84
CCLM3	-0,36	2,03	0,79

**Пример результатов верификации экспериментов CCLM13 и CCLM3
по стационарным данным для 2012 года**

Станции / статистические характеристики	Коэффициент корреляции		Средняя ошибка		Средняя квадратическая ошибка		Стандартное отклонение ошибки	
	CCLM13	CCLM3	CCLM13	CCLM3	CCLM13	CCLM3	CCLM13	CCLM3
Амдерма	0,81	0,75	-0,65	-0,59	1,77	1,93	1,65	1,84
Антипаюта	0,86	0,86	2,05	1,23	2,74	1,89	1,83	1,43
Диксон	0,53	0,88	0,77	0,23	2,23	1,69	2,10	1,68
Баренцбург	0,89	–	0,57	–	1,71	–	1,61	–
Болванский нос	0,81	0,82	-1,29	-0,83	2,21	2,02	1,79	1,85
Голомянный	0,80	0,74	-0,14	-0,26	2,09	2,31	2,08	2,29
им. Федорова	0,83	0,81	0,20	-0,02	1,81	1,98	1,80	1,98
Малые Кармакулы	0,79	0,74	-1,91	-0,64	3,82	3,56	3,31	3,50
им. Кренкеля	0,60	0,57	-0,18	0,18	2,50	2,57	2,50	2,56
Марресале	0,87	0,85	0,36	0,06	1,69	1,70	1,65	1,70
им. Попова	0,83	0,80	0,04	0,14	1,58	1,69	1,59	1,69
Стерлегова	0,79	0,74	0,09	-0,18	1,92	2,13	1,92	2,13
о. Визе	0,73	0,70	0,16	-0,45	2,12	2,29	2,11	2,25
Среднее по станциям	0,78	0,77	0,01	-0,09	2,17	2,15	2,00	2,07

Численная реализация модели ADCIRC по горизонтальным координатам основана на методе конечных элементов (в качестве которых используются треугольники разной площади), по времени используется метод конечных разностей. Первоочередной задачей являлось построение неструктурной триангуляционной расчетной сетки. Проведенные тестовые вычисления расчетной сетки Карского моря показали, что при сложной конфигурации береговой линии моря и наличия огромного количества островов лучшим методом построения расчетной области является так называемый *raving*, т. е. по узлам, расположенным на контуре расчетной области. Применяя этот метод в ПО Surface Modeling System (SMS 11.1), удалось создать расчетную сетку для модели ADCIRC с шагом 500–600 м в прибрежной зоне, 1,5–2 км в центральных районах губ и 10–15 км в открытой части Карского моря (рис. 3). В итоге получилось 66 290 узлов сетки. Глубины моря в узлах расчетной области вычислялись по данным оцифровки навигационных карт масштабов 1:500 000–1:100 000, приобретенных у компании ООО «НавиСофт». Общее количество оцифрованных глубин – 466 993.

Акватория имеет сложную конфигурацию береговой линии и множество островов, в связи с этим модельная область имеет несколько открытых границ. Формирование нагонов в Карском море происходит на фоне приливных колебаний уровня [Добровольский, Залогин, 1982]. Приливные

составляющие (амплитуда и фаза основных полусуточных приливных гармоник M2, S2, N2, K2 и основных суточных гармоник K1, O1, P1, Q1) задавались на северной, открытой границе расчетной области в соответствии с базой данных приливов

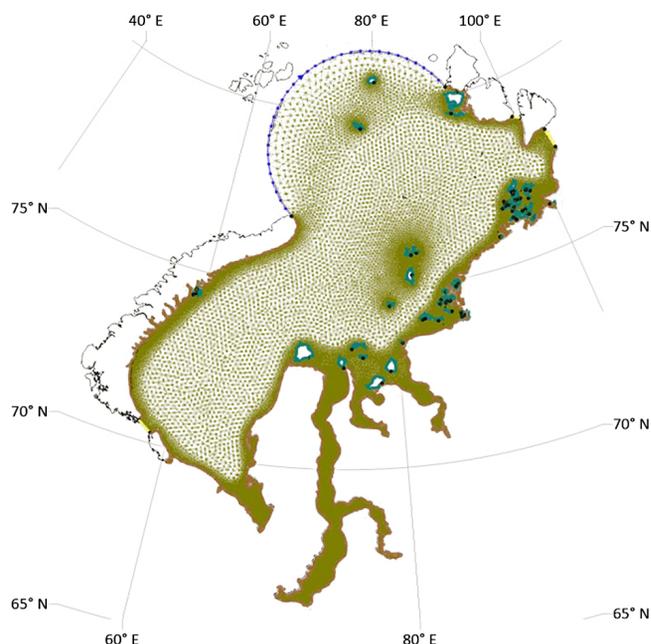


Рис. 3. Неструктурная расчетная сетка Карского моря модели ADCIRC для расчетов нагонов

Fig. 3. The ADCIRC unstructured grid for Kara Sea storm surges simulations

FES2004 [Global Tide..., 2021]. При этом использовалась новая оригинальная батиметрия высокого разрешения и был учтен лед в полярных регионах. В проливах Карские ворота, Вилькицкого, Шокальского и Маточкин шар задавалось граничное условие свободного прохождения волн (wave radiation). На берегу принимались условия нулевого нормального потока к берегу и тангенциальное скольжение. Придонное трение в модели ADCIRC рассчитывалось согласно формулировке квадратичного закона трения. При расчетах коэффициент придонного трения принимался равным 0,0025. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости также задавался постоянным и равным $2 \text{ м}^2/\text{с}$. При расчетах использовался соответствующий алгоритм осушки моря и затопления прилегающей территории, речной сток не задавался.

Многолетние расчеты колебаний уровня в Карском море на основе модели ADCIRC проводились с использованием полей ветра и атмосферного давления из реанализов NCEP/CFR/CFRv2 за 1979–2018 гг. Такая реализация позволяет анализировать среднесезонные показатели и межгодовую изменчивость колебаний уровня. Ранее подобный подход был успешно применен для других акваторий, а проведенные оценки качества показали хорошее совпадение результатов моделирования с данными измерений [Иванова и др., 2015; Кораблина и др., 2017; Pavlova et al., 2020]. Поля концентрации льда получены из базы данных OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facilities) [OSI SAF, 2021]. Также для нескольких численных экспериментов использовались поля ветра и давления высокого разрешения по данным CCLM3 для периодов август–октябрь 2012 г. и июль–сентябрь 2014 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование поля ветра и волнения. Анализ результатов моделирования полей ветра COSMO-CLM показал, что во всех экспериментах мезомасштабные особенности отчетливо проявлялись именно на шаге сетки $\sim 3 \text{ км}$ (CCLM3), а на шаге $\sim 13 \text{ км}$ (CCLM13) они либо не отмечались вовсе, либо проявлялись нечетко и были локализованы в других районах по сравнению с CCLM3. Детальный анализ воспроизведения мезомасштабных циркуляций приведен в [Platonov, Kislov, 2020]. Важным результатом явилось моделирование мезомасштабных мысовых струй, чередующихся в потоке, т. е. протяженных полос циклонической и антициклонической завихренности (вихревых цепочек), ветровой тени (как следствие различий в шероховатости поверхности), которая простирается далее по потоку на расстояние, превосходящее размеры островов.

При обтекании горного хребта у его подветренного склона воспроизведено увеличение скорости ветра и ее стандартного отклонения, т. е. усиление турбулентности, отражающее главные черты характера протекания подветренных бурь (явление новоземельской боры). В частности, на станциях архипелага Новая Земля (Малые Кармакулы, а также станции Роснефти м. Гессена, м. Опасный, Ледовая Гавань, расположенные на восточном побережье Северного острова), наиболее подверженных воздействию кататических ветров в исследуемые периоды, среднеквадратические ошибки скорости ветра уменьшились с $3,5\text{--}4 \text{ м/с}$ до $2,7\text{--}3 \text{ м/с}$ при переходе от шага сетки 12 км к шагу 3 км (см. табл. 2). Это говорит о том, что модель с высоким разрешением адекватно «чувствует» детализацию. Можно также рассчитывать на то, что мезомасштабные циркуляции, в том числе с экстремальными скоростями ветра, будут воспроизводиться достаточно надежно. Это важно в том числе для моделирования волнения или штормовых нагонов в прибрежных районах со сложной орографией и береговой линией, особенно в условиях разреженной сети наблюдений в Арктике.

Скорость ветра при использовании высокоразрешающего моделирования и более грубого реанализа существенно отличается. На рисунках 4 и 5 показаны поля ветра и ветровых волн, рассчитанных на основе форсинга разного разрешения. При воспроизведении поля ветра в эксперименте CCLM3 в открытом море различия с реанализом малы, однако в прибрежной зоне в шхерах они существенные. Модель COSMO-CLM воспроизводит локальные особенности поля ветра, связанные с изменениями подстилающей поверхности (суша, море), обтеканием возвышенностей, конфигурацией береговой линии и др. Для высоты волн при направлении ветра с моря на берег различия при использовании разного форсинга минимальны, а при ветре с берега локальные особенности его поля имеют большее влияние (см. рис. 5).

Подробный анализ полей ветра и волнения выполнен для участка восточного побережья Новой Земли, где присутствуют характерные особенности – узкие шхеры шириной от $2\text{--}3$ до 13 км . Вывод данных производился в точках, расположенных на входе в шхеры (рис. 6). Рассмотрим изменение скорости ветра и высоты волн в точке в шхере № 5. Экстремальные скорости ветра по данным эксперимента CCLM3, как правило, выше, чем по реанализу NCEP/CFR (рис. 7). В целом корреляция двух рядов по скорости ветра высокая, однако, по абсолютным значениям различия велики. Для высоты волн различия двух реализаций, использующих форсинг CCLM3 и NCEP/CFR

(WW3-CCLM3 и WW3-CFSR), намного меньше. Это связано с тем, что поле волн формируется в открытой части Карского моря, где различия в форсинге невелики, и далее волна приходит в прибрежную зону. Максимальные различия не превышают 0,5 м.

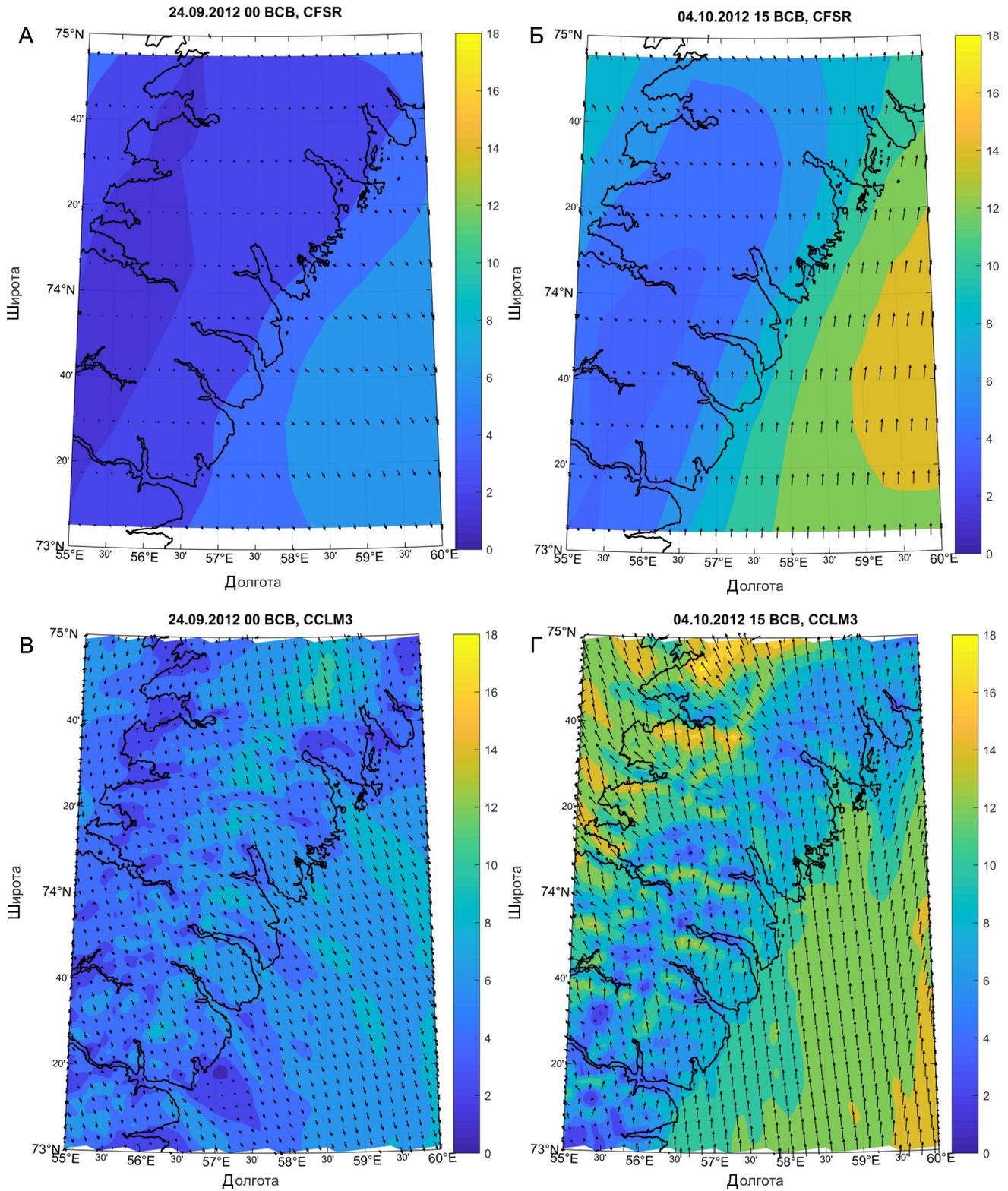


Рис. 4. Поле скорости (м/с) и направления (стрелочки) ветра по данным реанализа NCEP/CFSR (А, Б) и эксперимента CCLM3 (В, Г) 24.09.2012 в 00 ч ВСВ (А, В) и 04.10.2012 в 15 ч ВСВ (Б, Г)

Fig. 4. Wind speed (m/s) and direction (arrows) according to the NCEP/CFSR reanalysis (А, Б) and the CCLM3 experiment (В, Г) 24.09.2012 00 UTC (А, В) and 04.10.2012 15 UTC (Б, Г)

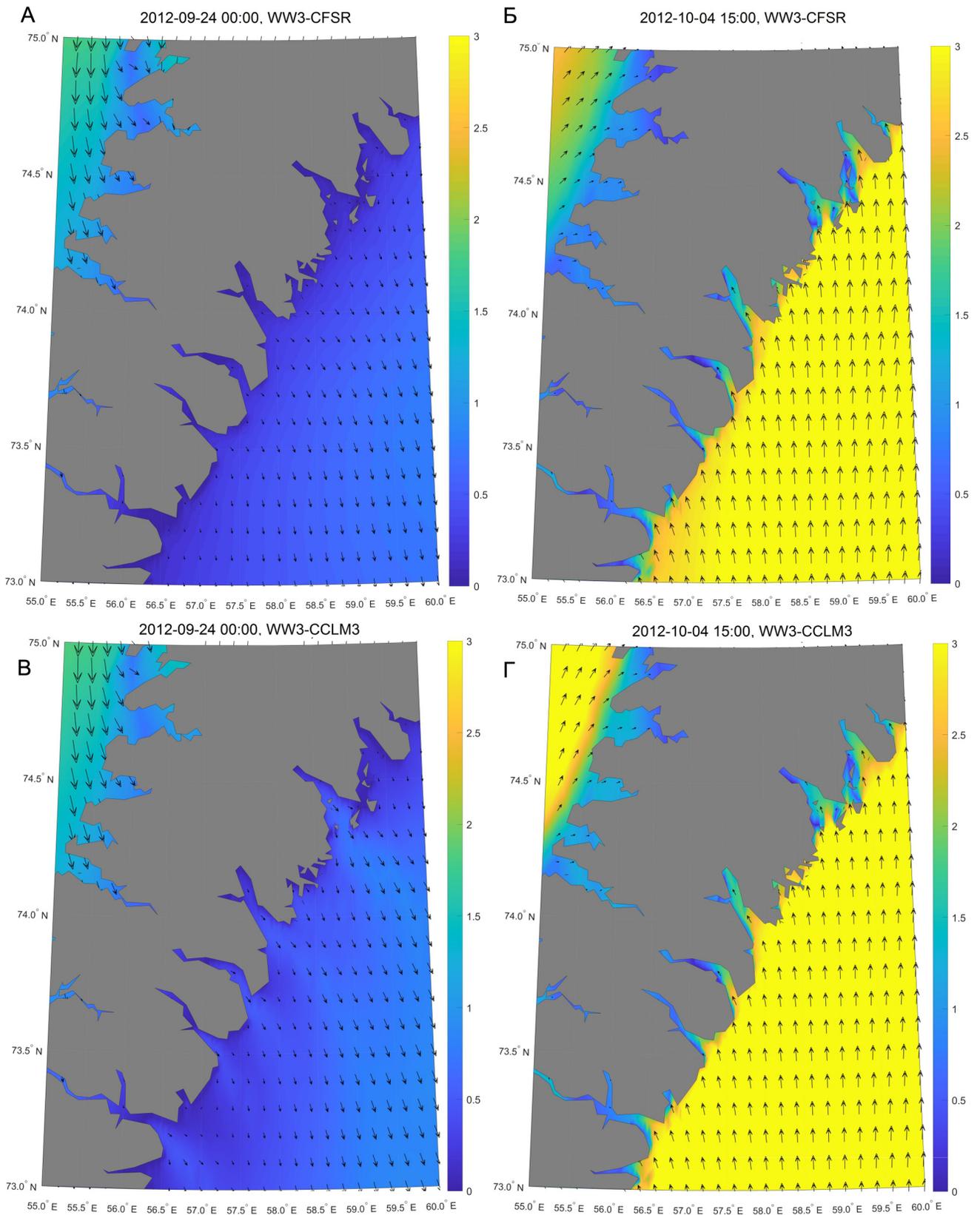


Рис. 5. Поле высоты волн (м) и их направления (стрелочки) по данным экспериментов WW3-CFSR (А, Б) и WW3-CCLM3 (В, Г) 24.09.2012 в 00 ч ВСУ (А, В) и 04.10.2012 в 15 ч ВСУ (Б, Г)

Fig. 5. Wave height (m) and their direction (arrows) according to WW3-CFSR (A, Б) and WW3-CCLM3 (В, Г) experiments 24.09.2012 00 UTC (A, В) and 04.10.2012 15 UTC (Б, Г)

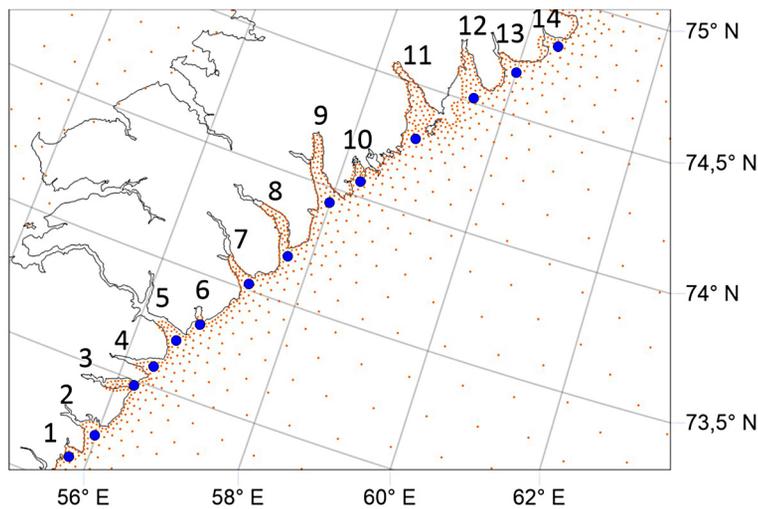


Рис. 6. Карта района исследования (о. Новая Земля) с точками неструктурной сетки модели WAVEWATCH III.

Цифрами обозначены номера шхер, анализируемых далее в тексте

Fig. 6. Map of the region of study (Novaya Zemlya Island) with unstructured grid points of the WAVEWATCH III model. Digits denoted skerries numbers analyzed in the following text

Далее было выполнено сопоставление высоты волн в реализациях WW3-CCLM3, WW3-CFSR и скорости ветра в эксперименте CCLM3 и реанализе NCEP/CFSR отдельно для каждой шхеры, которые были ранжированы по ширине. Среднеквадратическое отклонение (СКО) для скорости ветра (высоты волн) в реализации CCLM3 (WW3-CCLM3) значительно (незначительно) превышает СКО в CFSR (WW3-CFSR) (рис. 8), при этом связи величины СКО с размером шхер не наблюдается.

Если рассмотреть средние разности CFSR–CCLM3 по скорости ветра (рис. 9А), то можно отметить их уменьшение с увеличением ширины шхеры. Например, при ширине шхер 6 км скорость ветра по реанализу CFSR в среднем выше, чем в эксперименте CCLM3, на 0,4 м/с (см. рис. 9А). При увеличении ширины шхеры до 19 км разности существенно уменьшаются, что связано с сопоставимостью пространственного разрешения реанализа, которое и составляет около 20 км. Для разностей в высоте волн между экспериментами WW3-CCLM3 и WW3-CFSR подобная тенденция не наблюдается (см. рис. 9В), так как в основном волна приходит из открытого моря, где различия между экспериментами невелики. Однако, если рассматривать отдельно только случаи ветра с берега, то разности в высоте волн существенно увеличиваются. Впрочем, подобные ситуации наблюдаются редко, а разности в направлении ветра всегда отрицательные.

В результате можно сделать вывод, что воспроизведение скорости ветра в шхерах небольшого размера в прибрежной зоне для эксперимента CCLM3

существенно отличается от реанализа CFSR. Для высоты волн различия при использовании разного форсинга минимальны при ветре с моря, и увеличиваются при ветре с берега.

Моделирование нагонов. Рассмотрим результаты моделирования уровня моря и течений за период с 1979 по 2018 г. с использованием форсинга из реанализа NCEP/CFSR/CFSRv2. Приливы в Карском море почти правильные полусуточные. Это показывает проведенный спектральный анализ временных рядов уровня моря по данным моделирования. Самая большая величина прилива (разность уровней смежных полной и малой вод) за весь период моделирования наблюдается в вершине Байдарацкой губы. Здесь она достигает 2 м. В других районах значительно меньше – в пределах от 0,2 до 0,7 м. Наибольшие величины нагонов отмечаются в южной части Обской губы – до 2,5 м. В других полузамкнутых водоемах (Тазовская, Гыданская и Байдарацкая губы, Енисейский и Пясинский заливы) величина нагона достигает 1,5 м. Вне пределов бухт, губ и заливов максимальная высота нагона – около 1 м (рис. 10).

На рисунке 11 приведено количество случаев нагонов высотой большей 0,5 м по годам в южных частях Байдарацкой и Обской губ. Как видно, формирование нагонов такой высоты в Обской губе происходит значительно чаще (примерно в два раза), чем в Байдарацкой. Кроме этого, многолетние тренды изменения количества нагонов находятся в противофазе. В период с 1995 по 2005 г. в Байдарацкой губе наблюдалось наименьшее количество нагонов, в то время как в Обской, наоборот, наибольшее. По результатам моделирования обнаружена высокая корреляция между скоростью и направлением ветра и появлением нагонов в Байдарацкой и Обской губах, а связь нагонов с атмосферным давлением отсутствует. Следовательно, наличие противофазы в трендах количества нагонов можно объяснить климатическими изменениям в повторяемости направлений ветра северо-западных и северо-восточных румбов.

Следует также отметить, что дальше на восток от Обской губы количество нагонов высотой большей 0,5 м резко уменьшается. Так, в Пясинском заливе они возникают 1–5 раз в год, а в отдельные годы нагонов такой величины вообще нет.

Благодаря вычислительной сетке с высоким разрешением, описывающей особенности береговой линии и острова, моделирование течений и уровня моря позволяет выявлять важные локальные осо-

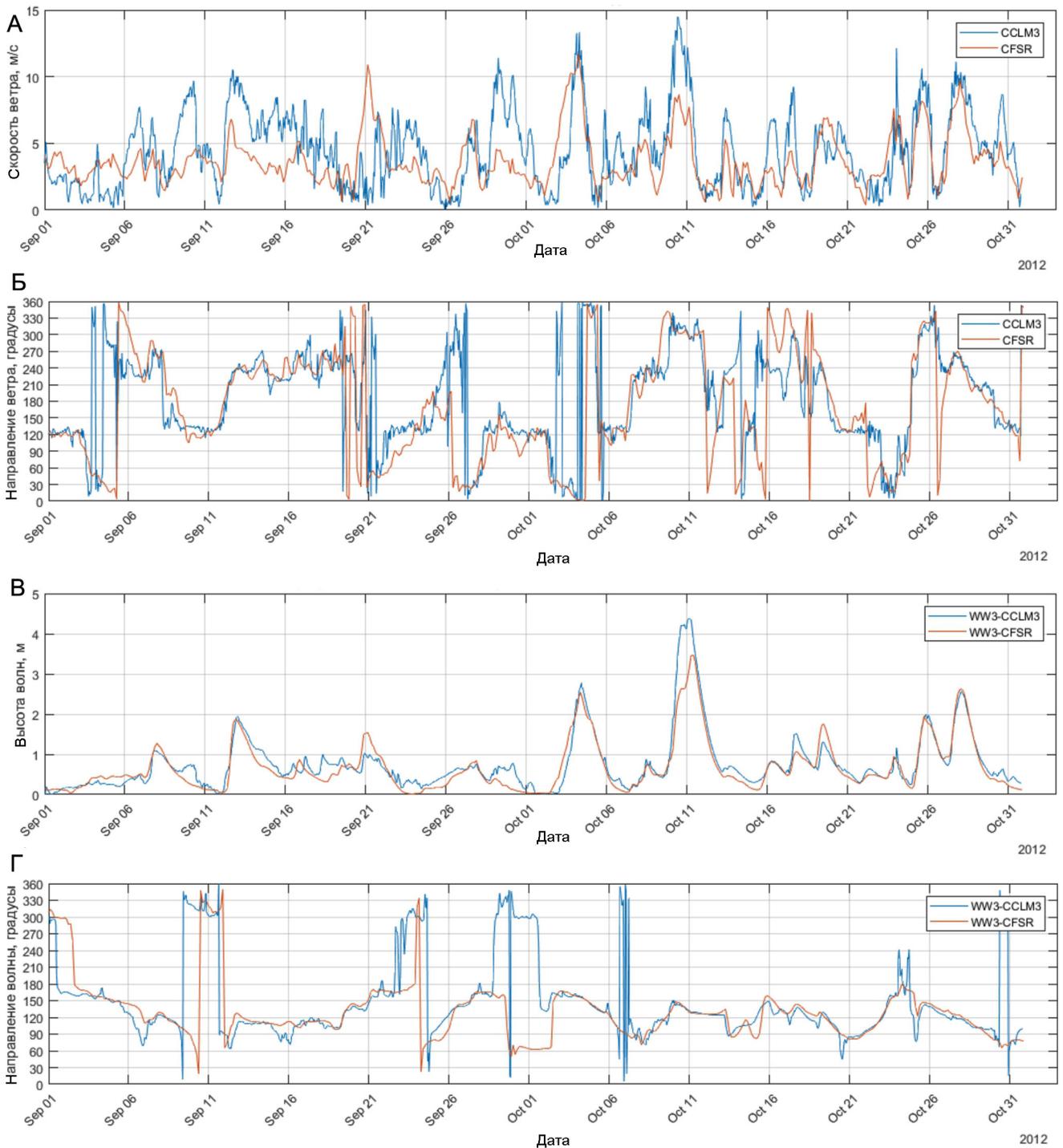


Рис. 7. Временной ход скорости (А) и направления ветра (Б) по результатам эксперимента CCLM3 и реанализа NCEP/CFSR, высоты (В) и направления волн (Г) по результатам экспериментов WW3-CCLM3 и WW3-CFSR в шхере № 5 за период 1.09–31.10.2012

Fig. 7. Time variation of the wind speed (А) and wind direction (Б) according to the results of the CCLM3 experiment and NCEP / CFSR reanalysis, the wave heights (В) and direction (Г) according to the results of the WW3-CCLM3 and WW3-CFSR experiments in skerry No. 5 for 1.09–31.10.2012

бенности. На рисунке 12 приведен уровень моря за 14 декабря 1984 г. в районе Пясинского залива, наблюдается нагон высотой около 2 м, моделируемый с учетом островов и сложной орографии.

Расчет уровня моря и течений с использованием форсинга высокого разрешения CCLM3 для более короткого периода существенно влияет на результат в узких и длинных губах и заливах и в меньшей сте-

пени – в более открытых акваториях (рис. 13). Изменение высоты нагона в реализации с использованием форсинга CCLM3 составляет до $\pm 0,3 \dots 0,5$ м. Однако, из-за отсутствия данных инструментальных наблюдений мы не можем утверждать, что

какой-то из вариантов ближе к реальности. Но, безусловно, можно констатировать, что статистические результаты повторяемости нагонов за 40 лет существенно изменятся при использовании другого форсинга.

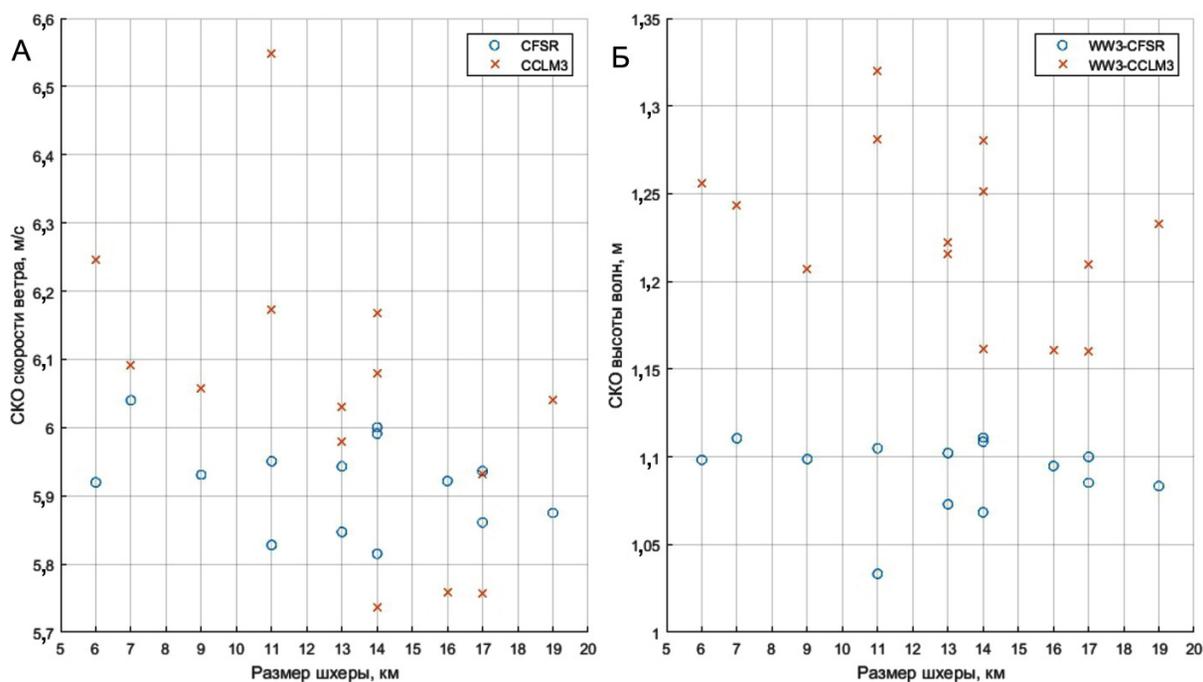


Рис. 8. Диаграммы рассеяния среднеквадратичного отклонения скорости ветра (А) и высоты волн (Б) по данным эксперимента CCLM3 и реанализа NCEP/CFSR для выборки случаев направления ветра с берега в море в зависимости от горизонтального размера шхеры

Fig. 8. Scatter diagrams of the root-mean-square deviation of wind speed (A) and wave height (Б) according to the CCLM3 experiment and NCEP/CFSR reanalysis for a sample of cases of wind direction from the coast to the sea, depending on the horizontal size of the skerry

ВЫВОДЫ

Высокоразрешающее моделирование в условиях сложной береговой линии и рельефа в регионе Карского моря применено для воспроизведения ветра, волнения и штормовых нагонов. Использование пространственного разрешения порядка 3 км показало, что подобная детализация позволяет воспроизводить многие мезомасштабные циркуляции в прибрежной зоне, в том числе связанные с высокими скоростями ветра и волнением. Показаны преимущества использования моделей высокого разрешения по сравнению с доступными данными глобальных реанализов, в том числе в качестве форсинга волновых моделей. Продемонстрирована более высокая пространственная изменчивость поля ветра по данным COSMO-CLM, которая проявляется в том числе и в более высоких экстремумах скорости ветра и высоты волн в некоторых шхерах в штормовые периоды. Для ветровых волн наблюдаются небольшие различия при различном форсинге в высоте волн при ветре с моря на берег, и большие – при ветре с берега на море. В узких шхерах шириной в не-

сколько километров СКО скорости, направления ветра и высоты волн выше по данным моделирования высокого разрешения, чем по данным реанализа.

Продемонстрированы результаты моделирования уровня моря с высоким разрешением сетки модели и с различным разрешением ветрового форсинга. Самая большая величина прилива наблюдается в вершине Байдарацкой губы и составляет 2 м. Наибольшие величины нагонов отмечаются в южной части Обской губы – до 2,5 м. Вне пределов бухт, губ и заливов максимальная высота нагона – около 1 м. Формирование нагонов в Обской губе происходит примерно в два раза чаще, чем в Байдарацкой. Многолетние тренды изменения количества нагонов находятся в противофазе – в 1995–2005 гг. в Байдарацкой губе наблюдалось наименьшее количество нагонов, а в Обской – наибольшее. Использование форсинга более высокого разрешения приводит к значительным изменениям высоты нагонов в узких и длинных губах и практически не влияет на результат моделирования в более открытых акваториях.

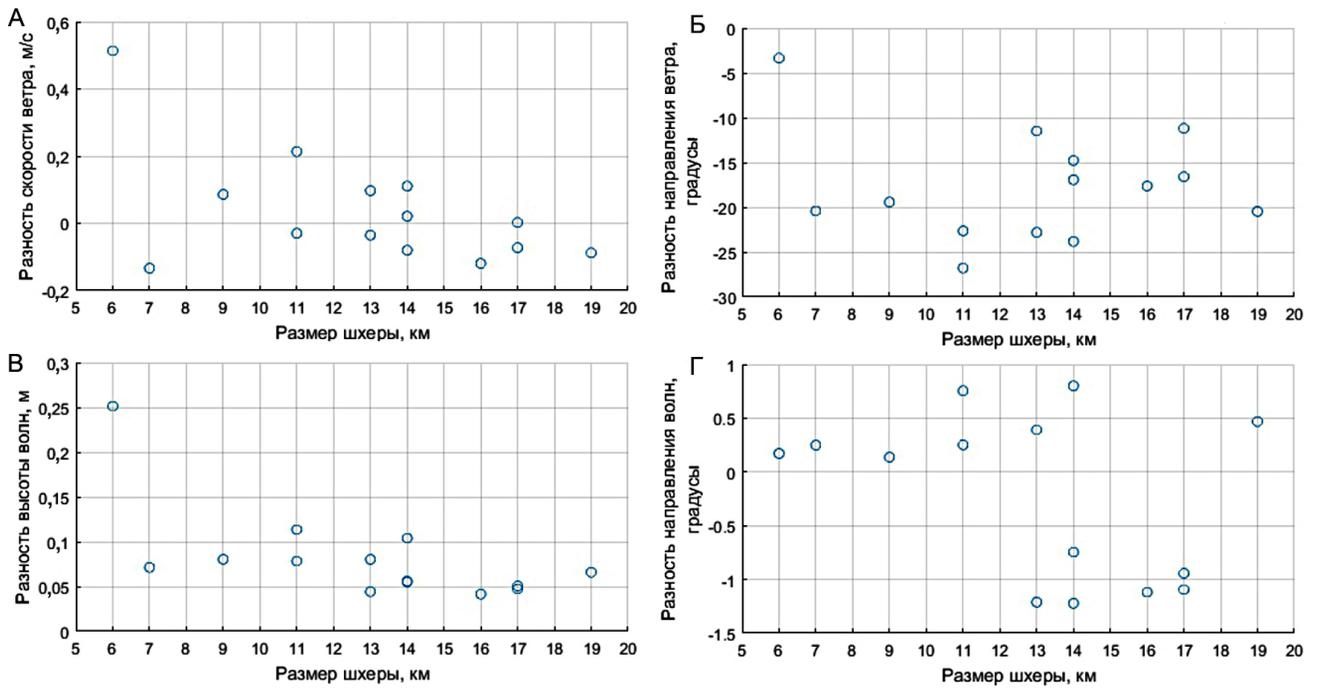


Рис. 9. Диаграммы рассеяния средних значений разностей скорости (А) и направления ветра (Б), высоты (В) и направления волн (Г) между данными эксперимента CCLM3 (WW3-CCLM3) и реанализа NCEP/CFSR для выборки случаев направления ветра с берега в море и высот значительных волн более 1 м в зависимости от горизонтального размера шхеры

Fig. 9. Scatter diagrams of mean values of differences in wind speed (A) and direction (Б), wave height (B) and direction (Г) between the data of the CCLM3 (WW3-CCLM3) experiment and NCEP / CFSR reanalysis for sampling of cases of wind direction from the coast to the sea and the heights of significant waves over 1 m, depending on the horizontal size of the skerry

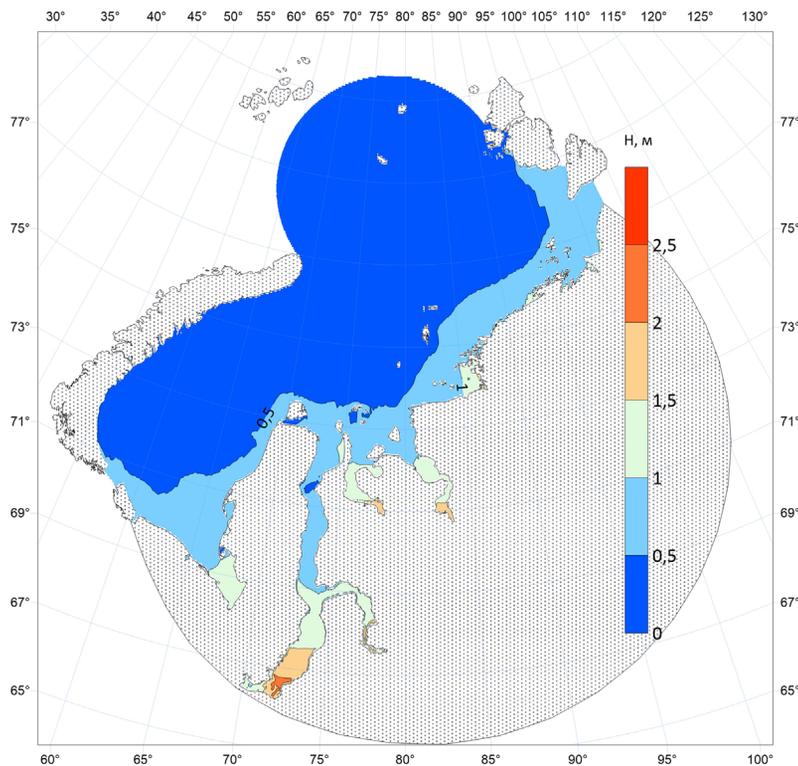


Рис. 10. Максимальная рассчитанная по модели ADCIRC величина нагона в Карском море за 1979–2018 гг.

Fig. 10. The maximum surge value calculated by the ADCIRC model in the Kara Sea for 1979–2018

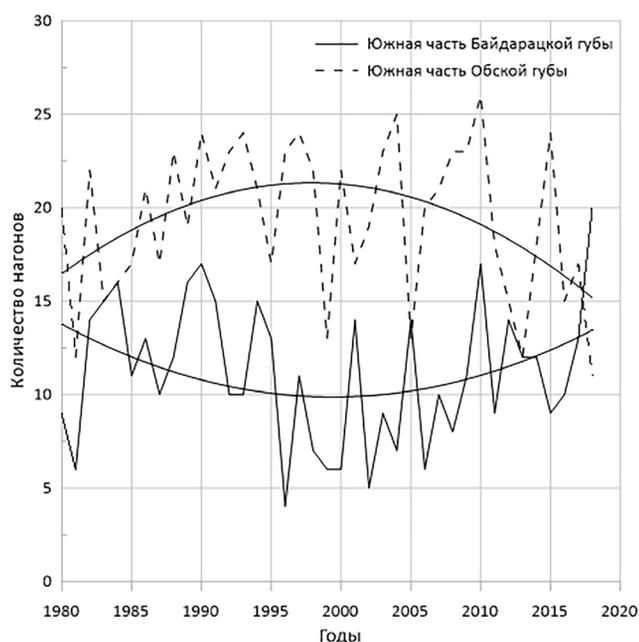


Рис. 11. Количество случаев нагонов высотой более 0,5 м по годам в губах Карского моря

Fig. 11. The number of cases of surges with a height of more than 0,5 m over the years in the Kara Sea bays

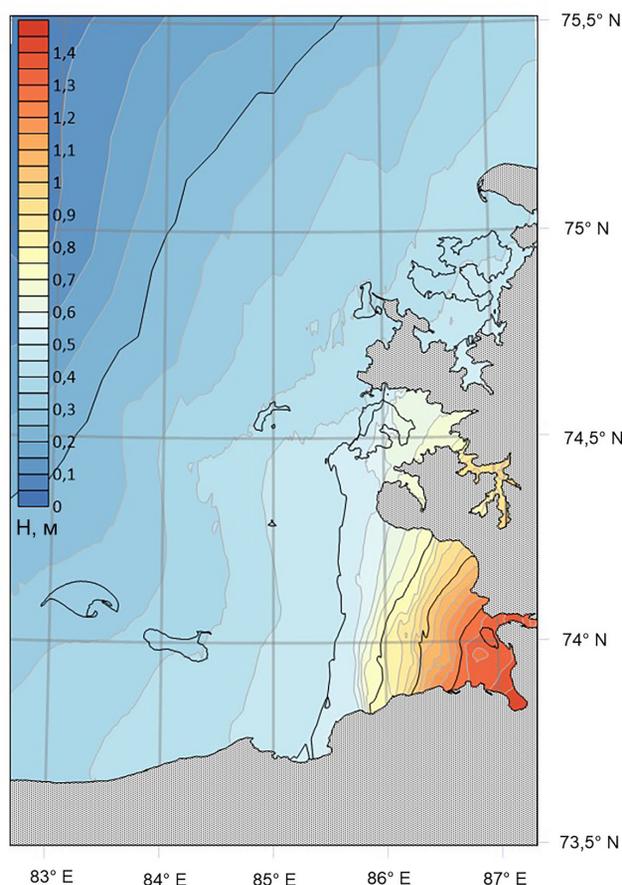


Рис. 12. Уровень моря по данным моделирования за 14 декабря 1984 г.

Fig. 12. Sea level according to modelling results for December 14, 1984

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60147. Работа В.С. Платонова осуществлялась в рамках госбюджетной темы № 121051400081-7. При подготовке данной работы финансирование для А.В. Кислова осуществлено в рамках магистерской программы МГУ имени М.В. Ломоносова «Природная и социальная среда Арктики». Работа С.А. Мысленкова выполнялась при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения природной среды». Работа Архипкина В.С. осуществлялась в рамках госбюджетной темы № 121031900090-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ашик И.М., Прошутинский А.Ю., Степанов В.А. Некоторые результаты и перспективы численных прогнозов стонно-нагонных колебаний уровня арктических морей // Метеорология и гидрология. 1989. № 8. С. 74–82.
- Ашик И.М. Численные расчеты и прогнозы колебаний уровня моря и сплоченности льдов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // Научные результаты экспедиции ЛАПЭКС-93. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. С. 199–209.
- Ашик И.М. Численные расчеты и прогнозы колебаний уровня, течений и дрейфа льда на шельфе морей Западного сектора Арктики // Навигация и гидрография. 1997. № 4. С. 85–94.
- Борисов Е.В., Раевский Д.Н. Сравнение и использование наблюдений и моделирования уровня в Карском море // Арктика: Экология и экономика. 2016. № 4. Т. 24. С. 72–79.
- Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1. Т. 13. С. 57–73.
- Дианский Н.А., Панасенкова И.И., Фомин В.В. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 6. С. 530–548. DOI: 10.22449/0233–7584–2019–6–530–548.
- Дианский Н.А., Панасенкова И.И., Фомин В.В., Гусев А.В., Кабатченко И.М. Система оперативных и ретроспективных расчетов гидрометеорологических параметров и морского льда для западных морей российской Арктики // Морские информационно-управляющие системы. 2020. Т. 17. № 1. С. 44–51.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

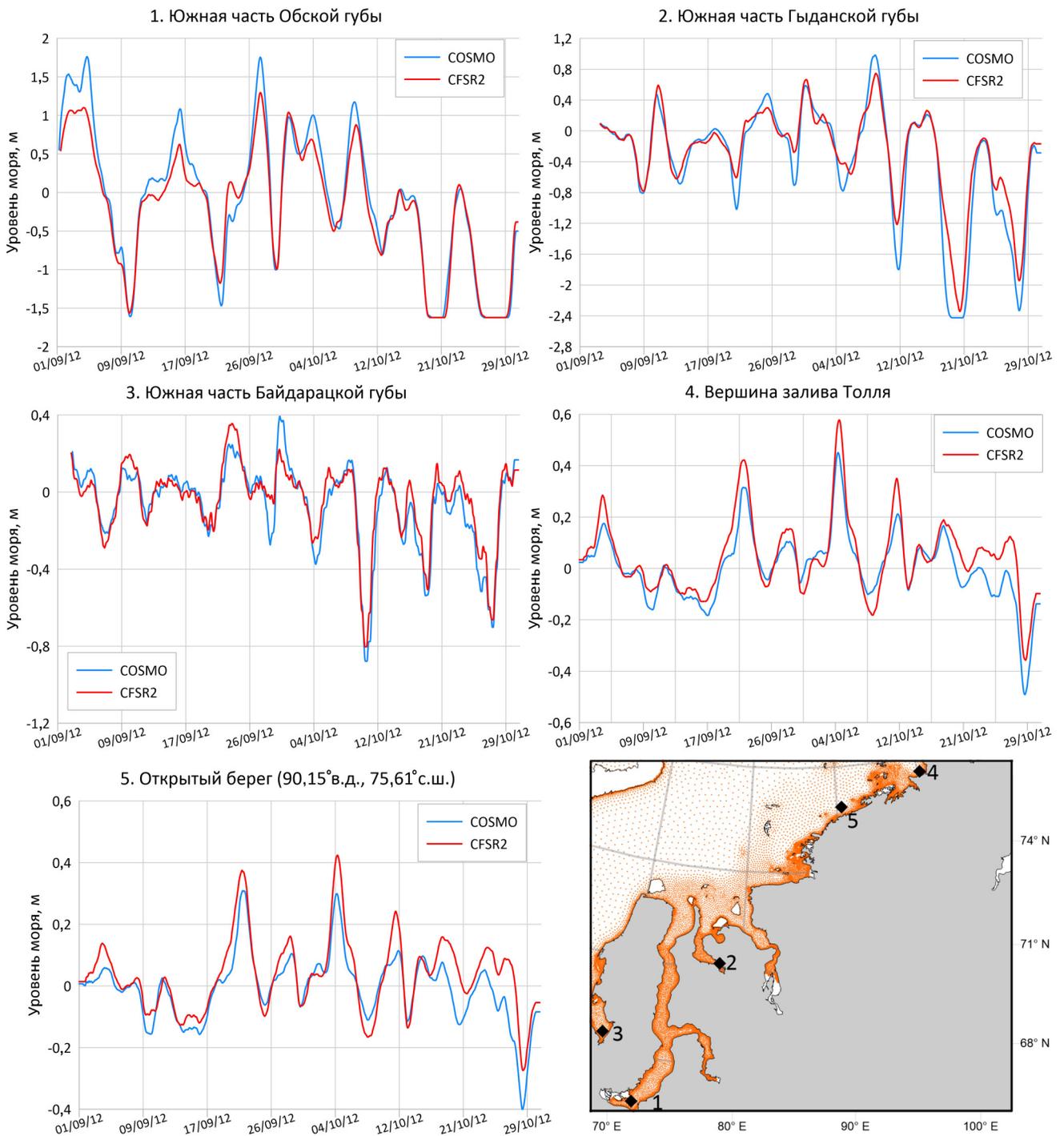


Рис. 13. Колебания уровня моря в различных точках Карского моря по данным моделирования при использовании форсинга CCLM3 и CFSR

Fig. 13. Sea level fluctuations at different points in the Kara Sea according to modeling data using forcing CCLM3 and CFSR

Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 3. С. 41–49.

Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С., Варенцов М.И., Розинкина И.А., Никитин М.А., Чумаков М.М. Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин // Известия

РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 4. № 54. С. 381–385. DOI: 10.1134/S0002351518040090.

Кораблина А.Д., Кондрин А.Т., Архипкин В.С. Моделирование нагонов в Белом и Баренцевом морях за период 1979–2015 гг. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 364. С. 144–158.

- Мысленков С.А., Маркина М.Ю. Особенности распространения потока волновой энергии в Карском море // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3. Т. 369. С. 119–131.
- Мысленков С.А., Столярова Е.В., Маркина М.Ю., Киселева С.В., Архипкин В.С., Горлов А.А., Умнов П.М. Сезонная и межгодовая изменчивость потока волновой энергии в Баренцевом море // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 19–21. Т. 231–233. С. 36–48. DOI: 10.15518/isjaee.2017.19-21.036-048.
- Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Meth. in Comp. Phys.*, 1977, no. 17, p. 173–265.
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *J. of Clim.*, 2010, vol. 23, no. 14, p. 3888–3906, DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.
- Blain C.A., Preller R.H., Rivera A.P. Tidal Prediction Using the Advanced Circulation Model (ADCIRC) and a Relocatable PC-based System, *Oceanography*, 2002, vol. 15, no. 1, p. 77–87.
- Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications, *COSMO Newsletters*, 2006, vol. 6, p. 225–235.
- Bromwich D., Wilson A.B., Bai L., Liu Z., Barlage M., Shih C.-F., Maldonado S., Hines K.M., Wang S.-H., Woollen J., Kuo B., Lin H.-C., Wee T.-K., Serreze M. C., Walsh J.E. The Arctic System Reanalysis, version 2, *Bull. of Amer. Met. Soc.*, 2018, vol. 99, p. 805–828, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
- Cohen J., Pfeiffer K., Francis J.A. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States, *Nat. Comm.*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 1–12, DOI: 10.1038/s41467-018-02992-9.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., Rosnay de P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. of the R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, no. 656, p. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
- Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea Region, *Stud. Mar. Sci.*, 2019, vol. 30, p. 100719, DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100719.
- Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geoph. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, no. 6, L06801, DOI: 10.1029/2012GL051000.
- Gal-Chen T., Somerville R.C.J. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations, *J. of Comp. Phys.*, 1975, vol. 17, no. 2, p. 209–228, DOI: 10.1016/0021-9991(75)90037-6.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu Cr., Radnoti G., Rosnay de P., Rozum I., Vamborg Fr., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Johannessen O.M., Kuzmina S., Bobylev L.P., Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalization, *Tellus*, 2016, vol. 68A, 28234, DOI: 10.3402/tellusa.v68.28234.
- Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Moore G.W.K., Renfrew I.A. Tip jets and barrier winds: A QuikSCAT climatology of high wind speed events around Greenland, *J. of Clim.*, 2005, vol. 18, no. 18, p. 3713–3725, DOI: 10.1175/JCLI3455.1.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13, no. 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Utten S.D., Esau I. A link between Arctic Sea ice and recent cooling trends over Eurasia, *Clim. Changes*, 2012, vol. 110, no. 3–4, p. 1069–1075, DOI: 10.1007/s10584-011-0334-z.
- Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modelling in the Caspian Sea using an unstructured grid, *Russian J. of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, no. 1, p. ES1006, DOI: 10.2205/2019ES000688.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara Sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. of Geoph. Res. Atm.*, 2010, vol. 115, no. D21, DOI: 10.1029/2009JD013568.
- Platonov V.S., Varentsov M.I. Supercomputer technologies as a tool for high-resolution atmospheric modelling towards the climatological timescales, *Supercomp. Front. And Innov.*, 2018, vol. 5, no. 3, p. 107–110, DOI: 10.14529/jsfi180320.
- Platonov V., Varentsov M. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 350, DOI: 10.3390/atmos12030350.
- Platonov V., Kislov A. High-resolution COSMO-CLM modeling and an assessment of mesoscale features caused by coastal parameters at near-shore Arctic zones (Kara Sea), *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 10, p. 1062, DOI: 10.3390/atmos11101062.
- 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, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Rockel B., Geyer B. The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation, *Met. Zeitsch.*, 2008, vol. 17, no. 4, p. 487–498.
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T.,

- Chuang H.-Y., Juang H.-M., Sela J., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, p. 1015–1057, DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Serreze M., Stroeve J. Arctic Sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 2015, vol. 373, 20140159, DOI: 10.1098/rsta.2014.0159.
- Schär C., Leuenberger D., Fuhrer O., Lüthi D., Girard C. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, 2002, vol. 130, no. 10, p. 2459–2480, DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<2459:ANTFVC>2.0.CO;2.
- Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts, *COSMO Newsletter*, 2003, vol. 3, p. 221–225.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.M. Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 7, p. 726, DOI: 10.3390/atmos11070726.
- Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: Seasonality and trends, *Cryosphere*, 2016, vol. 10, p. 1605–1629, DOI: 10.5194/tc-10-1605-2016.
- Storch von H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes, *Mon. Wea. Rev.*, 2000, vol. 128, no. 10, p. 3664–3673, DOI: 10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.
- Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review, *Surv. in Geoph.*, 2014, vol. 35, no. 5, p. 1175–1214, DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
- Voevodin V., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community, *Supercomp. Front. and Innov.*, 2019, vol. 6, no. 2, p. 4–11, DOI: 10.14529/jsfi190201.
- Yang X.Y., Yuan X., Ting M. Dynamical link between the Barents-Kara sea ice and the Arctic Oscillation, *J. of Clim.*, 2016, vol. 29, no. 14, p. 5103–5122, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0669.1.
- Young I.R., Ribal A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height, *Science*, 2019, vol. 364, no. 6440, p. 548–552, DOI: 10.1126/science.aav9527.
- Электронные ресурсы*
- Атлас «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана». Карское море / ЕСИМО. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2007. URL: <http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/2waterlevel.html> (дата обращения 17.05.2021).
- Coastal Emergency Risks. Assessment CERA, 2021. URL: <https://cera.coastalrisk.live> (дата обращения 07.08.2021).
- Core documentation of the COSMO-model. Consortium for Small Scale Modelling, 2003. URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (дата обращения 17.05.2021).
- Global Tide – FES2004. AVISO⁺. Satellite Altimetry Data. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2004.html> (дата обращения 17.05.2021).
- OSI SAF (Ocean and Sea Ice). EUMETSAT. URL: <http://www.osi-saf.org/?q=content/global-sea-ice-concentration-climate-data-record-smmrsmis> (дата обращения 17.05.2021).
- The Climate Limited-area Modelling Community, 2005. URL: <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom> (дата обращения 17.05.2021).
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG): User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. +Appendices. (PDF) User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/336069899_User_manual_and_system_documentation_of_WAVEWATCH_III_R_version_607 (дата обращения 17.05.2021).

Поступила в редакцию 15.03.2021
 После доработки 04.06.2021
 Принята к публикации 20.07.2021

HIGH-RESOLUTION MODELLING OF THE HYDROMETEOROLOGICAL FIELDS OVER THE KARA SEA COASTAL REGIONS IN COMPLEX COASTLINE CONDITIONS

V.S. Platonov¹, S.A. Myslenkov², V.S. Arkhipkin³, A.V. Kislov⁴

¹⁻⁴Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

¹ Department of meteorology and climatology, Ph.D., Research Fellow; e-mail: vplatonov86@gmail.com

² Department of oceanology, Ph.D., Research Fellow; e-mail: stasocean@gmail.com

³ Department of oceanology, Ph.D., Associate Professor; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

⁴ Department of meteorology and climatology, Professor; e-mail: avkislov@mail.ru

Arctic coastal zones are characterized by diverse severe hydrometeorological phenomena including high wind speeds, stormy waves and surges. Abundance of islands and mountain ranges, and rugged coastline in the Kara Sea contribute to the formation of mesoscale atmospheric circulations that largely determine the pattern

of coastal currents. The Arctic observational network is not dense enough to reproduce and investigate hydro-meteorological characteristics; therefore the paper is based on high-resolution modeling of wind, waves, sea level and currents. Experiments were conducted with COSMO-CLM non-hydrostatic mesoscale atmospheric model for the Kara Sea region with ~12 and ~3 km resolutions. In contrast with global NCEP/CFSR reanalysis the model with 3 km resolution could reproduce such phenomena as tip jets, downslope windstorms and cyclonic chains in the skerries of different scales. This is an important reason for utilizing the COSMO-CLM wind speed fields as forcing data for modeling waves and surges. The WAVEWATCH III model was applied for wave simulation; and the ADCIRC model was used for sea level and currents simulation. During on-shore wind conditions there are almost no differences between wave simulations using high-resolution wind speed and NCEP/CFSR reanalysis. However, the impact of local wind field is significant when off-shore wind is observed. Sea level modeling within narrow bays and creeks using high-resolution wind speed fields has shown significant differences from the experiments based on the NCEP/CFSR reanalysis. Maximal calculated Kara Sea surges are up to 2,5 m and are noticed at the southern part of the Gulf of Ob. Surges in the Gulf of Ob are formed two times more often than in the Baydaratskaya Bay. Long-term trends in the number of surges are opposite, i.e. minimal number of surges was in the Baydaratskaya Bay during the 1995–2005, while maximal number of surges was in the Gulf of Ob during the same period. Keywords: high-resolution hydrodynamic modelling, wind waves, wind surges, COSMO-CLM, WAVEWATCH III, ADCIRC, Kara Sea.

Keywords: high-resolution hydrodynamic modeling, wind waves, wind surges, COSMO-CLM, WAVEWATCH III, ADCIRC, the Kara Sea

Acknowledgements. The reported study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-60147). Work of V. Platonov was carried out under the State budget theme no. 121051400081-7. Work of A.V. Kislov was funded through the Lomonosov MSU Master Program “Arctic natural and social environment”. Work of S.A. Myslenkov was funded under the Interdisciplinary Lomonosov Moscow State University scientific and educational school “Future Planet and Environmental Global Changes”. The Work of V. Arkhipkin was funded by the Lomonosov Moscow State University project no. 121031900090-6.

REFERENCES

- Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Meth. in Comp. Phys.*, 1977, no. 17, p. 173–265.
- Ashik I.M. Chislennye reaschety i prognozy kolebaniy urovnya morya i splochnosti l'dov v moryakh Laptevskikh i Vostochno-Sibirskom. [Numerical calculations and forecasts of the sea level oscillations and ice concentration over the Laptev and the East Siberian seas] In: “*Nauchnye rezultaty 'ekspeditsii LAPEKS-93'*”, Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1994, p. 199–209. (In Russian)
- Ashik I.M. Chislennye reaschety i prognozy kolebaniy urovnya, techeniy i dreifa l'da na shel'fe morey Zapadnogo sektora Arktiki [Numerical calculations and forecasts of the sea level oscillations, currents and ice drift over the shelf of the Western Arctic seas], *Navigatsiya i gidrografiya*, 1997, no. 4, p. 85–94. (In Russian)
- Ashik I.M., Proshutinskiy A.Yu., Stepanov V.A. Nekotorye rezultaty i perspektivy chislennykh prognozov sgonnagonnykh kolebaniy urovnya arkticheskikh morey [Some results and perspectives of the numerical forecasting of surge oscillation of the Arctic seas level], *Meteorologiya i Gidrologiya*, 1989, no. 8, p. 74–82. (In Russian)
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming, *J. of Clim.*, 2010, vol. 23, no. 14, p. 3888–3906, DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.
- Blain C.A., Preller R.H., Rivera A.P. Tidal Prediction Using the Advanced Circulation Model (ADCIRC) and a Relocatable PC-based System, *Oceanography*, 2002, vol. 15, no. 1, p. 77–87.
- Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications, *COSMO Newsletters*, 2006, vol. 6, p. 225–235.
- Borisov E.V., Rayevskiy D.N. Sravnenie i ispol'zovanie nablyudeniy i modelirovaniya urovnya v Karskom more. [Comparison and use of the sea level observations and modelling at the Kara sea], *Arktika: Ekologiya i ekonomika*, 2016, no. 4, vol. 24, p. 72–79. (In Russian)
- Bromwich D., Wilson A.B., Bai L., Liu Z., Barlage M., Shih C.-F., Maldonado S., Hines K.M., Wang S.-H., Woollen J., Kuo B., Lin H.-C., Wee T.-K., Serreze M.-C., Walsh J.E. The Arctic System Reanalysis, Version 2, *Bull. of Amer. Met. Soc.*, 2018, vol. 99, p. 805–828, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0215.1.
- Cohen J., Pfeiffer K., Francis J.A. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States, *Nat. Comm.*, 2018, vol. 9, no. 1, p. 1–12, DOI: 10.1038/s41467-018-02992-9.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg de van L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy 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., Rosnay de P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. of the R. Met. Soc.*, 2011, vol. 137, no. 656, p. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
- Dianskiy N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M. Vosproizvedenie tsirkulyatsii Karskogo i Pechorskogo morey s pomoshchyu sistemy operativnogo diagnoza i prognoza

- morskoy dinamiki [Kara and Pechora seas circulation re-production using the operational system of sea dynamics diagnosis and forecast], *Arktika: Ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 1, vol. 13, p. 57–73. (In Russian)
- Dianskiy N.A., Panasenkova I.I., Fomin V.V. Issledovanie ot-klika verkhnego sloya Barentseva morya na prokhozhdenie intensivnogo polyarnogo tsyklona v nachale yanvarya 1975 goda [Investigation of the Barents Sea upper layer response on the intense polar low passage at the beginning of January, 1975], *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2019, no. 35, vol. 6, p. 530–548, DOI: 10.22449/0233–7584–2019–6–530–548. (In Russian)
- Dianskiy N.A., Panasenkova I.I., Fomin V.V., Gusev A.V., Kabatchenko I.M. Sistema operativnykh i retrospektivnykh raschetov gidrometeorologicheskikh parametrov i morskogo l'da dlya zapadnykh morei rossiyskoy Arktiki [System of operational and retrospective calculations of hydrometeorological parameters and sea ice for western seas of the Russian Arctic], *Morskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2020, no. 17, vol. 1, p. 44–51. (In Russian)
- Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR. [Seas of the USSR], Moscow, Moscow State University Publ., 1982, 192 p. (In Russian)
- Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea Region, *Stud. Mar. Sci.*, 2019, vol. 30, p. 100719, DOI: 10.1016/j.rsma.2019.100719.
- Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geoph. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, no. 6, L06801, DOI: 10.1029/2012GL051000.
- Gal-Chen T., Somerville R.C.J. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations, *J. of Comp. Phys.*, 1975, vol. 17, no. 2, p. 209–228, DOI: 10.1016/0021-9991(75)90037-6.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu Cr., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg Fr., Villaume S., Thépaut J-N. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, iss. 730, p.1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Ivanova A.A., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A., Shevchenko G.V. Modelirovanie shtormovykh nagonov v pribrezhnoy zone o. Sakhalin [Storm surges modelling in the Sakhalin Island coastal zone], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 3, p. 41–49. (In Russian)
- Johannessen O.M., Kuzmina S., Bobylev L.P. Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalization, *Tellus*, 2016, vol. 68A, 28234., DOI: 10.3402/tellusa.v68.28234.
- Kislov A.V., Rivin G.S., Platonov V.S., Varentsov M.I., Rozinkina I.A., Nikitin M.A., Chumakov M.M. Mezomasshtabnoe modelirovanie ekstremalnykh vetrov nad Okhotskim morem i ostrovom Sakhalin. [Mesoscale modelling of the extreme wind speeds over the Sea of Okhotsk and Sakhalin Island], *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i okeana*, 2018, no. 54, vol. 4, p. 381–385, DOI: 10.1134/S0002351518040090. (In Russian)
- Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Modelirovanie nagonov v Belom i Barentsevom moryakh za period 1979–2015 gg. [Surges modelling in the White and the Barents seas during 1979–2015 period], *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*, 2017, no. 364, p. 144–158. (In Russian)
- Li J., Ma Y., Liu Q., Zhang W., Guan C. Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019, vol. 164, p. 102790, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102790.
- Moore G.W.K., Renfrew I.A. Tip jets and barrier winds: A QuikSCAT climatology of high wind speed events around Greenland, *J. of Clim.*, 2005, vol. 18, no. 18, p. 3713–3725, DOI: 10.1175/JCLI3455.1.
- Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year Wave Hindcast, Storm Activity, and Probability Analysis of Storm Waves in the Kara Sea, Russia, *Water*, 2021, vol. 13, no. 648, DOI: 10.3390/w13050648.
- Myslenkov S.A., Markina M.Yu. Osobennosti rasprostraneniya potoka volnovoi energii v Karskom more [Features of wave energy flux propagation within the Kara Sea], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2018, no. 3, vol. 369, p. 119–131.
- Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Markina M.Yu., Kiseleva S.V., Arkhipkin V.S., Gorlov A.A., Umnov P.M. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' potoka volnovoi energii v Barentsevom more. [Seasonal and interannual variability of the wave energy flux within the Barents Sea], *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2017, no. 19–21, vol. 231–233, p. 36–48, DOI: 10.15518/is-jae.2017.19-21.036-048. (In Russian)
- Outten S.D., Esau I. A link between Arctic sea ice and recent cooling trends over Eurasia, *Clim. Changes*, 2012, vol. 110, no. 3–4, p. 1069–1075, DOI: 10.1007/s10584-011-0334-z.
- Pavlova A.V., Arkhipkin V.S., Myslenkov S.A. Storm surge modelling in the Caspian Sea using an unstructured grid, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, no. 1, p. ES1006, DOI: 10.2205/2019ES000688.
- Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. of Geoph. Res. Atm.*, 2010, vol. 115, no. D21, DOI: 10.1029/2009JD013568.
- Platonov V., Kislov A. High-resolution COSMO-CLM modeling and an assessment of mesoscale features caused by coastal parameters at near-shore Arctic zones (Kara Sea), *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 10, p. 1062, DOI: 10.3390/atmos11101062.
- Platonov V., Varentsov M. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 3, p. 350, DOI: 10.3390/atmos12030350.
- Platonov V.S., Varentsov M.I. Supercomputer technologies as a tool for high-resolution atmospheric modeling towards the climatological timescales, *Supercomp. Front. And Innov.*, 2018, vol. 5, no. 3, p. 107–110, DOI: 10.14529/jsfi180320.
- 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, vol. 356, p. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Rockel B., Geyer B. The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation, *Met. Zeitsch.*, 2008, vol. 17, no. 4, p. 487–498.
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang H.-Y., Juang H.-M., Sela J., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, vol. 91, p. 1015–1057, DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Schär C., Leuenberger D., Fuhrer O., Lüthi D., Girard C. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, 2002, vol. 130, no. 10, p. 2459–2480, DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<2459:ANTFVC>2.0.CO;2.
- Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts, *COSMO Newsletter*, 2003, vol. 3, p. 221–225.
- Serreze M., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 2015, vol. 373, 20140159, DOI: 10.1098/rsta.2014.0159.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.M. Influence of Novaya Zemlya Bora on Sea Waves: Satellite Measurements and Numerical Modeling, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 7, p. 726, DOI: 10.3390/atmos11070726.
- Stopa J., Arduin F., Girard-Arduin F. Wave climate in the Arctic 1992–2014: Seasonality and trends, *Cryosphere*, 2016, vol. 10, p. 1605–1629, DOI: 10.5194/tc-10-1605-2016.
- Storch von H., Langenberg H., Feser F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes, *Mon. Wea. Rev.*, 2000, vol. 128, no. 10, p. 3664–3673, DOI: 10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.
- Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review, *Surv. in Geoph.*, 2014, vol. 35, no. 5, p. 1175–1214, DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
- Voevodin V., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad., Zhumatiy S. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community, *Supercomp. Front. and Innov.*, 2019, vol. 6, no. 2, p. 4–11, DOI: 10.14529/jsfi190201.
- Yang X.Y., Yuan X., Ting M. Dynamical link between the Barents-Kara sea ice and the Arctic Oscillation, *J. of Clim.*, 2016, vol. 29, no. 14, p. 5103–5122, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0669.1.
- Young I.R., Ribal A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height, *Science*, 2019, vol. 364, no. 6440, p. 548–552, DOI: 10.1126/science.aav9527.

Web sources

- Atlas “Klimat morei Rossii i klyuchevykh rayonov Mirovogoo okeana”. ESIMO. Karskoe more [Atlas “Climate of the Russian seas and the World Ocean key regions”. ESIMO. Kara Sea], http://www.esimo.ru/atlas/Karsk/2_waterlevel.html (accessed on date 17.05.2021). (In Russian)
- The Climate Limited-area Modelling Community, 2005, URL: <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom> (access date 17.05.2021).
- Core documentation of the COSMO-model. Consortium for Small Scale Modelling, 2003, URL: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (access date 17.05.2021).
- Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG): User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. +Appendices. (PDF) User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07. 2019, URL: https://www.researchgate.net/publication/336069899_User_manual_and_system_documentation_of_WAVEWATCH_III_R_version_607 (access date 17.05.2021).
- Coastal Emergency Risks Assessment CERA, 2021, URL: <https://cera.coastalrisk.live> (access date 07.08.2021).
- Global Tide – FES2004. AVISO+. Satellite Altimetry Data, URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2004.html> (access date 17.05.2021).
- OSI SAF (Ocean and Sea Ice). EUMETSAT, URL: <http://www.osi-saf.org/?q=content/global-sea-ice-concentration-climate-data-record-smmrsmismissmis> (access date 17.05.2021).

Received 15.03.2021

Revised 04.06.2021

Accepted 20.07.2021

УДК: 528.77

ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ И СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАЛЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ (ВИЗЕ И УШАКОВА) ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ И РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СНИМКАМ

Е.А. Балдина¹, В.Ю. Ширшова², Ф.А. Романенко³, Н.Н. Луговой⁴, Е.Ю. Жданова⁵

¹⁻⁵ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

¹ *Кафедра картографии и геоинформатики, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: baldina@geogr.msu.ru*

² *Кафедра картографии и геоинформатики, аспирант; e-mail: vshirshova.msu@yandex.ru*

³ *Кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: faromanenko@mail.ru*

⁴ *Кафедра геоморфологии и палеогеографии, науч. сотр.; e-mail: lugovoy-n@yandex.ru*

⁵ *Кафедра метеорологии и климатологии, науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com*

В Арктике отчетливо наблюдается повышение среднегодовой температуры воздуха, сокращаются площадь и толщина морского льда [IPCC, 2021] и, следовательно, увеличивается динамически активный период открытой воды, вследствие штормов тают и обламываются края ледников, разрушаются высокие берега и появляются обширные отмели. Эти изменения наиболее заметны на небольших арктических островах, когда-то круглый год окруженных мощными ледяными полями, но все чаще омываемых открытой водой. В августе – сентябре 2019 г. в ходе комплексной экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики – 2019. Северная Земля» на научно-экспедиционном судне «Профессор Молчанов» проведены визуальные обследования островов, выполнены беспилотные съемки с квадрокоптеров. Последующие исследования по космическим снимкам призваны соединить точечные детальные полевые обследования с обзорным видением этих островов. Разный характер островов определил и состав дистанционных методов изучения изменений их береговой линии и поверхности. Динамика береговой линии прослежена по разновременным источникам: топографической карте 1957 г. (1 : 200 000) и космическим снимкам со спутников Landsat-5, 7; современная ситуация охарактеризована по безоблачным снимкам со спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Многократные интерферометрические съемки радиолокационной системой спутника Sentinel-1B (IW – Interferometric Wide Swath) уровня обработки SLC – Single Look Complex за период с 1 января по 31 декабря 2019 г. обеспечили выявление сезонной динамики состояния поверхности о. Визе. Реконструирована многолетняя динамика отступления уступа ледникового купола о. Ушакова. Анализ скорости его отступления показал ускорение сокращения площади ледника с начала 2010-х гг. Показано влияние изменений скорости и направления ветра, температуры воздуха на многолетние изменения береговой линии о-в Визе и Ушакова. Для о. Визе характерен неравномерный размыв берегов, выявлены участки с наибольшей скоростью их отступления и появление аккумулятивных форм – кос. Многовременные композиты с когерентностью, полученные по радиолокационным данным, позволили охарактеризовать сезонную динамику состояния поверхности о. Визе и ее связь с изменчивостью погодных условий. Результаты исследований показывают четко выраженную реакцию береговой линии малых арктических островов на изменения климата в XX–XXI вв.

Ключевые слова: космические снимки, изменение климата, многолетние изменения береговой линии, сезонная динамика поверхности, радиолокационные спутниковые методы

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата и сокращение морского ледового покрова в арктических морях – хорошо известные тенденции [IPCC, 2021], которые с начала XXI в. заметно ускоряются и отчетливо проявляются на малых арктических островах, когда-то окруженных мощными ледяными полями. Реакция береговой линии и поверхности малых островов на эти изменения до сих пор слабо изучена.

В августе – сентябре 2019 г. два автора статьи приняли участие в комплексной экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики – 2019. Северная Земля» на научно-экспедиционном судне «Профессор Молчанов» Северного управления по гидрометеороло-

гии и мониторингу окружающей среды (начальник экспедиции – канд. биол. наук М.В. Гаврило, капитан – С.В. Хохлов) [Открытый океан..., 2019]. Работы включали высадки на берег, где оказывалось возможным, и полевые обследования, наблюдения берегов с судна и съемку отдельных участков квадрокоптерами (как видовую, так и сплошную) для последующего построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР). Все это послужило стимулом к более развернутому исследованию с применением обзорных космических снимков.

Работа посвящена о-вам Ушакова и Визе, которые находятся в редко посещаемой северной части Карского моря. Они существенно отличаются по

многим параметрам, принадлежа к двум разным типам: о. Ушакова – ледниковый купол высотой 294 м, лежащий на скальном основании, о. Визе – низменный (22 м), холмистый, с очень бедной растительностью, лишенный покровного оледенения. Берега о. Ушакова – вертикальные ледяные уступы высотой до 45 м, о. Визе окаймляла полоса битого льда, и съемку с квадрокоптера Н. Луговой выполнял с моторной лодки.

Остров Ушакова, лежащий на 81° с. ш. и 79° в. д., был открыт в 1935 г. Ледник лежит на мелчетвертичном цоколе неясной конфигурации, сложенном песчаниками, алевролитами и песками. Наличие трех ледяных куполов и разделяющих их пологих ледяных седловин позволяет предположить неровную поверхность скальной кровли [Дымов и др., 2011]. Берега о. Ушакова целиком ледяные. Полярная станция была построена в 1954 г. в 800 м от кромки ледника на высоте 59 м [Романенко и др., 2021] и действовала до 1991 г. Обрушение ледяных стен отмечалось работниками станции с самого начала ее существования. Экспедиция 2019 г. строениями станции не обнаружила, так как они упали в море при обрушении края ледника. По данным детальной аэросъемки с квадрокоптера 23 августа 2019 г. свободная от снежного покрова поверхность ледника была изрезана многочисленными ледяными руслами шириной до 3 м и глубиной вреза до 1 м (рис. 1).

Остров Визе, открытый в 1930 г., находится на $79^\circ 30' - 40'$ с. ш. и $76^\circ - 77^\circ$ в. д. «На берег острова В.Ю. Визе ступил 14 августа 1930 г. и с сожалением записал в своем дневнике: „Затерянный среди арктических льдов, этот остров производит крайне унылое и безотрадное впечатление. Он низменный, сложен из осадочных пород, и поверхность его почти лишена растительности. Крайне бедна и его животная жизнь. Даже птицы, обычно встречающиеся на арктических островах в большом количестве, здесь имелись только в единичных экземплярах“» [Стругацкий, 2010]. По современным данным [Аверина, 1970; Ромашенко, 2005; Романенко, 2008, 2012; Качурина, Дымов, 2008; Дымов и др., 2011], центральную часть о. Визе занимает перекрытая четвертичным чехлом пологоувалистая эрозионно-денудационная равнина высотой 10–22 м с меловым цоколем и склонами миоцен-голоценового возраста. Многочисленные ложбины и долины расчленяют равнину на плосковершинные холмы с более пологими южными и более крутыми (до 45°) северными склонами. Самые крупные фрагменты равнины находятся в центральной и южной частях острова. Они окружены сниженными участками, полого спускающимися к цокольной морской террасе высотой 4–8 м. Современная морская терраса высотой до 3 м окаймляет остров, образуя крупный фрагмент на его востоке и многочисленные песчано-галечные косы, отчленяющие лагуны.

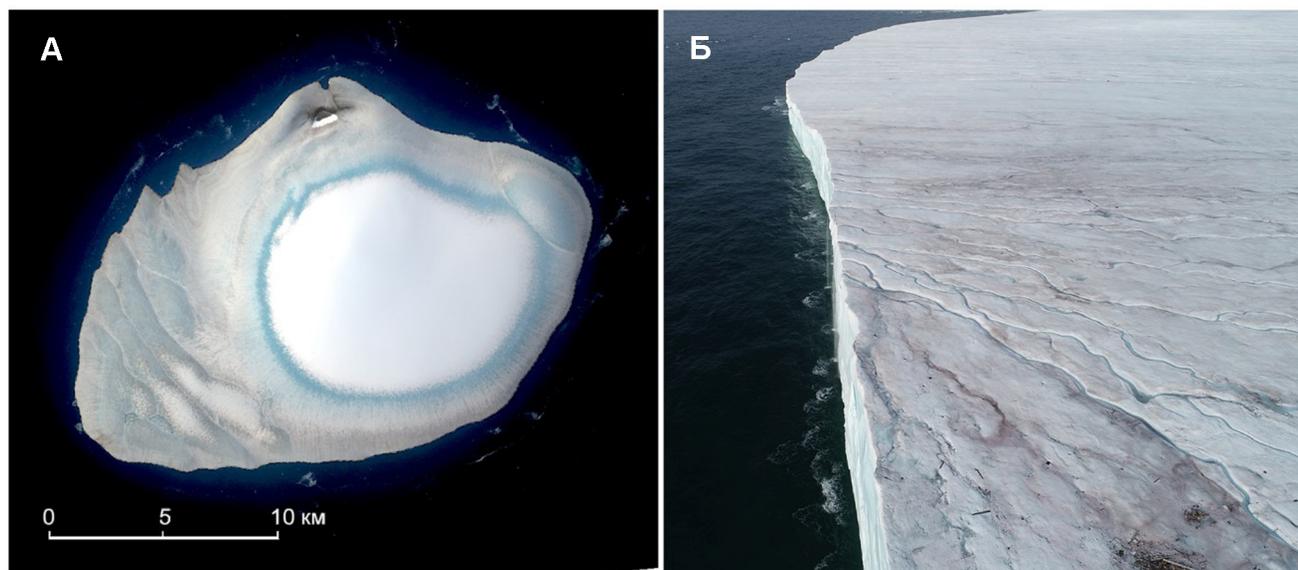


Рис. 1. Остров Ушакова:
А – снимок со спутника Landsat-8, август 2019 г.; Б – ледяной уступ, фотосъемка с квадрокоптера. Фото Н. Луговой

Fig. 1. Ushakov Island:
А – Landsat-8 satellite image, August 2019; Б – ice cliffs photographed from a quadcopter. Photo by N. Lugovogo

В 1945 г. на острове Визе в 100 м от берега была построена полярная гидрометеорологическая стан-

ция, одна из самых уединенных в мире, которая продолжает работать и в настоящее время, обеспе-

чивая многолетний ряд метеонаблюдений. Строе-ния станции периодически приходится переносить вглубь острова из-за обрушения берега (рис. 2). «Кают-компания и дизельная рухнули в воду, стан-ционные дома все время приходилось перетаски-вать. Несколько дней назад (2010) рухнул теплый

склад...» [Стругацкий, 2010]. Средняя скорость от-ступления бровки берегового уступа колебалась око-ло 1,5 м/год [Романенко, 2008]. В 2011 г. «Михаил Сомов» во время снабженческого рейса доставил на остров конструкции нового здания, которое постро-или вдали от берегового уступа.

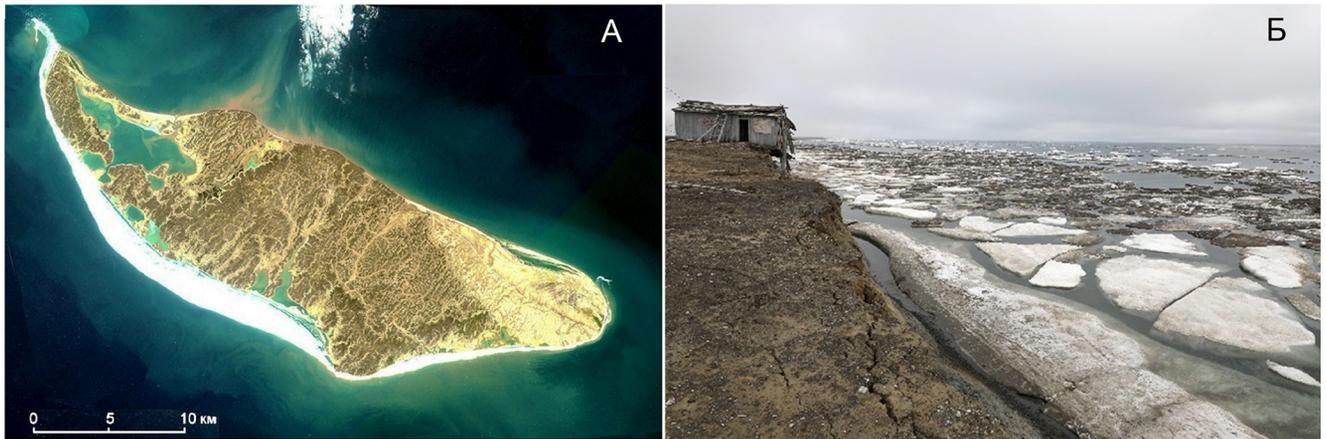


Рис. 2. Остров Визе:

А – снимок со спутника Sentinel-2, август 2019 г.; Б – участок разрушающегося берега со строением полярной станции.
Фото М.В. Гаврило, 2020

Fig. 2. Vize Island

А – Sentinel-2 satellite image, August 2019; Б – a section of the crumbling coast with the buildings of the polar station.
Photo by M.V. Gavrilov, 2020

Проведенные исследования призваны объединить материалы высокодетаальных аэросъемок с данными обзорной космической съемки в оптическом и радиолокационном диапазонах. Их цель – выявить и проанализировать многолетние изменения на существенно различающихся по своей природе о-вах Ушакова и Визе на основе доступных архивных ма-териалов съемок (Landsat-5, 7, 8; Sentinel-2).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления динамики береговой линии островов были подобраны космические снимки со спутников Landsat-5, 7, 8 из архива Геологической службы США [EarthExplorer..., 2021]. Наиболее ранняя ситуация на середину 1950-х гг. отображена на топографической карте масштабом 1 : 200 000, изданной в 1957 г. по материалам съемок берегов 1930-х гг., и гидрографической съемки акватории 1950-х гг. Современная ситуация охарактеризована на основе снимков со спутников Landsat-8 из того же архива и Sentinel-2 [Copernicus Open Access Hub..., 2020]. Съемки выполнены в августе 2019 г. почти в те же даты, когда экспедиция провела детальную аэросъемку небольших участков квадрокоптером. Отобраны практически все безоблачные снимки теплого периода (более 10 малооблачных снимков

за 1986–2019 гг.), когда острова можно уверенно от-делить от окружающих их морских льдов (табл. 1). Пространственное разрешение снимков – 10 м (MSI/Sentinel-2), 15 и 30 м (ETM+ и OLI/Landsat-7, 8), 30 м (TM/Landsat-5).

Для более детального выявления сезонных из-менений поверхности о. Визе привлекались данные радиолокационных съемок, которые позволяют по-лучать изображения интересующих объектов неза-висимо от наличия облачности, обычной летом в Арктике. Были отобраны комплексные (SLC) радио-локационные данные С-диапазона (Sentinel-1 [Co- pernicus Open Access Hub..., 2020]) с согласованной горизонтальной поляризацией. Наиболее полным набором данных был обеспечен 2019 г., для пред-шествовавших лет использовались только материалы за теплый период года. Всего проанализировано 67 изображений (табл. 2).

Изменения состояния поверхности арктических островов, как и интенсивность разрушения их берегов, во многом связана с динамикой климатических усло-вий. Основным климатообразующим фактором в се-верной части Карского моря является расположение в высоких широтах, что определяет сезонные различия в поступлении солнечной радиации. Самые низкие значения температуры воздуха отмечаются в феврале (–26°C в среднем и до –44°C). Активная циклониче-

ская деятельность в холодный период года способствует сильным ветрам, преимущественно южной четверти, большой межсуточной изменчивости температуры воздуха, значительной облачности, частым, но не обильным осадкам. Снежный покров на о. Визе сохраняется в течение 9–10 месяцев, на о. Ушакова – иногда круглогодично. В летний период вследствие высоких отражательных свойств снежно-ледового покрова радиационный баланс низкий, что отражается в низких значениях температуры воздуха. Среднемесячная температура воздуха превышает нулевую отметку только в июле – августе. Лето короткое,

пасмурное, с более слабыми ветрами по сравнению с холодным периодом, циклоническая деятельность ослабляется. Длительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха не превышает двух-трех месяцев, в любое время года могут наблюдаться заморозки. Годовое количество осадков не более 200 мм. По данным спутниковых наблюдений OSI-450 и OSI-430 [Lavergne et al., 2019] в период с 1988 по 2020 г. на прилегающей к о. Визе акватории среднегодовое количество морского льда сокращается (11–15%/10 лет), продолжительность безледного периода увеличивается на 4 дня/год.

Таблица 1

Снимки оптического диапазона, использованные в исследовании

О. Ушакова, даты съемок	Аппарат	О. Визе, даты съемок	Аппарат
25 июля 1986	TM/ Landsat-5	24 июля и 10 августа 1986	TM/ Landsat-5
		6 сентября 1990	TM/ Landsat-5
		10 августа 1992	TM/ Landsat-5
12 августа 1993	TM/ Landsat-5	26 и 29 августа 1993	TM/ Landsat-5
24 августа 1999	ETM+/Landsat-7	5 и 24 августа 1999	ETM+/Landsat-7
19 июля 2002	ETM+/Landsat-7		
2 июля 2007	ETM+/Landsat-7	26 июля 2008	ETM+/Landsat-7
8 августа 2010	ETM+/Landsat-7	3 августа 2010	OLI/Landsat-8
1 августа 2015	OLI/Landsat-8		
9 сентября 2016	MSI/Sentinel-2	2 августа 2018	MSI/Sentinel-2
18 августа 2018	OLI/Landsat-8	18 августа 2019	OLI/Landsat-8
21 августа 2019	MSI/Sentinel-2	21 августа 2019	MSI/Sentinel-2

Таблица 2

Радиолокационные снимки Sentinel-1, использованные для исследования о. Визе

Год съемки	Количество снимков	Сезоны съемок
2016	9	Июль–декабрь
2017	6	По 1 снимку март–декабрь
2018	23	Весь год через 12 дней
2019	29	Весь год через 12 дней

Для определения влияния изменения климатических условий на динамику берегов островов использовались данные измерений (температура воздуха, скорость и направление ветра) полярной метеорологической станции о. Визе (79,48° с. ш., 76,98° в. д.), содержащиеся в архиве [ВНИИГМИ-МЦД..., 2021], а также данные метеорологических реанализов ERA5 [Hersbach et al., 2020] за 1979–2019 гг. и ERA-20C [Poli et al., 2016] за 1952–2010 гг. с пространственным разрешением 0,25°. Из сеточных данных реанализов были выбраны узлы с координатами

80,75° с. ш., 79,5° в. д. для о. Ушакова и 79,25° с. ш., 77° в. д. – для о. Визе. Для скорости ветра временное разрешение данных реанализов составляло 3 часа, для температуры воздуха – 6 часов. Для косвенной оценки влияния морского волнения на разрушение берегов использовалась информация о скорости ветра. Для выявления сезонных изменений поверхности о. Визе за 2016–2019 гг. и их связи с метеорологическими условиями использовались срочные данные о погоде [ВНИИГМИ-МЦД..., 2021]: высота снежного покрова, количество осадков, температура воздуха.

Выполненная с борта судна квадрокоптером DJI Phantom 4 PRO V2.0 аэрофотосъемка участков о-ов Визе (22 августа) и Ушакова (23 августа) обеспечила возможность построения ортофотопланов и цифровых моделей местности (ЦММ) с использованием программного комплекса AgiSoft Metashape. Разрешение полученных таким образом ортофотопланов и ЦММ составило несколько сантиметров, что значительно выше имеющихся материалов космических съемок. Это позволило по результатам анализа полевых материалов оценить точность выявления динамики береговой линии по космическим снимкам и определить на них дешифровочные признаки форм берегового рельефа и процессов динамики рельефа.

Работа с разновременными космическими снимками проводилась в программном комплексе ArcGIS. Для анализа многолетних изменений необходимо максимально точное совмещение неизменившихся участков. Современные материалы космических съемок, получаемые из общедоступных источников уже, как правило, обеспечены координатной привязкой и пространственно совместимы с точностью, которая указывается в характеристике, предоставляемой поставщиком данных. Для снимков видимого диапазона OLI/Landsat-8 ошибка пространственного положения оценивается в 12 м. Однако материалы архивных съемок со спутников Landsat на малые арктические острова в настоящее время предоставляются с уровнем обработки L1GS. Данные этого уровня не только не скорректированы по рельефу, как более новые данные уровня L1GT, но и практически не обеспечены наземными опорными точками [Landsat levels..., 2019]. Привязку исходных архивных снимков TM/Landsat-5 (1986–2008) и их взаимное совмещение пришлось проводить визуально на основе однозначно опознаваемых точек в пределах каждого из островов к более надежным по пространственному положению новым снимкам OLI/Landsat-8. Для малых арктических островов эта задача представляется непростой, поскольку легко опознаваемых контурных элементов крайне мало: помимо многолетних изменений очертаний береговой линии имеют место сезонные различия в состоянии местности. В частности, внутренние водоемы на о. Визе имеют разный размер и общие очертания в начале и в конце короткого теплого периода, а на о. Ушакова снежный покров в отдельные моменты лета закрывает контурные элементы ледового купола. Такими опорными элементами для о. Визе стали перелетовывающие снежники на склонах северной экспозиции и участки небольших узких водоразделов между многочисленными эрозионными ложбинами; для о. Ушакова – строения полярной станции, скальный останец в северной части острова, пологие седловины ледникового купола. Дополни-

тельную возможность коррекции, проверки масштаба и ориентации обеспечили снимки с уровнем обработки L1GT ETM+/Landsat-7 (24 августа 1999 г.) и OLI/Landsat-8 (18 августа 2019 г.), которые охватывали район с обоими островами одновременно. Однако ввиду малого количества необходимых точек ошибка пространственного положения объектов в целом составляет не менее 1 пиксела, т. е. 30 м, а для взаимного расположения объектов на разновременных снимках ~50 м.

В результате пространственного совмещения разновременных снимков стало возможным и было выполнено дешифрирование границы между морем и сушей (о. Визе) или ледяным уступом (о. Ушакова), условно называемой далее береговой линией. Расстояния между береговыми линиями разных лет, определенные в нескольких наиболее характерных местах, использовались для вычисления средней скорости изменения положения береговой линии за соответствующий период. Для о. Ушакова, береговая линия которого составляла единый замкнутый полигон, были вычислены площади острова в каждый из анализируемых сроков.

Обработка радиолокационных снимков (2016–2019) с целью исследования сезонных изменений поверхности о. Визе предполагала получение и анализ изображений когерентности. Когерентность является одним из продуктов интерферометрической обработки, рассчитывается на основе фазовой составляющей сигнала и характеризует согласованность пришедших к радиолокатору в разное время сигналов от одного и того же объекта [Захаров и др., 2012]. Первоначально изображения когерентности служили средством оценки качества данных для создания цифровых карт высот и их изменений (например, просадок и других смещений поверхности). Известен метод формирования цветного радиолокационного изображения – МТС-композигов – путем комбинирования пары разновременных амплитудных снимков и изображения когерентности как меры их сходства (МТС – Multi-temporal coherence) [Пиетранера и др., 2012], используемый для оценки изменений в сельскохозяйственных районах. Последнее время использованию интерферометрической когерентности как средства оценки изменений ландшафтов или их разнообразия, в том числе анализа растительного покрова, посвящается все больше публикаций, например [Jacob et al., 2020]. В нашем исследовании для получения МТС-композигов с изображением о. Визе в программном обеспечении SNAP выполнялась обработка всего набора данных на каждый год. Она включала в себя ряд стандартных процедур (импорт данных, уточнение орбит, выбор полосы, покрывающей остров, поэлементное совме-

щение изображений, вычисление когерентности, устранение разрывов, некогерентное накопление и поправка за влияние рельефа). В итоге для анализа состояния поверхности и его изменений было получено 26 МТС-композигов на весь 2019 г. и по два-три на наиболее интересный теплый период года для других лет для оценки повторяемости состояния поверхности. МТС-композигов, а также изображения когерентности сравнивались с изображением вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по снимкам OLI/Landsat-8 и Sentinel-2 (18 и 21 августа соответственно) и цифровой моделью рельефа ArcticDEM с детальностью 2 м [ArcticDEM..., 2021] для установления характеристик поверхности о. Визе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате последовательного дешифрирования положения ледяного уступа о. Ушакова на снимках разных лет с 1986 по 2019 г. был получен набор линий, соответствующих уступу, что позволило проследить изменение его положения за исследуемый период времени, выполнить оценку площади острова (рис. 3), а также сравнить полу-

ченные результаты с аналогичными исследованиями, проведенными ранее.

Так, детальный анализ изменений площади ледникового купола о. Ушакова [Алейников, Липка, 2018] показал, что с 1986 по 2017 г. его площадь уменьшилась на 36 км², причем максимальные скорости отступления отмечены в 2011–2013 и в 2017 г. Наши исследования подтверждают выявленные тенденции. Площадь о. Ушакова, определенная в результате картографирования Арктики в середине 1950-х гг. (топографическая карта масштаба 1 : 200 000), составила 328 км². Значения площади острова, которые приведены в таблице на рисунке 3, определены по доступным снимкам 1986–2015 гг. (см. табл. 1). Они соответствуют значениям площади для тех же сроков [Алейников, Липка, 2018]: за период 1986–2002 гг. сокращение площади составляло в среднем 0,5 км²/год. Новые данные за последние два года (2018–2019) показывают ускорение процессов разрушения ледяных берегов и уменьшения площади острова. Так, если за 2002–2015 гг. сокращение площади в среднем составило 2,1 км²/год, то за 2015–2019 гг. оно увеличилось до 2,94 км²/год [Романенко и др., 2021].

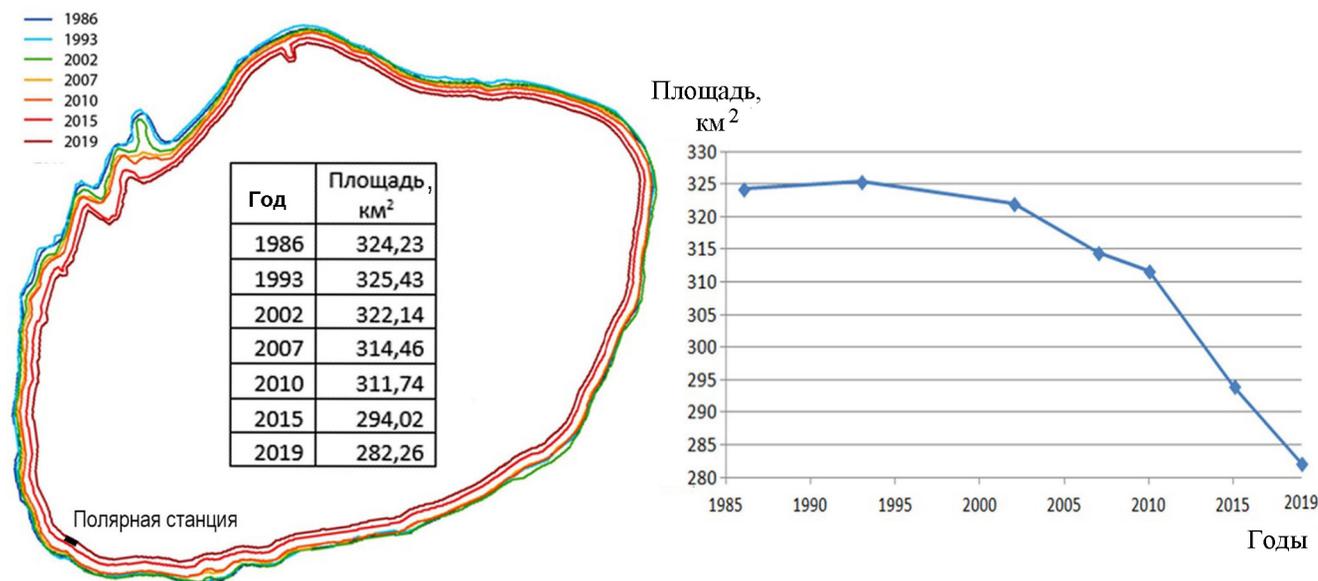


Рис. 3. Динамика положения ледяного уступа о. Ушакова и изменение его площади

Fig. 3. The dynamics of the ice escarpment location of Ushakov Island and changes in its area

Береговая линия о. Ушакова, проведенная по топографической карте, практически совпадает с линией, проведенной по снимку TM/Landsat-5 1986 г., за исключением наиболее активно разрушавшегося ледяного выступа на северо-северо-западе острова. С 1986 по 2010 г. скорость отступления кромки составляла в среднем 10,9 м/год, а за последние 9 лет

(2010–2019) она увеличилась до 38 м/год, причем для периода 2015–2019 гг. – до 52 м/год. То есть за последнее десятилетие скорость разрушения ледяного берега о. Ушакова увеличилась в 3,5 раза.

По детальной цифровой модели местности удалось измерить высоту ледяного клифа о. Ушакова в районе, где прежде была полярная станция, –

44–45 м. Так как изначальная высота станции над уровнем моря была около 59 м [Материалы..., 1957], то за 65 лет ее существования поверхность снизилась примерно на 15 м (в среднем 23 см/год). Эти данные хорошо сходятся с картой динамики поверхности ледника о. Ушакова, созданной на основе данных лазерного альтиметра GLAS, установленного на спутнике ICESat (2003–2009 гг., позволявшего определять высоту с точностью до 10 см), и результатов интерферометрической обработки радиолокационных снимков TerraSAR-x/TanDEM-x [Online Atlas..., 2013; Никольский, 2013], на которой полярная станция лежит в пределах контура со снижением поверхности 5–15 м за 1950–2010 гг. Однако эти данные противоречат топографической карте острова, построенной по материалам спутниковой съемки 2016 г. [Алейников, Липка, 2018], где высота полярной станции – 28 м над уровнем моря. Следует также отметить, что высота участка, определяемая по ArcticDEM до момента обрушения станции, составляет 38–40 м над уровнем моря. Такие расхождения в очередной раз свидетельствуют о сложностях сведения данных, полученных разными исследователями, использующими неодинаковые методы, а также о необходимости продолжения поиска оптимальных методик определения абсолютных значений высот. В то же время для оценки относительных изменений планового положения береговой линии может быть достаточно доступных космических снимков.

Тот же цикл работ по дешифрированию положения береговой линии на разновременных снимках с 1986 по 2019 г. (см. табл. 1) был проведен для о. Визе, лишённого покровного оледенения. Наложение береговых линий разных лет на самый новый снимок (август 2019 г.) позволило установить, что остров размывается и сокращается не так равномерно, как о. Ушакова. Разрушение берегов о. Визе идет активнее на мысах, причем на разных участках с разной скоростью, которая обозначена на рисунке 4 в соответствующих местах для разных периодов времени, заданных сроками доступных съемок. Скорость размыва берегов, определенная, исходя из площади размыва участка за какой-то промежуток времени, оказывается наибольшей (от 6,5 до 10,9 м/год) на юго-западной стороне острова, начиная с 2008 г. При этом отчетливо выросли косы, хорошо определяемые по снимку 2019 г. благодаря полному отсутствию льда (см. рис. 4, участки 1, 2 и 3). Отмель у выхода из большой лагуны (участок 2) выросла на 80 м в 1999–2009 гг. и еще на 160–190 м за следующие 10 лет. Их рост относительно положения на топографической карте 1957 г. достиг 3,5 км на участке 3 и 2 км на участке 1, где одновременно северная часть косы искривляется, приближаясь к

берегу, а южная часть почти исчезает. На врезке (см. рис. 4В) показана современная коса участка 3, хорошо заметная на снимке 2019 г., но отсутствующая на топографической карте. По непосредственным наблюдениям зимовщиков полярной станции [Романенко, 2008], скорость отступления южного берега в 1950–1958 гг. колебалась от 0,46 до 7,2 м/год, составляя в среднем 1,5–1,6 м.

Наложение двух созданных по высокодетальной аэросъемке с квадрокоптера ортофотопланов (съемка 22 августа 2019 г.) на космический снимок со спутника Sentinel-2 (съемка 21 августа того же года) (см. рис. 4Б) показывает высокую степень пространственного соответствия в пределах разрешения космического снимка (10 м). Сопоставление изображений, размер пиксела которых отличается более чем в 100 раз, не позволяет перенести дешифровочные признаки отдельных объектов с детального изображения на космический снимок. Однако положение береговой линии 2019 г. на них определяется однозначно, а при сравнении со снимком TM/Landsat-5 24 июля 1986 г., на котором дано положение береговой линии на три периода времени, выявляется разная степень ее отступления вглубь острова. Этот участок не относится к числу мысов, однако и на нем идет неравномерный размыв берега, в том числе и по небольшим термоэрозионным ложбинам.

Изображения когерентности, полученные по радиолокационным интерферометрическим данным, позволили интерпретировать состояние и изменение поверхности острова и части прилегающей к нему акватории в течение 2019 г. Приведенные на рисунке 5 МТС-композиции иллюстрируют наиболее характерное «сезонное» состояние поверхности острова и ближайшей акватории за 12-дневные периоды. Период конец августа – начало сентября отличается максимальными температурами и, как следствие, отсутствием льда вокруг острова. Также только сентябрьскому композиту присущ яркий белый цвет, за счет высоких значений сигнала, свидетельствующий о постоянстве состояния поверхности за 12 дней. Можно отметить, что это типично при высоком уровне отражения, обусловленном высокой влажностью поверхности и наличием скудной растительности. Состояние поверхности острова в январе, мае и августе на первый взгляд кажется одинаковым ввиду отображения преимущественно в оттенках синего: в мае с переходом в фиолетовый, в августе – в белый. Однако речная сеть имеет более четкое отображение в августе, и мы видим сильную расчлененность острова, что говорит об отсутствии снежного и ледового покрова. В свою очередь, характерный для января яркий синий цвет – высокая когерентность – отсутствие изменений и низкое

отражение, так как поверхность покрыта снегом и скована морозом. При этом прилегающая акватория в зимний период (МТС-композиты на январь, май) изображена различными не только ледовыми текстурами, но и разными цветами, что свидетельствует о значительных изменениях в ледяном покрове: как перемещении, так и таянии льдов. В мае на фоне той же картины скованности льдом переходы от синего к фиолетовому характеризуют изменение поверхности, обусловленное резкими изменениями температуры воздуха. Так, в середине мая наблюдалось ее резкое повышение в сторону 0°C , повлекшее за собой изменение свойств снега, что отразилось различием в цветах на майском композите.

Сопоставление изображений с подробной информацией об изменчивости погодных условий показало, что высокая когерентность, обусловленная стабильным состоянием поверхности при почти полном отсутствии осадков за этот период

на фоне максимальных за год значений температуры воздуха, приходится на «теплый период года». После схода снежного покрова состояние поверхности меняется слабо, что дает стабильно высокие значения когерентности, небольшое снижение дает выпадение осадков между съемками. Значения когерентности относительно высокие при стабильной высоте снежного покрова, некоторое уменьшение ее значений связано с колебаниями температуры воздуха: значения когерентности заметно снижаются в период снеготаяния и роста температуры воздуха в сочетании с периодическими снегопадами, приводящими к увеличению высоты свежего снежного покрова. Наиболее низкие значения когерентности наблюдаются при неизменной высоте снежного покрова в сочетании с переходом к положительным температурам воздуха, ведущим к изменению свойств поверхности снега.

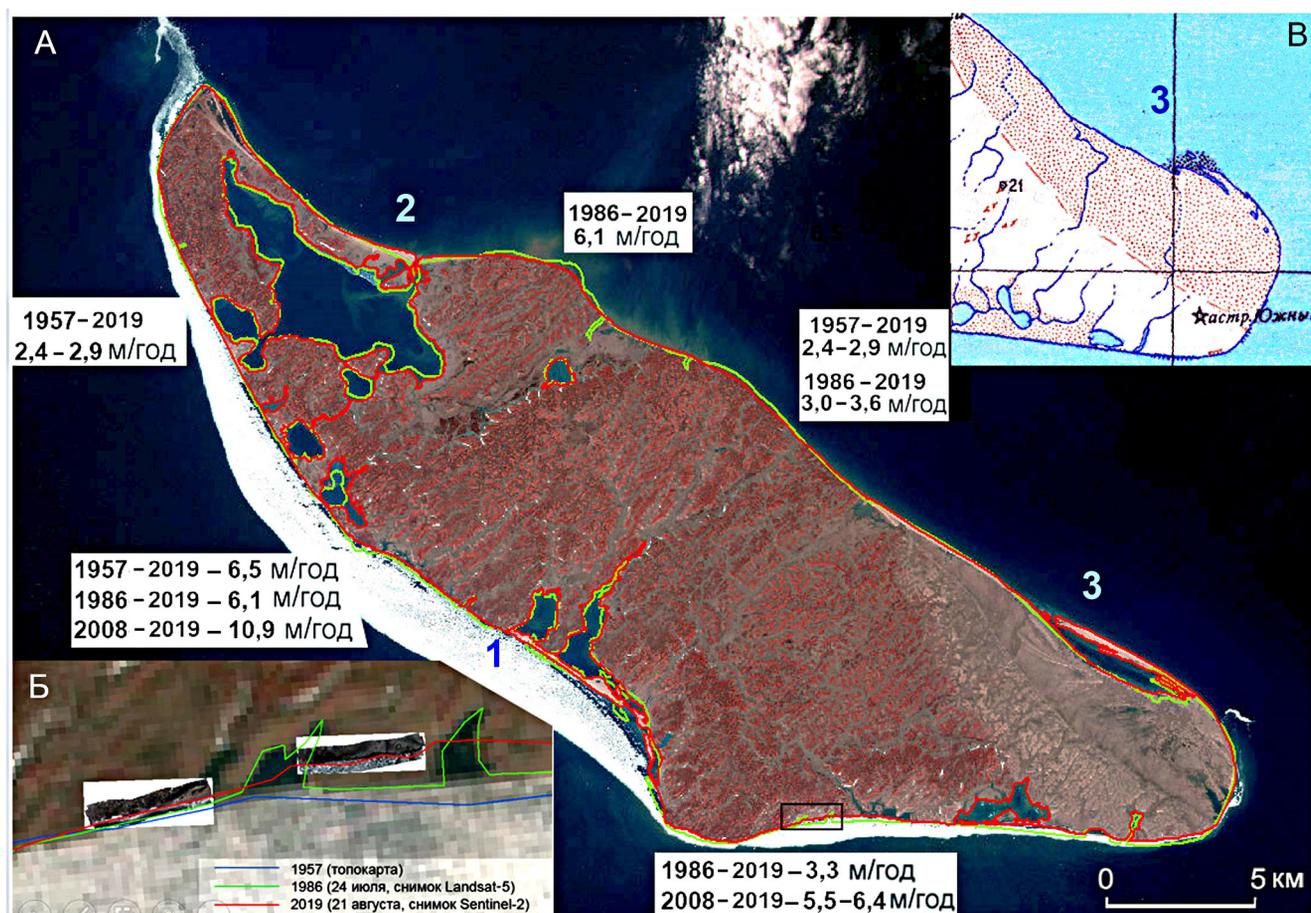


Рис. 4. Изменение очертаний о. Визе:

А – космический снимок со спутника Sentinel-2 (21 августа 2019 г.); Б – небольшой фрагмент снимка TM/Landsat-5 (1986 г.) с наложенными береговыми линиями и ортофотопланами (участок обозначен рамкой на снимке А); В – фрагмент топографической карты (середина 1950-х гг.)

Fig. 4. Changes in the outlines of the Vize island:

А – Sentinel-2 satellite image from August 21, 2019; Б – small fragment of 1986 TM/Landsat-5 image with superimposed coastlines and orthophotomaps (the area is indicated by a frame in the photo А); В – a fragment of a topographic map (mid-1950s)

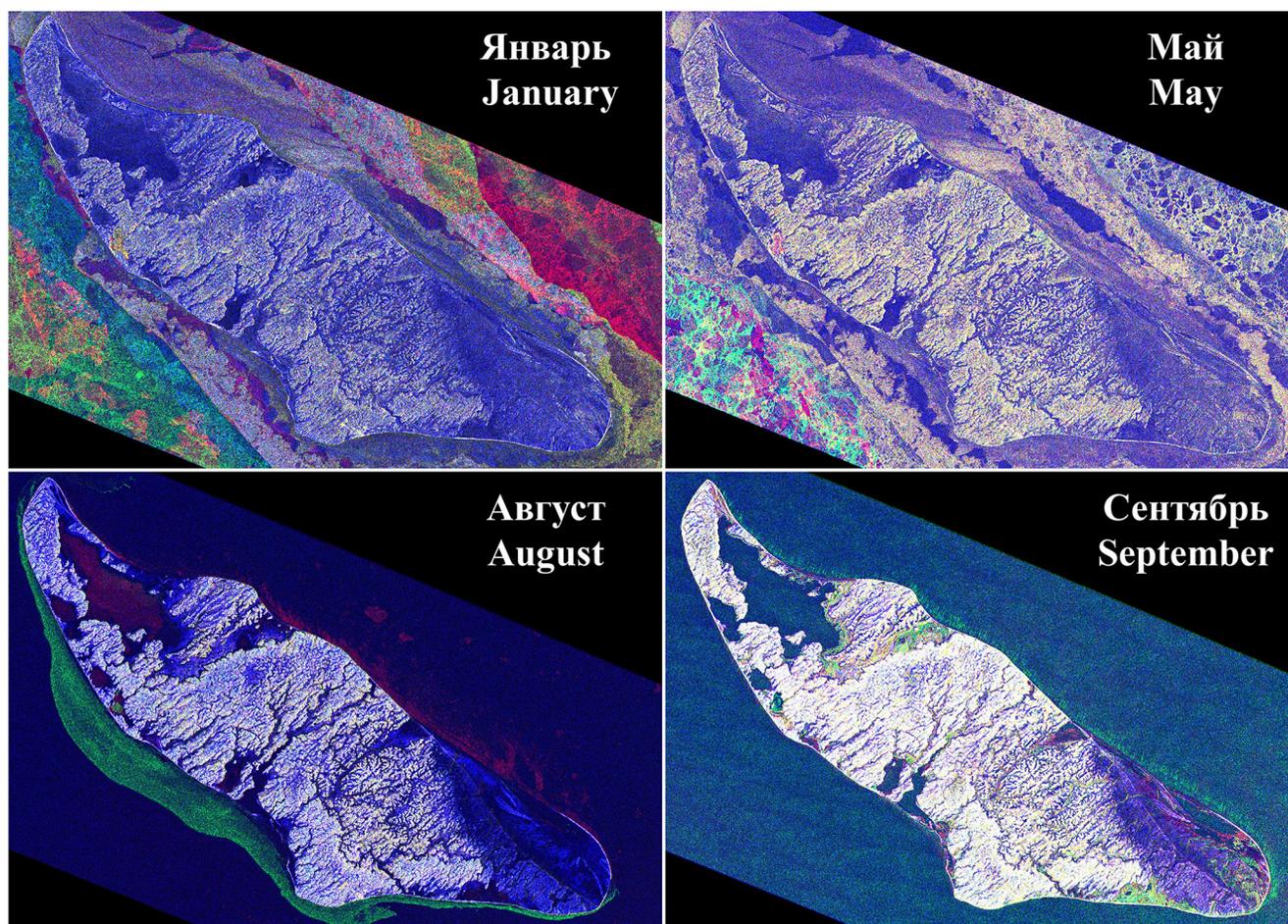


Рис. 5. Состояние поверхности и изменение о. Визе и ближайшей акватории на многовременных композитах с когерентностью (МТС-композиты) для некоторых 12-дневных периодов 2019 г.

Fig. 5. Surface conditions and changes in Vize Island and nearby water areas on multitemporal coherent composites (MTC composites) for some 12-day periods in 2019

Наиболее заметные изменения ледового покрова, непосредственно примыкающего к острову и воздействующего на его берега, наблюдались в январе 2019 г., с конца июня до начала сентября, затем с конца октября до середины декабря 2019 г. Эти периоды характеризовались интенсивной циклонической деятельностью, значительной изменчивостью температуры воздуха, выпадением осадков, и, следовательно, изменением состояния поверхности. Остров Визе был окружен практически неизменными льдами с начала февраля по июнь 2019 г.

Свойства поверхности острова в бесснежный период можно охарактеризовать путем сравнения изображений МТС-композитов, ЦМР ArcticDEM и рассчитанных по данным оптического диапазона значений вегетационного индекса NDVI. Основной рисунок поверхности создается сочетанием термоэрозионных ложбин разного порядка, лишенных всякого растительного покрова, и разделяющих их междуречий шириной до нескольких десятков или сотен метров. Ложбины в течение теплого периода

практически неизменны и дают слабую интенсивность радиолокационного отражения, что свойственно, например, ровным песчаным поверхностям. Такие фрагменты имеют интенсивно темный синий цвет на МТС-композитах. Водораздельные участки более яркие, что свидетельствует о большей интенсивности радиолокационного сигнала при сохранении стабильного состояния, что может говорить в пользу как тонкого слоя растительности, так и повышенной влажности (рис. 6). О наличии разреженного растительного покрова на междуречьях свидетельствуют значения NDVI 0,1–0,25 (см. рис. 6В). Территория бывшей воинской части (закрытой еще в 1993–1994 гг.), выделенная на рисунке 6 рамкой, отличается стабильным во все сезоны ярко-желтым цветом с переходами в белый, очевидно, из-за находящихся там остатков строений и большого числа металлических бочек и контейнеров. Известно, что для антропогенных объектов характерны высокие значения амплитуды и высокая когерентность. Заслуживает внимания и тот факт,

что растительность на том же участке значительно обильнее (NDVI 0,25–0,35), чем в остальной части острова. Причины этого кроются в обогащении

грунта бытовыми отходами воинской части, отепляющем воздействии на почву остатков строений и бочек, влиянии небольшой колонии белых чаек.

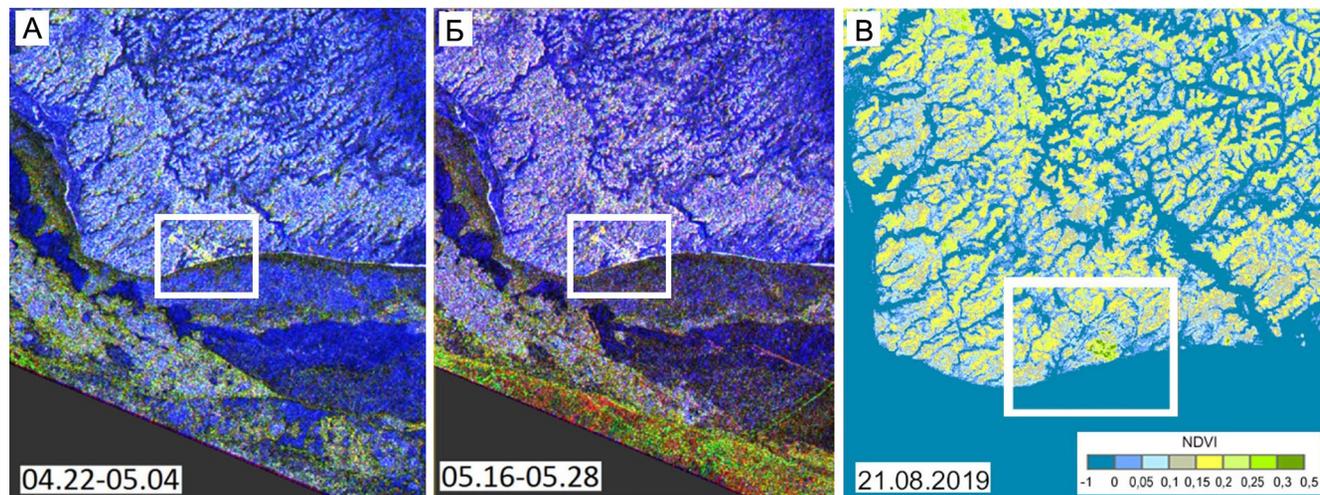


Рис. 6. Южная часть о. Визе с на МТС-композициях (А, Б) и индексном изображении (NDVI) по снимку Sentinel-2 21.08.2019 (В). Рамкой выделен участок расположения недействующей воинской части, характеризующийся аномальными значениями всех параметров

Fig. 6. Southern part of Vize Island on MTC composites (A, B) and index (NDVI) images from Sentinel-2 image, 21.08.2019 (B).

The frame marks the location of an inactive military unit, characterized by abnormal values of all parameters

Известный тренд повышения среднегодовой температуры в Арктике [IPCC, 2021] характерен и для исследованных островов. Прослеживается увеличение в последние годы количества дней с сильным ветром как в целом за год, так и в теплый период года по данным реанализов ERA5 и ERA-20C. Данные реанализов были тестированы по стационарным наблюдениям на станции Визе. Оказалось, что среднесуточная скорость ветра по данным реанализа ERA5 в среднем на 0,1 м/с выше стационарных данных, а по данным реанализа ERA-20C – на 0,8 м/с меньше. Для получения однородного ряда скоростей ветра данные реанализа ERA-20C были увеличены на 1 м/с. За дни с сильным ветром принимались дни, когда средняя скорость ветра за 6 часов превышала 10 м/с. В более южном районе о. Визе, чаще посещаемом циклонами, дней с сильными ветрами наблюдается больше (табл. 3).

Для определения роли метеорологических факторов в многолетней динамике берегов по аналогии с работой [Shabanova et al., 2018] для каждого года были рассчитаны отклонения сумм положительных значений температуры воздуха и количества дней со скоростями ветра более 10 м/с относительно их среднего значения за период с 1980 по 2000 г. ($X_i - X_{cp}$), которые затем были нормированы на стандартное отклонение (σ). Данный временной период для расчета средних значений был выбран как относительно

однородный. Такая нормировка позволяет сопоставить изменчивость температуры воздуха и скорости ветра. Как видно на рисунке 7, в последнее десятилетие термический фактор претерпевал значительные межгодовые изменения. Можно предположить, что максимальное воздействие термического фактора на изменения положения береговой линии приходится на 2012 и 2016 гг., а наибольшее воздействие ветрового фактора – на 2012 г. [Жданова, 2021]. Стоит отметить, что в августе 2012 и 2016 гг. наблюдались особенно глубокие арктические циклоны [Simmonds, Rudeva, 2012; Yamagami et al., 2017]. Изменчивость циклонической активности в разные сезоны года определяет и изменчивость ледового покрова. Так, аномальные штормы в августе 2012 и 2016 гг. обусловили рекордно низкие значения площади морских льдов [Parkinson, Comiso, 2013; Petty et al., 2018].

ВЫВОДЫ

В настоящее время на островах открытого моря разрушение разных типов берегов идет с высокими скоростями, и облик этих небольших участков суши может в ближайшие десятилетия коренным образом измениться. Береговая линия арктических островов меняется за счет комплекса гидрометеорологических факторов: роста температуры воздуха, уменьшения площади морского льда, усиления ветро-волновой активности в теплый период года.

Таблица 3

Количество дней со скоростью ветра больше 10 м/с в течение года и его теплого периода для о. Визе и о. Ушакова по данным реанализов ERA5 и ERA-20C

Период	1957–2019	1986–2019	2008–2019
<i>о. Ушакова</i>			
Год	82	87	95
Теплый период	9	10	11
<i>о. Визе</i>			
Год	87	92	102
Теплый период	12	15	19



Рис. 7. Отклонения суммы положительных среднесуточных температур воздуха и количества дней со скоростями ветра больше 10 м/с от их среднего значения за 1980–2000 гг., нормированные на их стандартное отклонение для о. Визе и о. Ушакова [Жданова, 2021]

Fig. 7. Deviations of the sum of positive average daily air temperatures and the number of days with wind speeds of more than 10 m/s from their average value for 1980–2000, normalized to the standard deviation for Vize Island and Ushakov Island [Zhdanova, 2021]

Совместное использование доступных дистанционных данных разного пространственного охвата и временной периодичности позволяет существенно расширить получаемый диапазон сведений о малоизученных и труднодоступных островах Карского моря, открывает возможности их регулярного мониторинга.

Установлено, что на о. Визе размываются главным образом мысы, а низкие косы заметно растут. Скорость размыва мысов на о. Визе оказалась наибольшей (до 10,9 м/год) на юго-западной стороне острова за период с 2008 по 2019 г. и от 3 до 6,5 м/год в среднем за период с 1986 по 2019 г. на остальных мысах. При этом отмечается отчетливый рост кос относительно положения на топографической карте от 2 до 3,5 км.

Напротив, ледниковая шапка о. Ушакова сокращается равномерно по периметру. Скорость умень-

шения площади острова Ушакова увеличилась с 2,1 км²/год в 2002–2015 гг. до 2,94 км²/год за 2015–2019 гг. Отступление кромки ледяного уступа за последние 9 лет составило в среднем 38 м/год при росте до 52 м/год за последние четыре года.

Многовременные разносезонные радиолокационные данные и особенно цветные композиты с когерентностью позволяют наглядно выделить «спокойные и активные» периоды в состоянии ледяного покрова вокруг островов, а также активность термоэрозионных процессов на поверхности в беснежный период. Новый тип дистанционных данных подтвердил, что поверхности островов сильнее всего меняются в период выпадения и таяния снега, а наиболее стабильной, несмотря на выпадавшие жидкие осадки, поверхность острова Визе была в течение августа и первой половины сентября 2019 г. на фоне максимальных за год значений температуры воздуха.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания кафедры картографии и геоинформатики Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051400061-9) и кафедры геоморфологии и палеогеографии (№ АААА-А16-11632810089-5). Анализ космических снимков и метеорологической информации выполнен при поддержке РФФИ (проект № 18-05-602211). Авторы глубоко признательны М.В. Гаврило за организацию экспедиции и предоставленные фотоматериалы 2020 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверина И.М. Острова Карского моря / Советская Арктика. М.: Наука, 1970. С. 388–391.
- Дымов В.А., Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Орлов В.В., Старк А.Г. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41-44 (Земля Франца-Иосифа – восточные острова). Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 220 с.
- Жданова Е.Ю. Гидрометеорологические факторы изменения береговой линии арктических островов // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы VI Международной научно-практической конференции, Майкоп, 17–21 мая 2021 года, 2021. С. 102–107.
- Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
- Качурина Н.В., Дымов В.А. Геоморфологическая карта. Государственная геологическая карта РФ. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41-44 (Земля Франца-Иосифа – восточные острова). СПб.: ПМГРЭ, 2008.
- Материалы истории полярной станции о. Ушакова. 1955–1957, РГАЭ. Фонд 9570, оп. 2, дело 3332. 23 л.
- Никольский Д.Б. Профильно-площадная методика дистанционного зондирования ледников // Известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 77–83.
- Пиетранера Л., Бритти Ф., Чезарано Л., Джентиле В., Кантемиров Ю. Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. № 1. С. 46–51.
- Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых // Геоморфология. 2008. № 1. С. 56–64. DOI: 10.15356/0435-4281-2008-1-56-64.
- Романенко Ф.А. Региональные особенности развития арктических берегов в голоцене // Геоморфология. 2012. № 4. С. 81–92. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-4-81-92.
- Романенко Ф.А., Балдина Е.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю. Динамика берегов островов северной части Карского моря (ст. 1. Остров Ушакова) // Геоморфология. 2021. Том. 52. № 3. С. 116–124. DOI: 10.31857/S043542812103010X.
- Ромашенко О.Г. Геоморфологическая карта. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист T-41-44 (мыс Желания). Объяснительная записка. СПб.: МАГЭ-ПМГРЭ, 2005.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, p. 1999–2049. DOI: 10.1002/QJ.3803.
- Jacob A.W., Vicente-Guijalba F., Lopez-Martinez C., Lopez-Sanchez J.M., Litzinger M., Kristen H., Mestres-Quereda A., Ziolkowski D., Lavallo M., Notarnicola C., Suresh G., Antropov O., Ge Sh., Praks J., Ban Y., Pottier E., Franquet J.J.M., Duro J., Engdahl M.E. Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, vol. 13, p. 535–552. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2958847.
- Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S., Tonboe R., Notz D., Aaboe S., Bell L., Dybkjær G., Eastwood S., Gabarro C., Heygster G., Killie M.A., Kreiner B.M., Lavelle J., Saldo R., Sandven S., Pedersen L.T. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records, *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, p. 49–78. DOI: 10.5194/tc-13-49-2019.
- Parkinson C.L., Comiso J.C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 1356–1361. DOI: 10.1002/grl.50349.
- Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, p. 433–452. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>.
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G.H., Peubey C., Thépaut J.N., Trémolet Y., Hólm E.V., Bonavita M., Isaksen I., Fisher M. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, no. 11, p. 4083–4097. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western Russian Arctic coastal dynamics: XX-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.
- Simmonds I., Rudeva I. The great Arctic cyclone of August 2012: The great arctic cyclone of august 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, iss. 23, L23709, 6 p., 2012. DOI: 10.1029/2012GL054259.
- Yamagami A., Matsueda M., Tanaka H.L. Extreme Arctic cyclone in August 2016. *Atmospheric Science Letters*, 2017, vol. 18, p. 307–314, DOI: 10.1002/asl.757.

Электронные ресурсы

- Алейников А., Липка О. Деградация покровного оледенения острова Ушакова по материалам космических съемок // Земля из космоса. 2018. № 9(25). С. 32–39. URL: <http://zikj.ru/images/25/7.pdf> (дата обращения 01.05.2021).
- ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 01.06.2021).
- Открытый океан: Архипелаги Арктики – 2019. Северная Земля // Русское Географическое Общество. Санкт-Петербургское городское отделение. 2019. URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/otkrytyy-okean-arhipelagi-arktiki-2019-severnaya-zemlya> (дата обращения 01.05.2021).
- Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (дата обращения 01.05.2020).
- Стругацкий В. В поисках «ледяного дома» // Росбалт, 2010. URL: <https://www.rosbalt.ru/main/2010/10/05/778042.html> (дата обращения 01.05.2021).
- ArcticDEM. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arctic-dem/> (дата обращения 01.05.2021).
- Copernicus Open Access Hub: European Programme for the Establishment of a European Capacity for Earth Observation. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> (дата обращения 01.02.2020).
- EarthExplorer. USGS. Science for changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 01.05.2021).
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 2021, URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения 20.09.2021).
- Landsat Levels of Processing. 2019. URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing> (дата обращения 01.05.2021).
- Online Atlas of Glacier Fluctuations in the Eurasian High Arctic. 2021. URL: http://dib.joanneum.at/maires/downloads/KOMS_SCHM_USH.pdf (дата обращения 01.05.2021).

Поступила в редакцию 03.06.2021
 После доработки 15.07.2021
 Принята к публикации 20.07.2021

DYNAMICS OF COASTLINE AND SURFACE CONDITIONS OF THE SMALL ARCTIC ISLANDS (VIZE AND USHAKOVA) FROM MULTITEMPORAL OPTICAL AND RADAR IMAGES

E.A. Baldina¹, V.Yu. Shirshova², F.A. Romanenko³, N.N. Lugovoi⁴, E.Yu. Zhdanova⁵

¹⁻⁵ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Cartography and Geoinformatics, Leading Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: baldina@geogr.msu.ru*

² *Department of Cartography and Geoinformatics, post graduate student; e-mail: vshirshova.msu@yandex.ru*

³ *Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: faromanenko@mail.ru*

⁴ *Department of Geomorphology and Paleogeography, Researcher; e-mail: lugovoy-n@yandex.ru*

⁵ *Department of Meteorology and Climatology, Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com*

There is a clear trend in the Arctic of increasing mean annual air temperature, decreasing area and depth of the sea ice cover [IPCC, 2021], increasing open water period; the glacier edges thaw and break due to storms, high shores destruct and extensive shoals appear. These changes are most noticeable on small Arctic islands, once surrounded by thick ice fields but increasingly exposed to open water, thus making them of special interest. During the unique complex expedition “Open Ocean: Archipelagoes of the Arctic. Severnaya Zemlya-2019” on the Professor Molchanov research vessel in August-September 2019 full-scale field surveys of the islands and unmanned surveys from quadcopters were conducted. Subsequent surveys based on remote sensing data are intended to combine detailed field surveys with an overview coverage of these islands. Different nature of the islands requires applying different methods of studying their dynamics with remote sensing data. Changes in the islands’ coastline are traced using a set of different time sources, i. e. the 1957 topographic map (1 : 200 000) and space images from Landsat 5, 7 satellites. The current situation is described according to cloud-free images from Landsat 8 and Sentinel 2 satellites. Multiple interferometric images of Sentinel-1B (IW – Interferometric Wide Swath) radar system processing level SLC – Single Look Complex for 2019 supported a study of the seasonal dynamics of the Vize Island surface. The multiyear dynamics of ice edge retreat was revealed for the Ushakov Island. The retreat rate analysis proved the accelerated decrease of the ice cap area since the 2010-s. We accessed the influence of changing climatic conditions on the coastline dynamics of the Vize and Ushakov islands with due account of the wind speed and direction and the air temperature. Uneven coastal erosion is characteristic of the Vize Island, and the areas with the highest rate of coastline retreat were identified, as well as new accumulative forms, e. g. bars. Multitemporal composites with coherence obtained from the radar data made it possible to characterize the seasonal dynamics of the state of the Vize island surface

and its dependence on variable weather conditions. The results of research show an obvious response of the small islands' coastlines to the climate changes of the 20th–21st centuries.

Keywords: satellite imagery, climate change, long-term shoreline changes, seasonal surface dynamics, radar satellite methods

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Department of Cartography and Geoinformatics (No. 121051400061-9) and the Department of Geomorphology and Paleogeography (No. AAAA-A16-11632810089-5) of the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University. The analysis of space images and meteorological information was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-602211).

REFERENCES

- Averina I.M. Ostrova Karskogo morya, *Sovetskaya Arktika* [Islands of the Kara Sea. Soviet Arctic], Moscow, Nauka Publ., 1970, p. 388–391. (In Russian)
- Dymov V.A., Kachurina N.V., Makar'ev A.A., Makar'eva E.M., Orlov V.V., Stark A.G. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF, 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List U-41-44 (Zemlya Frantsa-Iosifa – vostochnyye ostrova). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. 1 : 1000 000 (third generation). Series North-Kara-Barents Sea. Sheet U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands). Explanatory note.] St. Petersburg, VSEGEI Publishing house, 2011, 220 p. (In Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/QJ.3803.
- Jacob A.W., Vicente-Guijalba F., Lopez-Martinez C., Lopez-Sanchez J.M., Litzinger M., Kristen H., Mestre-Quereda A., Ziolkowski D., Lavallo M., Notarnicola C., Suresh G., Antropov O., Ge Sh., Praks J., Ban Y., Pottier E., Franquet J.J.M., Duro J., Engdahl M.E. Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, vol. 13, p. 535–552, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2958847.
- Kachurina N.V., Dymov V.A. *Geomorfologicheskaya karta. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF, 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List U-41-44 (Zemlya Frantsa-Iosifa – vostochnyye ostrova)* [Geomorphological map RF. State geological map of the Russian Federation, 1:1 000 000 (third generation). Series North-Kara-Barents Sea. Sheet U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands)], St. Petersburg, PMGRE Publ., 2008. (In Russian)
- Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S., Tonboe R., Notz D., Aaboe S., Bell L., Dybkjær G., Eastwood S., Gabarro C., Heygster G., Killie M.A., Kreiner B.M., Lavelle J., Saldo R., Sandven S., Pedersen L.T. Version 2 of the EU-METSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records, *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, p. 49–78. DOI: 10.5194/tc-13-49-2019.
- Materialy istorii polyarnoy stantsii o. Ushakova* [Materials on the history of the polar station on the Ushakov Island]. 1955–1957, RGAE, Fond 9570, op. 2, file 3332, 23 p. (In Russian)
- Nikolsky D.B. Profil'no-ploshchadnaya metodika distantsionnogo zondirovaniya lednikov [Profile-areal technique for remote sensing of glaciers], *Izvestiya VUZov: Geodesy and Aerophotos'emka*, 2013, no. 5, p. 77–83. (In Russian)
- Parkinson C.L., Comiso J.C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 1356–1361, DOI: 10.1002/grl.50349.
- Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, p. 433–452, DOI: 10.5194/tc-12-433-2018.
- Pietranera L., Britti F., Cesarano L., Gentile V., Kantemirov Yu. Novyj produkt MTC, rasschityvayemy po dannym COSMO-SkyMed [New MTC product calculated from the COSMO-SkyMed data], *Geomatica*, 2012, no. 1, p. 46–51. (In Russian)
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G.H., Peubey C., Thépaut J.N., Trémolet Y., Hólm E.V., Bonavita M., Isakson L., Fisher M. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, no. 11, p. 4083–4097, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Romanenko F.A. Intensivnost' geomorfologicheskikh protsessov na ostrovakh i poberezh'yakh morey Karskogo i Laptevyykh [The geomorphic processes intensiveness on the islands and coasts of the Kara and Laptev seas], *Geomorfologiya*, 2008, no. 1, p. 56–64, DOI: 10.15356/0435-4281-2008-1-56-64. (In Russian)
- Romanenko F.A. Regional'nyye osobennosti razvitiya arkticheskikh beregov v golotsene. [Regional features of the Arctic coasts' evolution in Holocene], *Geomorfologiya*, 2012, no. 4, p. 81–92, DOI: 10.15356/0435-4281-2012-4-81-92. (In Russian)
- Romanenko F.A., Baldina E.A., Lugovoy N.N., Zhdanova E.Yu. Dinamika beregov ostrovov severnoj chasti Karskogo morya (st. 1. Ostrov Ushakova) [Shoreline dynamics of the islands of the northern part of the Kara Sea (paper 1. Ushakov Island)], *Geomorfologiya*, 2021, no. 3, p. 116–124, DOI: 10.31857/S043542812103010X. (In Russian)
- Romashchenko O.G. *Geomorfologicheskaya karta. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List T-41-44 (mys*

- Zhelaniya*) [Geomorphological map. State geological map of the Russian Federation, 1:1000 000 (third generation). Series North Kara-Barents Sea. Sheet T-41-44 (Cape Zhelaniia)], St. Petersburg, MAGE-PMGRE Publ., 2005. (In Russian)
- Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western Russian Arctic coastal dynamics: XX-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129, DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.
- Simmonds I., Rudeva I. The great Arctic cyclone of August 2012: The great arctic cyclone of august 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, iss. 23, L23709, 6 p., DOI: 10.1029/2012GL054259.
- Yamagami A., Matsueda M., Tanaka H.L. Extreme Arctic cyclone in August 2016, *Atmospheric Science Letters*, 2017, vol. 18, p. 307–314, DOI: 10.1002/asl.757.
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M. *Sputnikovyi monitoring Zemli. Radiolokatsionnoe zondirovanie pov-erkhnosti* [Satellite Earth observation. Radar remote sensing of the surface], Moscow, Krasand Publ., 2012, 248 p. (In Russian)
- Zhdanova E.Yu. Hydrometeorological factors of changes in the coastline of the Arctic islands, *Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informacionnykh tehnologij: materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Majkop, 17–21 maja 2021 goda* [Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies, Proc. VI International Scientific and Practical Conference, Maykop, 17–21 May 2021], 2021, p. 102–107. (In Russian)
- Web sources*
- Aleiniĸov A., Lipka O. Degradatsiya pokrovnogo oledeneniya ostrova Ushakova po materialam kosmicheskikh s"yemok [The degradation of the ice cover of the island of Ushakov according to the materials of space images survey], *Earth from space*, 2018, no. 9(25), p. 32–39, URL: <http://zikj.ru/images/25/7.pdf> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- ArcticDEM, URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (access date 01.06.2021).
- Copernicus Open Access Hub: European Programme for the Establishment of a European Capacity for Earth Observation, URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> (access date 01.02.2020).
- EarthExplorer. USGS. Science for changing world, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (access date 01.05.2021).
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 2021, URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (access date 20.09.2021).
- Landsat Levels of Processing, 2019, URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing> (access date 01.05.2021).
- Online Atlas of Glacier Fluctuations in The Eurasian High Arctic, URL: http://dib.joanneum.at/maires/downloads/KOMS_SCHM_USH.pdf (access date 01.05.2021).
- Otkrytyy okean: Arkhipelagi Arktiki – 2019. Severnaya Zemlya [“Open Ocean: Archipelagoes of the Arctic – 2019. Severnaya Zemlya”], URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/otkrytyy-okean-arhipelagi-arktiki-2019-severnaya-zemlya> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- Pogoda i klimat [Weather and climate], URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- RIHMI-WDC, URL: <http://meteo.ru/data> (access date 01.06.2021).
- Strugatsky V. V poiskakh “ledyanogo doma” [Searching for the “Ice House”], URL: <https://www.rosbalt.ru/main/2010/10/05/778042.html> (access date 01.05.2021). (In Russian)

Received 03.06.2021

Revised 15.07.2021

Accepted 20.07.2021

УДК 598.2:(265.51), 591.9

ЗИМНЯЯ АВИФАУНА МОРЕЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

А.А. Романов¹, Н.Д. Васеха²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра биогеографии*

¹ *Проф., д-р биол. наук; e-mail: putorana05@mail.ru*

² *Студентка; e-mail: natashavasekha@yandex.ru*

Эколого-географические закономерности пространственной дифференциации фауны птиц морей северо-востока России исследованы в конце зимнего периода 1987–1988 гг. В Северном Ледовитом океане они почти не встречались, а в Беринговом море отмечено 22 вида птиц (24% всей морской авифауны Дальнего Востока России). Зимняя авифауна Берингова моря формируется видами, гнездящимися летом на островах и побережье морей северо-востока Азии и северо-запада Северной Америки. Одновременно в 1987 и 1988 гг. отмечены 17 видов – 77% общего видового списка. Выявлены три района концентрации зимующих птиц: у юго-восточного побережья полуострова Чукотка, где зимующие виды формируют многотысячные скопления, юго-восточнее мыса Наварин и южнее о. Св. Лаврентия. Таксономическая структура зимней авифауны Берингова моря соответствует экологическим особенностям морских акваторий Северной Пацифики, расположенных у северо-восточных окраин Северной Азии, и представлена семействами буревестниковых, баклановых, утиных, чайковых, чистиковых. По числу представленных видов ($n = 9$) преобладают чистиковые, весьма характерные для авифауны приполярных морских акваторий Палеарктики. В зимней авифауне Берингова моря представители шести эколого-географических групп: морские виды материковых и островных побережий Северной Пацифики и Северного Ледовитого океана, морские виды Северной Пацифики, виды, широко распространенные в зоне тундры Евразии и Северной Америки, островов Северного Ледовитого океана, азиатского побережья Северного Ледовитого океана, внутриматериковых горных потоков. Плотность населения во льдах осеннего образования – 0,4 ос./км², в молодых льдах и льдах начального образования – 21,8 ос./км². Максимальные плотности населения птиц в молодых льдах обусловлены формированием здесь полыней – доступных кормовых местообитаний. В населении птиц всех типов обследованных льдов численно доминируют глупыш, тонкоклювая и толстоклювая кайры. По данным экстраполяции на акватории Берингова моря, покрытой льдами, в 1987–1988 гг. ежегодно зимовало 1,5 млн особей птиц.

Ключевые слова: авифауна, население, видовое разнообразие, акватория, морские льды, полынья, Берингово море

ВВЕДЕНИЕ

Итоги представленных исследований лежат в сфере изучения географических аспектов пространственной организации морских фаунистических комплексов и населения животных, а также направлены на развитие мониторинга биоразнообразия в морских акваториях у северо-восточной оконечности Азии. Несмотря на публикацию итогов целого ряда исследований за последние 30–40 лет, полностью или частично посвященных авифауне морей северо-востока России [Белопольский, Шунтов, 1980; Стишов и др., 1991; Артюхин, Бурканов, 1999; Чернов, 1999; Шунтов, 1998, 2016; Нечаев, Гамова, 2009; Морские ключевые..., 2016; Равкин и др., 2020], изученность зимней фауны и населения птиц этой области Мирового океана до сих пор остается фрагментарной. Мониторинг и об-

щую оценку сравнительной динамики зимней фауны и населения птиц Берингова моря в настоящее время в определенной мере затрудняет недостаток сведений второй половины XX в. [Шунтов, 1966; Яхонтов, 1972], в частности 1980–1990-х гг. [Богословская, Вотрогов, 1981; Конюхов, 1990], которые приводятся, как правило, для локальных, относительно небольших по площади участков акватории. Разрозненные данные о зимовках, опубликованные позднее, рассредоточены по немногочисленным монографиям и статьям и относятся, как правило, к отдельным видам или группам видов [Артюхин, 2003; Зеленская, 2008; Полевой..., 2011; Захарова, Мамаев, 2014; Антипин, 2019; Howell, Zufelt, 2019]. Часть доступных сведений слишком генерализована [Howell, Zufelt, 2019]. Специальных комплексных обзоров по зимнему распространению морских

птиц у северо-восточной оконечности Азии почти нет. При этом Берингов пролив обеспечивает непосредственный экологический контакт приполярной части Северной Пацифики с Северным Ледовитым океаном [Добровольский, Залогин, 1982]. В силу этого в регионе формируется уникальное сочетание природных комплексов, не имеющих абсолютных аналогов в других морских акваториях Голарктики и весьма значимых для сохранения глобального биоразнообразия [Морские ключевые..., 2016]. В соответствии с этим мы предприняли попытку представить ретроспективные данные по зимнему распространению морских птиц у северо-восточной оконечности Азии для повышения объективности результатов мониторинга и разработки мер сохранения биологического разнообразия. Основная цель – комплексный анализ зимней фауны птиц морей северо-востока России в свете эколого-географических закономерностей ее формирования. В соответствии с этим решались четыре основные задачи: 1-я – выявление видового состава и структуры фауны; 2-я – выявление и систематизация данных по распространению, обилию и численности видов в условиях различной ледовой обстановки; 3-я – установление пространственной дифференциации фауны и населения; 4-я – проведение сравнительного анализа фауны обследованных акваторий, выявление пунктов концентрации видов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнена на основе анализа данных авиаучетов, проведенных в морях северо-востока России в 1987–1988 гг. в одни и те же сроки (с 20 марта по 10 апреля), что соответствует концу зимнего фенологического периода. Авиаучетами охвачены Берингово, Чукотское, Восточно-Сибирское моря, а также восточная часть моря Лаптевых. Конфигурация и координаты учетных авиамаршрутов, равномерно покрывавших акватории указанных морей, в оба года почти полностью совпадали.

Авиаучеты морских птиц, осуществленные при выполнении ледовой авиаразведки, были организованы в формате совместного научного проекта Всесоюзного научно-исследовательского института охраны природы и заповедного дела («ВНИИприрода») и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Со стороны «ВНИИприрода» проект курировали С.М. Успенский и С.Е. Беликов, со стороны ААНИИ – В.И. Шильников.

Для анализа привлечены результаты авиаучетов птиц в полосе шириной 1 км (по одному борту), проведенных на самолете ИЛ-14 на высоте 200 м при скорости до 250 км/ч. Суммарная протяженность

учетных авиамаршрутов составила 52 200 км (рис. 1). В 1987 г. некоторые маршруты были выполнены дважды, поэтому суммарная их длина составила 33 000 км против 19 200 км в 1988 г. Характеристики льдов и ледовой обстановки, которые присущи данным районам в период наблюдений, а также методика, положенная в основу проведения авиаучетов животных в Арктике, к началу работ 1987–1988 гг. были достаточно полно представлены в ряде публикаций [Успенский, Шильников, 1969; Кищинский, 1973; Горбунов и др., 1987]. В 1987–1988 гг. в условиях ледовой обстановки, соответствующей средней многолетней, обследованы следующие типы льдов: 1) лед начального образования – нилас; 2) серые и серобелые молодые льды; 3) тонкие, средние и толстые однолетние льды осеннего образования; 4) двухлетние и многолетние старые льды; 5) неподвижный лед вдоль побережья – припай. Показатель сплоченности льда в работе выражен в десятых долях и описывает общую площадь морской поверхности, покрытую льдом, как часть всей рассматриваемой площади [Номенклатура..., 2021].

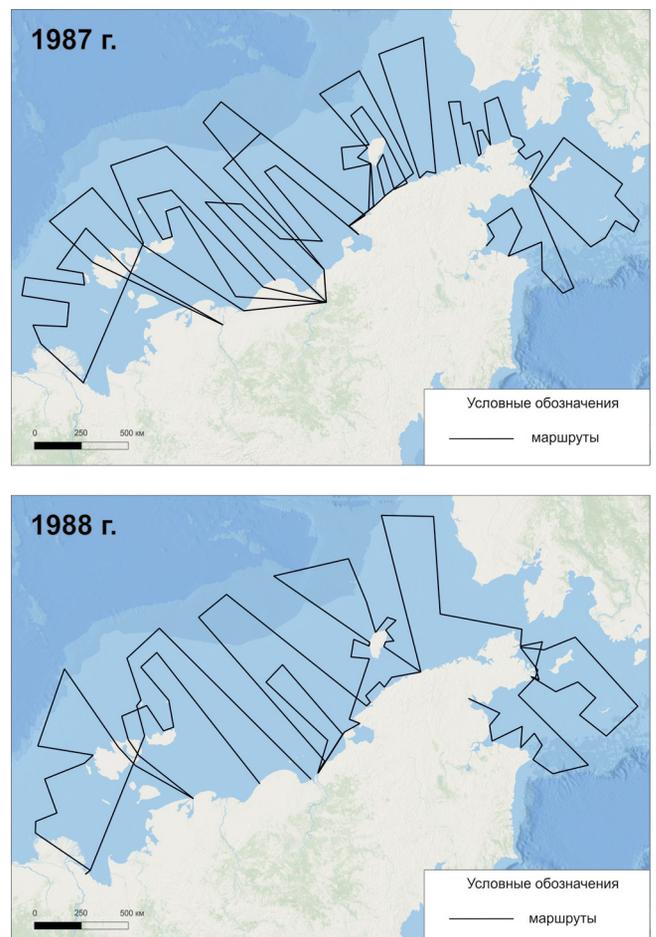


Рис. 1. Маршруты зимних авиационных учетов птиц в морях северо-востока России в 1987–1988 гг.

Fig. 1. Routes of winter aviation counts of birds in the seas of Northeastern Russia in 1987–1988

В 1987–1988 гг., используя 8- и 12-кратный бинокли, учитывали всех птиц с максимально возможным определением систематической принадлежности. Обилие каждого вида определялось прямыми подсчетами всех визуально зарегистрированных особей в пределах полосы учета с последующим пересчетом числа особей на 1 км² акватории. Малочисленные виды подсчитывали поштучно, массовые – методом «пробных площадок» (десятками или сотнями). Численное соотношение видов в крупных скоплениях чистиковых (Alcidae) и утиных (Anatidae) устанавливали путем выборочных подсчетов. Пребывание зарегистрированных видов на акваториях, обследованных в 1987–1988 гг., подтверждено сведениями об их географическом распространении, опубликованными позднее [Коблик, 2001; Артюхин, Бурканов, 1999; Нечаев, Гамова, 2009; Полевой..., 2011; Морские..., 2016; Howell, Zufelt, 2019]. Авиачет позволяет оперативно оценить распределение и численность птиц на обширных морских акваториях. Но из-за высокой скорости полета, турбулентности, наблюдения в бинокль через стекло блистера, возможность корректного определения ряда видов существенно понижается. Поэтому в нашей работе попарно объединены данные учета трудноразличимых родственных видов – толстоклювой (*Uria lomvia* (L.)) и тонкоклювой (*Uria aalge* (Pontoppidan)) кайр, чистика (*Cerpphus grille* (L.)) и тихоокеанского чистика (*Cerpphus Columba* Pallas), вероятность пребывания которых, соответственно, в стаях кайр и чистиков высока в равной мере. Сходство авифаун обследованных акваторий определялось по коэффициенту фаунистической общности Серенсена [Песенко, 1982]. Фауна птиц проанализирована по принадлежности видов к эколого-географическим группам [Коблик, 2001]. Под эколого-географической группой понимается совокупность видов со сходными экологическими условиями гнездовых местообитаний, очертаниями репродуктивных ареалов, характером географического распространения во внегнездовой период. Доминантами считали виды, доля которых в общей плотности населения более 10%, субдоминантами – 1–10%. Многочисленными считались виды с обилием 10–99 ос./км². Систематика птиц принята по Е.А. Коблику, В.Ю. Архипову [2014].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Северном Ледовитом океане птиц не наблюдали не только во льдах, но и на обширных полыньях, окаймляющих Новосибирские острова с севера. Лишь однажды, 21 марта 1988 г., в Чукотском море, в 90 км к северу от пос. Уэлен отмечены два крупных альбатроса (*Phoebastria*), летавшие над

небольшими разводьями в сильно заторошенных толстых льдах осеннего образования. Птицы имели очень темное оперение мантии и верха крыльев, судя по которому это могли быть либо молодые особи белоспинного альбатроса (*Phoebastria albatrus* (Pallas)), либо темноспинные альбатросы (*Phoebastria immutabilis* (Rothschild)). Вероятно, это залет на зимних кочевках, что косвенно подтверждают встречи указанных видов в зимнее время в Беринговом море [Артюхин, Бурканов, 1999; Морские..., 2016].

В тихоокеанском секторе исследований в 1987–1988 гг. птиц регистрировали регулярно. Всего на обследованной акватории Берингова моря в конце зимнего периода отмечено 53 622 особи 22 видов птиц, в том числе в 1987 г. – 27 196 особей 18 видов, в 1988 г. – 26 466 особей 21 вида. Среди молодых льдов и ниласа держалось 85 и 98% особей, наблюдавшихся соответственно в 1987 и 1988 гг. Во льдах осеннего образования птиц встретилось несоизмеримо меньше: 15% в 1987 г. и 2% в 1988 г.

Видовой состав птиц, зарегистрированных в каждом из двух экспедиционных сезонов, был очень схож, а с точки зрения потенциальных ежегодных изменений – весьма стабилен. Одновременно в 1987 и 1988 гг. отмечены 17 видов, что составляет 77% общего видового списка. При этом берингова баклана (*Phalacrocorax pelagicus* Pallas) наблюдали только в 1987 г., а розовую чайку (*Rhodostethia rosea* (MacGillivray)), белую чайку (*Pagophila eburnea* (Phipps)), моевку (*Rissa tridactyla* (L.)), глупыша (*Fulmarus glacialis* (L.)) – только в 1988 г. Коэффициент общности фаунистических списков 1987 и 1988 гг. – 87%. Авиафауна Берингова моря в конце зимнего периода формируется видами, которые летом гнездятся на островах и материковом побережье морей северо-востока Азии и северо-запада Северной Америки [Богословская и др., 1988; Конюхов, 1998; Артюхин, Бурканов, 1999; Коблик, 2001; Степанян, 2003; Коблик и др., 2006; Нечаев, Гамова, 2009; Полевой..., 2011; Коблик, Архипов, 2014; Морские..., 2016; Howell, Zufelt, 2019].

Всего известно о пребывании в морях Дальнего Востока России 91 вида. Из них 75 морских видов птиц из отрядов буревестникообразных (Procellariiformes), пеликанообразных (Pelecaniformes), ржанкообразных (Charadriiformes) [Артюхин, Бурканов, 1999; Нечаев, Гамова, 2009] и 16 видов из отрядов гагарообразных (Gaviiformes) и гусеобразных (Anseriformes), регулярно встречающихся в дальневосточных морях во время гнездования, кочевков, миграций или зимовки и экологически тесно связанных с морской средой обитания в какие-либо периоды своего жизненного цикла [Полевой..., 2011; Морские..., 2016]. Комплекс видов птиц

($n = 22$), зарегистрированных в конце зимнего периода 1987–1988 гг., составляет 24% от общего списка видов морской авифауны Дальнего Востока России.

Выявлены три района концентрации зимующих птиц (рис. 1, табл. 1). Первый – у юго-восточного побережья п-ва Чукотка, где между бухтой Провиденция, о. Аракамчечен и о. Св. Лаврентия ежегодно формируются стационарные полыньи, в том числе

наиболее известная – Сирениковская [Богословская, Вотрогов, 1981; Конюхов, 1990; Трухин, Косыгин, 1987; Заповедная Россия..., 2021]. Второй – в 240 км юго-восточнее мыса Наварин, третий – в 450 км к югу от о. Св. Лаврентия. Последние два района, возможно, представляют единое пространство и приурочены к южной кромке зимнего распространения морских льдов.

Таблица 1

Акватории Берингова моря с повышенной концентрацией птиц в зимний период

Виды	У юго-восточного побережья п-ва Чукотка				В 240 км юго-восточнее мыса Наварин				В 450 км к югу от о. Св. Лаврентия			
	1987		1988		1987		1988		1987		1988	
	Ч	Д	Ч	Д	Ч	Д	Ч	Д	Ч	Д	Ч	Д
Глупыш	–	–	169	0,7	–	–	22	51,2	–	–	314	25,3
Берингов баклан	6	0,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Обыкновенная гага	3800	13,9	2675	10,6	–	–	–	–	–	–	23	1,8
Гага-гребенушка	900	3,3	634	2,5	–	–	–	–	–	–	34	2,8
Очковая гага	1500	5,5	1056	4,2	–	–	–	–	–	–	–	–
Морянка	2700	9,9	1901	7,5	–	–	–	–	–	–	–	–
Каменушка	1100	4,1	774	3,1	–	–	–	–	–	–	–	–
Белая чайка	–	–	14	0,1	–	–	–	–	–	–	26	2,1
Серокрылая чайка	85	0,3	23	0,1	20	100	4	9,3	20	66,7	–	–
Тихоокеанская чайка	33	0,1	9	0,07	–	–	–	–	8	26,6	–	–
Бургомистр	13	0,08	4	0,03	–	–	–	–	2	6,7	–	–
Розовая чайка	–	–	42	0,2	–	–	–	–	–	–	79	6,3
Моевка	–	–	56	0,2	–	–	–	–	–	–	105	8,4
Кайры	10886	40,1	11406	45,3	–	–	17	39,5	–	–	423	34,1
Чистики	1190	4,4	1248	4,9	–	–	–	–	–	–	46	3,8
Короткоклювый пыжик	340	1,3	357	1,4	–	–	–	–	–	–	13	1,1
Большая конюга	1701	6,3	1783	7,1	–	–	–	–	–	–	66	5,3
Конюга-крошка	1191	4,4	1248	5,0	–	–	–	–	–	–	46	3,7
Ипатка	680	2,5	713	2,8	–	–	–	–	–	–	26	2,1
Топорок	1021	3,8	1070	4,2	–	–	–	–	–	–	40	3,2
Всего	27146	100	25182	100	20	100	43	100	30	100	1241	100

Примечание: Ч – число отмеченных особей; Д – доля от общего числа всех отмеченных особей (%).

У юго-восточного побережья п-ва Чукотка зимующие виды птиц ($n = 22$) формируют самые многочисленные скопления: в процессе авиаучетов в 1987 г. там отмечено 27 146 особей, в 1988 г. – 25 182 особи (см. табл. 1). От общего числа наблюдавшихся в 1987–1988 гг. птиц это составило 95–99%. Как показатели численности, так и видовой

состав и таксономическая структура этих самых крупных скоплений в 1987–1988 гг. были почти неизменны, а по числу представленных видов устойчиво преобладали представители семейств чистиковых и утиных. В двух других районах концентрации общая численность птиц была несоизмеримо ниже (20–1241 особь), а число присутствовавших на зи-

мовке видов ($n = 1-15$) весьма изменчиво по годам (см. табл. 1).

Лишь у юго-восточного побережья п-ва Чукотки встречены четыре вида: берингов баклан, очковая гага (*Somateria fischeri* (J.F. Brandt)), морянка (*Clangula hyemalis* (L.)), каменушка (*Histrionicus histrionicus* (L.)). Несомненно, зимнее распространение указанных видов не ограничивается акваториями у юго-восточного побережья п-ва Чукотка, где они зарегистрированы в 1987–1988 гг. При этом, вероятно, повышенная требовательность к экологическим параметрам предпочитаемых местобитаний, в частности низкий уровень сомкнутости ледовых полей при наличии среди них кормных участков открытой воды, предопределяет в целом локальное распространение перечисленных видов в зимних условиях Берингова моря. Вероятно, еще более фрагментарно распространен берингов баклан. Группу из шести особей этого вида, летевших над припаем в сторону моря, зарегистрировали лишь однажды: 26 марта 1987 г. в 6 км от бухты Провидения. Остальные виды ($n = 18$) в разном сочетании встречались также юго-восточнее мыса Наварин и южнее о. Св. Лаврентия (см. табл. 1).

Коэффициенты взаимной общности локальных авифаун выявленных районов концентрации птиц ($n = 3$) лежат в широком диапазоне и составляют 24–90%, что свидетельствует о неоднородности авифауны Берингова моря в зимний период. Вероятно, это предопределено существенными пространственными отличиями экологических условий. Главные из них – ледовая обстановка и ее динамика, наличие участков открытой воды, свободной ото льда, кормовой потенциал акватории. Максимальное фаунистическое сходство (90%) при наличии 18 общих видов характерно для скоплений птиц, формирующихся у юго-восточного побережья п-ва Чукотка и юго-восточнее мыса Наварин. Минимальное фаунистическое сходство (24–29%) с двумя указанными выше выявлено для локальной концентрации птиц, расположенной южнее о. Св. Лаврентия, в состав которой входят глупыш, серокрылая чайка (*Larus glaucescens* J.F. Naumann), кайры.

Среди зимующих птиц у юго-восточного побережья п-ва Чукотка в 1987–1988 гг. численно доминировали многочисленные кайры, обыкновенная гага (*Somateria mollissima* (L.)), образывавшие плотные или дисперсные скопления в основном у бухты Провидения и у мыса Чаплина. Юго-восточнее мыса Наварин в 1987 г. численно доминировали тихоокеанская (*Larus schistisagus* Stejneger) и серокрылая чайки, в 1988 г. – глупыш и кайры. Южнее о. Св. Лаврентия в 1987 г. – серокрылая чайка, в 1988 г. – глупыш и кайры (см. табл. 1).

Состав доминантов в населении зимующих птиц, вероятно, может быть неодинаков в разные годы в разных частях акватории Берингова моря. Так, например, в полынье у пос. Сиреники на юго-востоке Чукотки среди зимующих птиц численно преобладала обыкновенная гага [Богословская, Вотрогов, 1981], а у о-ов Прибылова – толстоклювая кайра, серокрылая чайка, бургомистр (*Larus hyperboreus* Gunnerus) [Шунтов, 1966].

Почти все чистиковые и утиные отмечены в 1987–1988 гг. взлетающими с поверхности открытой воды разводий и полыней, а глупыш и чайковые (Laridae) – в полете над ней. Одиночные чистиковые, бургомистры, тихоокеанские и серокрылые чайки изредка встречались летящими над массивами сплоченных льдов в 10–15 км от ближайших разводий. Основная часть чистиковых и утиных образовывала стаи численностью от 200–300 до 1000–2000 особей, часто встречаясь при этом группами из 20–60 особей и даже одиночно. Все чайки и глупыш держались, в основном, в стаях численностью до 100 особей, а одиночки среди них встречались чаще, чем у чистиковых.

Таксономическая структура зимней авифауны Берингова моря соответствует экологическим особенностям морских акваторий Северной Пацифики, расположенных у северо-восточных окраин Северной Азии, и включает в себя пять семейств (буревестниковые (Procellariidae), баклановые (Phalacrocoracidae), утиные, чайковые, чистиковые) из четырех отрядов – буревестникообразные, пеликанообразные, гусеобразные, ржанкообразные. По числу представленных видов ($n = 9$) преобладают чистиковые, весьма характерные для авифауны приполярных морских акваторий Голарктики.

Берингово море находится на северо-восточной окраине Палеарктического фаунистического подцарства [Абдурахманов и др., 2014]. Поэтому закономерно, что в зоогеографическом отношении оригинальность местной зимней авифауны состоит в сочетании элементов шести эколого-географических групп. Зимовочные скопления образуют морские виды материковых и островных побережий Северной Пацифики и Северного Ледовитого океана (глупыш, гаги, бургомистр, моевка, кайры), морские виды Северной Пацифики (конюги (*Aethia*)), виды, распространенные циркумполярно по всей зоне тундры Голарктики (морянка), высокоширотный эндемик островов Северного Ледовитого океана (белая чайка), эндемик восточной части азиатского побережья Северного Ледовитого океана (розовая чайка), вид внутриматериковых горных потоков берингийского генезиса (каменушка).

Детализация пацифического авифаунистического комплекса в зимней авифауне Берингова моря по-

зволяет выделить целый ряд специфических видов ($n = 7$), которые определенно генетически связаны с Северной Пацификой: берингов баклан, серокрылая и тихоокеанская чайки, большая конюга (*Aethia cristatella* (Pallas)), ипатка (*Fratercula corniculata* (J.F. Naumann)), топорок (*Lunda cirrhata* (Pallas)), тихоокеанский чистик, короткоклювый пыжик (*Brachyramphus brevirostris* (Vigors)).

Установлено, что обилие и численность отдельных видов, а также общая плотность населения птиц зимнего периода Берингова моря существенно варьируют в зависимости от экологических условий, формирующихся на акваториях с господством различных типов льдов ($n = 5$) (табл. 2, 3).

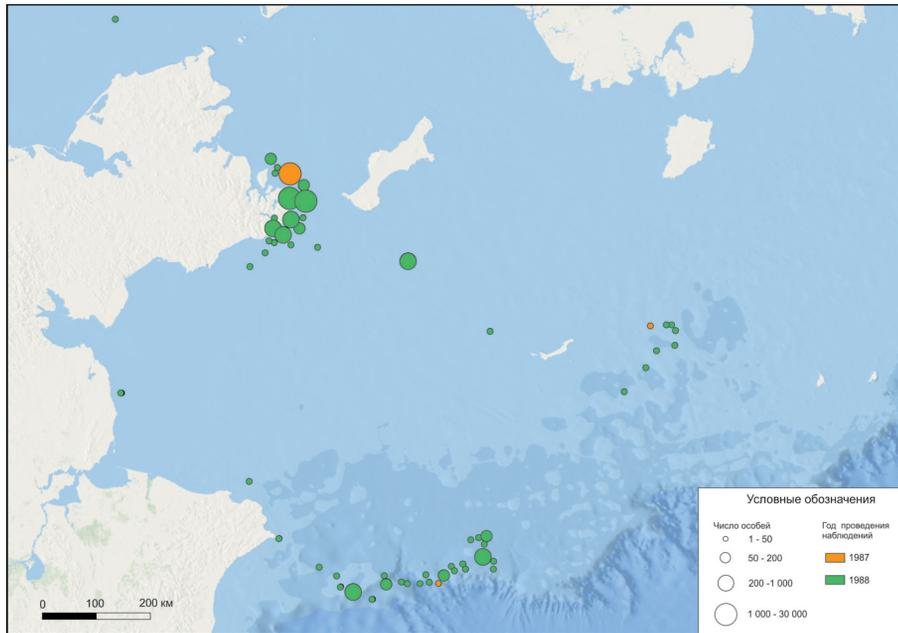


Рис. 2. Районы зимней концентрации птиц в Беринговом море в 1987–1988 гг.

Fig. 2. Areas of winter concentration of birds in the Bering Sea in 1987–1988

Зимовочные скопления птиц не обнаружены в пределах припая, двухлетних и многолетних старых льдов, толстых однолетних льдов осеннего образования.

Плотность населения в пределах средних и тонких льдов осеннего образования варьирует в пределах $0,02\text{--}0,8$ ос./км², составляя в среднем $0,4$ ос./км² ($n = 3$). Плотность населения в пределах различных типов молодых льдов и льдов начального образования варьирует в пределах $0,6\text{--}58$ ос./км², составляя в среднем $21,8$ ос./км² ($n = 4$).

Птицы, зимующие в пределах замерзающей акватории Берингова моря, экологически тесно связаны, главным образом, с полыньями и разводьями, мозаично формирующимися среди молодых льдов. Показатели плотности населения птиц в молодых льдах более чем в 70 раз превышают соответствующие показатели во льдах осеннего образования.

Плотность населения птиц в молодых льдах вполне сопоставима с усредненным показателем плотности летнего населения птиц (27 ос./км²) западно-тихоокеанских акваторий, простирающихся от пролива Лаперуза к северу до Берингова пролива и о. Врангеля [Равкин и др., 2020].

Характером ледовой обстановки, в частности господствующим типом льда и его сплоченностью, обусловлены разные показатели численности зимующих птиц как на акватории Берингова моря вообще, так и в трех выявленных районах концентрации.

подавляющее большинство птиц предпочитает разводья и полыньи среди серых и серо-белых молодых льдов, местами в сочетании с ниласом (см.

табл. 2, 3). Молодой лед толщиной $10\text{--}30$ см находится в переходной стадии между его начальным видом и однолетним льдом. Он весьма динамичен: ломается на волне, при сжатии наслаивается или торосится [Номенклатура..., 2021]. Высокая восприимчивость к внешним воздействиям и прежде всего к сильным течениям предопределила невысокую его сплоченность ($1/10\text{--}6/10$) и, как следствие, широкое распространение (а местами почти повсеместное господство) на занимаемой им акватории разреженных ($4/10\text{--}6/10$) и редких ($1/10\text{--}3/10$) льдов, в пределах которых обычно и формируются обширные временные или постоянные полыньи, привлекающие птиц.

Значительно менее привлекательны для птиц участки акватории с тонкими, средними и толстыми однолетними льдами осеннего образования толщиной $30\text{--}200$ см. Большая мощность льда увеличивает его прочность и обеспечивает высокую сплоченность: обычно льды осеннего образования очень сплоченные ($9/10\text{--}10/10$), смерзшиеся ($10/10$) и сжатые ($10/10$) [Номенклатура..., 2021]. В таких условиях процесс образования полыней в толстых и средних льдах, даже при наличии сильных течений, весьма затруднен. Участки открытой воды, обычно приуроченные к тонким льдам, немногочисленны и невелики по площади. Поэтому во льдах осеннего образования птицы весьма редки и встречаются, главным образом, на разводьях в тонких льдах.

У юго-восточного побережья п-ва Чукотка, в районе бухты Провидения, массовые скопления чистиковых и утиных приурочены к обширной по-

лынье и разводьям в молодых льдах. Господство в 1987–1988 гг. осенних льдов на акваториях, расположенных южнее о. Св. Лаврентия, обусловило небольшое число зимующих там птиц. Аналогичная

ситуация сложилась в 1987 г. юго-восточнее мыса Наварин, где в 1988 г. господствовали уже молодые льды, на разводьях которых наблюдалось гораздо больше птиц, чем в предыдущем году.

Таблица 2

Обилие зимующих птиц в различных типах льдов Берингова моря по данным учетов 1987 г.

Виды	Тонкий лед осеннего образования		Молодой серо-белый лед	
	О	Д	О	Д
Берингов баклан	–	–	0,02	0,04
Обыкновенная гага	–	–	9,5	16,6
Гага-гребенушка	–	–	2,3	3,9
Очковая гага	–	–	3,8	6,5
Морянка	–	–	6,8	11,8
Каменушка	–	–	2,8	4,8
Серокрылая чайка	0,02	2,3	0,1	0,1
Тихоокеанская чайка	0,01	0,9	0,02	0,04
Бургомистр	0,003	0,4	0,01	0,02
Кайры	0,5	61,7	20,8	37,4
Чистики	0,05	6,7	3,9	2,3
Короткоклювый пыжик	0,01	1,9	0,7	1,1
Большая конюга	0,1	9,6	3,3	5,7
Конюга-крошка	0,1	6,8	2,3	4,0
Ипатка	0,03	3,9	1,3	2,3
Топорок	0,04	5,8	2,0	3,4
Всего	0,8	100	58	100

Примечание: О – обилие (ос./км²); Д – доля участия в населении (%).

Максимальные плотности населения птиц зарегистрированы в молодых серо-белых льдах в 1987 г. (58 ос./км²) и в молодых серых льдах – в 1988 г. (20,9 ос./км²). Максимальные плотности населения птиц в молодых льдах обусловлены небольшой их толщиной, значительной раздробленностью и, как следствие, постоянным формированием здесь широко распространенных полыней и разводий. Участки акватории, свободные ото льда, при наличии достаточного количества корма определяют оптимальные условия для настоящих морских видов птиц или видов внутриматериковых водоемов, экологически тесно связанных с морем во внегнездовой период своего жизненного цикла.

Обилие некоторых видов чистиковых и утиных, в целом относительно широко распространенных на зимовках в пределах Берингова моря, достигает в молодых льдах максимальных значений (см. табл. 2, 3). Например, установлено, что обилие кайры, большой конюги, ипатки, топорка, обыкновенной гаги, гаги-гребенушки, очковой гаги, морянки, ка-

менушки на разводьях среди молодых льдов составляет 20,8, 3,3, 1,3, 2,0, 9,5, 2,3, 3,8, 6,8, 2,8 ос./км², а во льдах осеннего образования не превышает 0,5, 0,1, 0,03, 0,04, 0,01, 0,004, 0,002, 0,004, 0,001 ос./км² соответственно. Важно, что данная закономерность выявлена для видов всех эколого-географических групп, независимо от предпочитаемых кормовых объектов, специфики их поиска и способов добывания в зимний период.

В населении птиц всех типов обследованных льдов численно доминируют три вида: глупыш, тонкоклювая и толстоклювая кайры.

Из специфических доминантов в населении птиц молодых льдов также обыкновенная гага, морянка, моевка, а в населении птиц льдов осеннего образования – гага-гребенушка.

На некоторых участках акватории в отдельные годы в число субдоминантов входили ипатка, топорок, чистики, большая конюга, конюга-крошка (*Aethia pusilla* (Pallas)), розовая чайка, каменушка, очковая гага.

Таблица 3

Обилие зимующих птиц в различных типах льдов Берингова моря по данным учетов 1988 г.

Виды	Лед осеннего образования				Молодой лед				Лед начального образования	
	Средний		Тонкий		Серо-белый		Серый		Нилас	
	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д	О	Д
Глупыш	0,01	42,3	0,1	23,9	0,2	35,4	0,001	0,1	0,2	3,1
Обыкновенная гага	–	–	0,01	2,4	0,01	1,2	2,3	11,3	–	–
Гага-гребенушка	0,004	19,2	0,001	0,6	0,002	0,3	0,6	2,7	–	–
Очковая гага	–	–	0,002	0,9	0,003	0,5	0,9	4,5	–	–
Морянка	–	–	0,004	1,7	0,005	0,8	1,7	8,0	–	–
Каменушка	–	–	0,001	0,7	0,002	0,3	0,7	3,3	–	–
Белая чайка	–	–	0,004	2,0	0,02	2,9	0,002	0,01	0,02	0,3
Серокрылая чайка	0,002	7,7	–	–	–	–	–	–	0,1	1,7
Тихоокеанская чайка	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1	0,7
Бургомистр	–	–	–	–	–	–	–	–	0,02	0,3
Розовая чайка	–	–	0,01	6,0	0,05	8,8	0,01	0,02	0,1	0,8
Моевка	–	–	0,02	8,0	0,1	11,8	0,01	0,02	0,1	1,0
Кайры	0,01	30,8	0,07	34,3	0,14	24,2	9,4	44,85	4,5	59
Чистики	–	–	0,012	3,8	0,014	2,7	1,0	4,9	0,4	6,4
Короткокловый пьжик	–	–	0,002	1,1	0,004	0,8	0,3	1,4	0,1	1,8
Большая конюга	–	–	0,01	5,4	0,02	3,8	1,5	7,0	0,7	9,2
Конюга-крошка	–	–	0,01	3,8	0,01	2,7	1,0	4,9	0,5	6,5
Ипатка	–	–	0,005	2,2	0,01	1,5	0,6	2,8	0,3	3,7
Топорок	–	–	0,01	3,2	0,01	2,3	0,9	4,2	0,4	5,5
Всего	0,02	100	0,27	100	0,6	100	20,9	100	7,54	100

Примечание: О – обилие (ос./км²); Д – доля участия в населении (%).

Для сравнения укажем, что основу околосудовых скоплений морских птиц на зимнем траловом промысле в Охотском море составляют глупыш и тихоокеанская чайка [Артюхин, 2018]. А летом в населении птиц западно-тихоокеанских акваторий от пролива Лаперуза к северу до Берингова пролива первые пять мест по показателю обилия занимают глупыш (24%), тихоокеанская чайка (13%), тонкокловый буревестник (*Puffinus tenuirostris* (Temminck)) (12%), каменушка (8%), моевка (6%) [Равкин и др., 2020].

Важным элементом наших исследований стала экстраполяция полученных показателей обилия видов птиц в определенном типе льда на всю площадь его распространения в Беринговом море. Итоговое суммирование этих значений позволяет гипотетически оценить численность зимующих птиц на обследованной в 1987–1988 гг. части Берингова моря в 1,5 млн особей. Достоверность нашей экстраполяционной оценки подтверждена орнитологическими

исследованиями, проведенными в Северной Пацифике другими авторами [Морские..., 2016].

ВЫВОДЫ

Получены, обобщены и проанализированы оригинальные данные, существенно расширяющие знания о зимней авифауне приполярной части Северной Пацифики и Северного Ледовитого океана.

В Северном Ледовитом океане птицы почти не встречались, а в тихоокеанском секторе исследований они наблюдались регулярно. Комплекс видов птиц ($n = 22$), зарегистрированных в конце зимнего периода 1987–1988 гг. в Беринговом море, составляет 24% от общего списка видов морской авифауны Дальнего Востока России ($n = 91$).

Выявлены три района концентрации зимующих птиц: у юго-восточного побережья п-ва Чукотка, где зимующие виды птиц ($n = 22$) формируют самые многочисленные скопления, юго-восточнее мыса Наварин и южнее о. Св. Лаврентия. Максимальное

фаунистическое сходство (90%) наблюдается в локальных концентрациях птиц, формирующихся у юго-восточного побережья п-ва Чукотка и юго-восточнее мыса Наварин. Эти районы пространственно соответствуют выделяемым морским ключевым орнитологическим территориям России, среди которых Мечигменский залив, пролив Сенявин, Сирениковское побережье Чукотки, мыс Наварин и Наваринский каньон [Морские..., 2016].

Таксономическая структура зимней авифауны Берингова моря соответствует экологическим особенностям морских акваторий Северной Пацифики, расположенных у северо-восточных окраин Северной Азии. По числу представленных видов ($n = 9$) преобладают представители семейства чистиковых, весьма характерные для авифауны приполярных морских акваторий Палеарктики. В населении птиц всех типов обследованных льдов численно доминируют глупыш и кайры. Из специфических доминантов в населении птиц молодых льдов также обыкновенная гага, морянка, моевка, а в населении птиц льдов осеннего образования – гага-гребенушка.

В составе зимней авифауны Берингова моря представители шести эколого-географических групп: морские виды материковых и островных побережий Северной Пацифики и Северного Ледовитого океана, морские виды Северной Пацифики, виды широко распространенные по всей зоне тундры Голарктики, виды островных побережий Северного Ледовитого океана, виды азиатского побережья Северного Ледовитого океана, виды внутриматериковых горных потоков берингийского генезиса.

Птицы, зимующие в пределах замерзающей акватории Берингова моря, экологически тесно связаны главным образом с молодыми льдами, где постоянно формируются обширные поyny. Плотность населения в пределах различных типов молодых льдов и льдов начального образования варьирует в пределах 0,6–58 ос./км², составляя в среднем ($n = 4$) 21,8 ос./км². Тогда как плотность населения в пределах различных типов льдов осеннего образования не превышает 0,02–0,8 ос./км², составляя в среднем ($n = 3$) 0,4 ос./км².

Благодарность. Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдурахманов Г.М., Мяло Е.Г., Огуреева Г.Н. Биогеография: учебник для студентов учреждений высшего образования. М.: Академия, 2014. 448 с.
- Антитин М.А. Зимовка серокрылой чайки *Larus glaucescens* на юго-востоке Чукотского полуострова // Русский орнитологический журнал. 2019. Том 2. Экспресс-выпуск 1839. С. 981–984.
- Артюхин Ю.Б. О состоянии зимовки гусеобразных птиц на острове Беринга // Казарка. № 9. 2003. С. 377–392.
- Артюхин Ю.Б. Околосудовые скопления морских птиц на зимнем траловом промысле в Охотском море // Известия ТИНРО. 2018. Т. 193. С. 50–56.
- Артюхин Ю.Б., Бурканов В.Н. Морские птицы и млекопитающие Дальнего Востока России: полевой определитель. М.: Изд-во АСТ, 1999. 224 с.
- Белопольский Л.О., Шунтов В.П. Птицы морей и океанов. М., 1980. 185 с.
- Богословская Л.С., Втрогов Л.М. Массовые зимовки птиц и китов в поlynьях Берингова моря // Природа. 1981. № 1. С. 43–47.
- Богословская Л.С., Звонов Б.М., Конюхов Н.Б. Птичьи базары восточного побережья Чукотского полуострова // Изучение и охрана птиц в экосистемах Севера. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 24–27.
- Горбунов Ю.А., Беликов С.Е., Шильников В.И. Влияние ледовых условий на распределение и численность белого медведя в морях Советской Арктики // Бюл. МОИП. Отдел биологический. 1987. Т. 116. Вып. 5. С. 354–372.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. 192 с.
- Захарова Д.Н., Мамаев Е.Г. Численность зимующих гусеобразных птиц на острове Беринга в 2013 году // Биология и охрана птиц Камчатки. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2014. Вып. 10. С. 78–79.
- Зеленская Л.А. Тихоокеанская чайка (*Larus schistisagus* Stejneger, 1884). Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2008. 213 с.
- Кищинский А.А. Учеты птиц с самолета // Методы учета охотничьих животных в лесной зоне. М.: Московский рабочий, 1973. С. 197–235.
- Коблик Е.А. Разнообразие птиц (по материалам Зоологического музея МГУ). Ч. 1–4. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 416 с.
- Коблик Е.А., Редькин Я.А., Архипов В.Ю. Список птиц Российской Федерации. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 256 с.
- Коблик Е.А., Архипов В.Ю. Фауна птиц стран Северной Евразии в границах бывшего СССР: списки видов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 171 с.
- Конюхов Н.Б. Зимовка морских птиц в Сирениковской поlynье // Изучение морских колониальных птиц. Магадан: ИБПС ДВО АН СССР, 1990. С. 36–39.
- Конюхов Н.Б. Водоплавающие побережья Восточной Чукотки // Казарка. 1998. № 4. С. 319–330.
- Морские ключевые орнитологические территории Дальнего Востока России / под ред. Ю.Б. Артюхина. М.: РОСИП, 2016. 136 с.

- Нечаев В.А., Гамова Т.В. Птицы Дальнего Востока России (аннотированный каталог). Владивосток: Дальнаука, 2009. 564 с.
- Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.
- Полевой определитель гусеобразных птиц России / Рабочая группа по гусеобразным Северной Евразии, Всероссийский научно-исследовательский ин-т охраны природы, Зоологический музей МГУ; под ред. Е.Е. Сыроечковского. М., 2011. 223 с.
- Равкин Ю.С., Бабенко В.Г., Стишов М.С., Пронкевич В.В., Лялина М.И. Эколого-географическая изменчивость летнего населения птиц Притихоокеанской части России // Сибирский экологический журнал. Т. 6. 2020. С. 689–703.
- Степанян Л.С. Конспект орнитологической фауны России и сопредельных территорий. М.: Наука, 2003. 727 с.
- Стишов М.С., Придатко В.И., Баранюк В.В. Птицы острова Врангеля. Новосибирск: Наука, 1991. 253 с.
- Трухин А.М., Косыгин Г.М. Распределение морских птиц в водах западной части Берингова и Охотского морей // Распределение и биология морских птиц Дальнего Востока. Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. С. 6–21.
- Успенский С.М., Шильников В.И. Распределение и численность белых медведей в Арктике по данным авианаблюдений ледовой разведки // Белый медведь и его охрана в Советской Арктике. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 35–37.
- Чернов Ю.И. Класс птиц в арктической фауне // Зоол. журн. 1999. Т. 78. № 3. С. 276–292.
- Шунтов В.П. О зимовках птиц в дальневосточных морях и северной части Тихого океана // Зоол. журн. 1966. Т. 45. Вып. II. С. 34–45.
- Шунтов В.П. Птицы дальневосточных морей России. Владивосток: ТИНРО, 1998. Т. 1. 423 с.
- Шунтов В.П. Биология дальневосточных морей России. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2016. 604 с.
- Яхонтов В.Д. Учет зимующих морянок в заливе Корф Берингова моря // Ресурсы водоплавающих птиц СССР, их воспроизводство и использование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. Вып. 2. С. 121–128.
- Howell S.N.G., Zufelt K. *Oceanic birds of the world*, Publisher: Princeton University Press, 2019, 361 p.
- Электронные ресурсы*
Номенклатура морских льдов. URL: <http://www.aari.ru/gdsidb/glossary/r1.htm> (дата обращения 11.01.2021).
Заповедная Россия. URL: <http://www.zapoved.net> (дата обращения 12.01.2021).

Поступила в редакцию 15.01.2021

После доработки 23.05.2021

Принята к публикации 20.07.2021

WINTER AVIFAUNA OF THE SEAS OF THE NORTH-EAST OF RUSSIA

A.A. Romanov¹, N.D. Vasekha²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Biogeography*

¹ *Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: putorana05@mail.ru*

² *Student; e-mail: natashavasekha@yandex.ru*

The ecological and geographical regularities of the spatial differentiation of bird fauna of Northeastern Russia seas in late winters of 1987 and 1988 were studied. Birds were almost never found in the Arctic Ocean, while 22 bird species were recorded in the Bering Sea (24% of all marine avifauna of the Russian Far East). The winter avifauna of the Bering Sea includes species that nest in the summer on the islands and coastal seas of Northeast Asia and northwestern North America. 17 species, i.e. 77% of the total species list, were recorded both in 1987 and 1988. Three areas of wintering birds concentration have been identified, namely near the southeastern coast of the Chukotka Peninsula, with clusters of many thousands birds, southeast of the Navarin Cape and south of the St. Lawrence Island. The taxonomic structure of winter avifauna in the Bering Sea is in line with the ecological characteristics of the North Pacific marine areas, located at the northeastern margins of Northern Asia, and is represented by the families of Procellariidae, Phalacrocoracidae, Anatidae, Laridae, and Alcidae. The Alcidae are quite typical of the avifauna of subpolar marine areas of the Palaearctic and prevail in terms of the number of species represented ($n = 9$). Winter avifauna of the Bering Sea includes representatives of 6 ecological-geographical groups, namely marine species of the continental and island coasts of the North Pacific and the Arctic Ocean, marine species of the North Pacific, species widespread in the tundra zone of Eurasia and North America, species of the islands of the Arctic Ocean, species of the Asian coast of the Arctic Ocean, species of the inland mountain streams. The population density over the autumn ice is 0.4 birds per 1 km² and 21.8 birds per 1 km² over young ice. The maximum bird population densities in young ice are due to the presence of open water areas which are easily accessible forage habitats. Northern Fulmar, Common Guillemot and Brunnich's Guillemot predominate in bird populations over all types of the surveyed ice. According to the extrapolation data, in 1987–1988 1 500 000 birds wintered annually within the ice-covered water area of the Bering Sea.

Keywords: avifauna, population, species diversity, water area, sea ice, polynya (ice hole), the Bering Sea

Acknowledgements. The research was carried out within the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change”.

REFERENCES

- Abdurakhmanov G.M., Myalo E.G., Ogureeva G.N. *Biogeografiya: uchebnik dlya studentov uchrezhdenii vysshego obrazovaniya* [Biogeography: a textbook for students of higher education institutions], Moscow, Akademiya Publ., 2014, 448 p. (In Russian)
- Antipin M.A. Zimovka serokryloj chajki *Larus glaucescens* na jugo-vostoke Chukotskogo poluostrova [Greywing gull wintering in the south-east of the Chukotka Peninsula], *Russkij ornitologicheskij zhurnal*, 2019, Express issue 1839, no. 2, p. 981–984. (In Russian)
- Artjuhina Ju.B. O sostojanii zimovki guseobraznyh ptic na ostrove Beringa [On the state of wintering of Anseriformes on the Bering Island], *Kazarka*, 2003, no. 9, p. 377–392. (In Russian)
- Artjuhina Ju.B. Okolosudovye skoplenija morskikh ptic na zimmem tralovom promysle v Ohotskom more [Near-vessel seabird aggregations in the winter trawl fishery of pollock in the Okhotsk Sea], *Izvestiya TINRO*, 2018, no. 193, p. 50–56. (In Russian)
- Artyukhin Yu.B., Burkanov V.N. *Morskie ptitsy i mlekopitajushchie Dal'nego Vostoka Rossii: polevoi opredelitel'* [Seabirds and mammals of the Russian Far East: field guide], Moscow, AST Publ., 1999, 224 p. (In Russian)
- Belopol'skij L.O., Shuntov V.P. *Pticy morej i okeanov* [Birds of the seas and oceans], Moscow, 1980, 185 p. (In Russian)
- Bogoslovskaja L.S., Votrogov L.M. Massovyje zimovki ptic i kitov v polyn'jah Beringova morja [Mass wintering of birds and whales in the openings of the Bering Sea], *Priroda*, 1981, no. 1, p. 43–47. (In Russian)
- Bogoslovskaja L.S., Zvonov B.M., Konjuhov N.B. [Bird colonies on the eastern coast of the Chukotka Peninsula], *Izuchenie i ohrana ptic v jekosistemah Severa* [Study and protection of birds in Northern ecosystems], Vladivostok, Far Eastern branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1988, p. 24–27. (In Russian)
- Chernov Ju.I. Klass ptic v arkticheskoj faune [Class of birds in the Arctic fauna], *Zool. zhurn.*, 1999, vol. 78, no. 3, p. 276–292. (In Russian)
- Ctepanjan L.S. *Konspekt ornitologicheskogo fauny Rossii i sopredel'nyh territorij* [Abstract of the ornithological fauna of Russia and adjacent territories], Moscow, Nauka Publ., 2003, 727 p. (In Russian)
- Dobrovolskij A.D., Zalogin B.S. *Morja SSSR* [USSR seas], Moscow, Moscow State University Publ., 1982, 192 p. (In Russian)
- Gorbunov Ju.A., Belikov S.E., Shil'nikov V.I. Vlijanie ledovyh uslovij na raspredelenie i chislennost' belogo medvedja v morjah Sovetskogo Arktiki [Impact of ice conditions on the distribution and abundance of polar bears in the seas of the Soviet Arctic], *Byul. MOIP. Otdel Biologicheskii*, Moscow, 1987, vol. 116, no. 5, p. 354–372. (In Russian)
- Howell Steve N.G., Zufelt K. *Oceanic birds of the world*, Publisher, Princeton University Press, 2019, 361 p.
- Jahontov V.D. Uchet zimujushchih morjanok v zalive Korf Beringova morja [Count of wintering long-tailed ducks in the Korf Bay of the Bering Sea], *Resursy vodoplavajushchih ptic SSSR, ih vosproizvodstvo i ispol'zovanie*, Moscow, Moscow State University Publ., 1972, no. 2, p. 121. (In Russian)
- Kishhinskij A.A. [Bird counts from aircraft], *Metody ucheta ohotnich'ih zhivotnyh v lesnoj zone* [Counting procedures for game animals of the forest zone], Moscow, Moskovskij rabochij Publ., 1973, p. 197–235. (In Russian)
- Koblik E.A. *Raznoobrazie ptits (po materialam Zoologicheskogo muzeja MGU), ch. 1-4* [A variety of birds (based on materials from the Zoological Museum of Moscow State University), parts 1–4], Moscow, Moscow State University Publ., 2001. (In Russian)
- Koblik E.A., Arkhipov V.Yu. *Fauna ptits stran Severnoj Evrazii v granitsakh byvshego SSSR: spiski vidov* [The fauna of birds of the countries of Northern Eurasia within the borders of the former USSR: lists of species], Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014, 171 p. (In Russian)
- Koblik E.A., Red'kin Ja.A., Arhipov V.Ju. *Spisok ptic Rossijskoj Federacii* [List of birds of the Russian Federation], Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2006, 256 p. (In Russian)
- Konjuhov N.B. Vodoplavajushhie poberezh'ja Vostochnoj Chukotki [Waterfowl on the coast of Eastern Chukotka], *Kazarka*, 1998, no. 4, p. 319–330. (In Russian)
- Konjuhov N.B. Zimovka morskikh ptic v Sirenikovskoj polyn'e [Wintering of seabirds in the Sirenikovskaya Polynya], *Izuchenie morskikh kolonial'nyh ptic*, Magadan, Far Eastern branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1990, p. 36–39. (In Russian)
- Morskie klyucheveje ornitologicheskie territorii Dal'nego Vostoka Rossii* [Marine key ornithological territories of the Russian Far East], Yu.B. Artyukhina (ed.), Moscow, M.A. Menzibir Russian Society for the Conservation and Study of Birds Publ., 2016, 136 p. (In Russian)
- Nechaev V.A., Gamova T.V. *Ptitsy Dal'nego Vostoka Rossii (annotirovannyi katalog)*. [Birds of the Russian Far East (annotated catalog)], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2009, 564 p. (In Russian)
- Pesenko Yu.A. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh* [Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies], Moscow, Nauka Publ., 1982, 287 p. (In Russian)
- Polevoj opredelitel' guseobraznyh ptic Rossii* [Field Guide to Anseriformes of Russia], Rabochaja gruppa po guseobraznym Severnoj Evrazii, Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij in-t ohrany prirody, Zoologicheskij muzej MGU, E.E. Syroechkovskij (ed.), Moscow, 2011, 223 p. (In Russian)
- Ravkin Ju.S., Babenko V.G., Stishov M.S., Pronkevich V.V., Ljalina M.I. *Ekologo-geograficheskaja izmenchivost' letnego naselenija ptic Pritihookeanskoj chasti Rossii* [Ecological and geographical variability of the summer bird population in the Near-Pacific region of Russia], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2020, no. 6, p. 689–703. (In Russian)

- Shuntov V.P. *Biologija dal'nevostochnyh morej Rossii* [Biology of the Far Eastern seas of Russia], Vladivostok, Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography Publ., 2016, 604 p. (In Russian)
- Shuntov V.P. O zimovkah ptic v dal'nevostochnyh morjah i severnoj chasti Tihogo okeana [About wintering of birds in the Far Eastern seas and the northern part of the Pacific Ocean], *Zool. zhurn.*, 1966, vol. 45, no. II, p. 34–45. (In Russian)
- Shuntov V.P. *Pticy dal'nevostochnyh morej Rossii* [Birds of the Far Eastern seas of Russia], Vladivostok, Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography Publ., 1998, vol. 1, 423 p. (In Russian)
- Stishov M.S., Pridatko V.I., Baranjuk V.V. *Pticy ostrova Vrangelja* [Birds of Wrangel Island], Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, 253 p. (In Russian)
- Truhin A.M., Kosygin G.M. [Distribution of seabirds in the waters of the western part of the Bering and Okhotsk seas], *Raspredelenie i biologija morskikh ptic Dal'nego Vostoka* [Distribution and biology of seabirds in the Far East], Vladivostok, Far Eastern branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1987, p. 6–21. (In Russian)
- Uspenskij S.M., Shil'nikov V.I. *Raspredelenie i chislennost' belyh medvedej v Arktike po dannym avianabljudenij ledovoj razvedki* [Distribution and abundance of polar bears in the Arctic according to aerial observations during ice survey], *Belyj medved' i ego ohrana v Sovetskoj Arktike* [Polar bear and its protection in the Soviet Arctic], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, p. 35–37. (In Russian)
- Zaharova D.N., Mamaev E.G. [Number of wintering anseriformes on the Bering Island in 2013], *Biologija i ohrana ptic Kamchatki* [Biology and protection of birds of Kamchatka], Moscow, Centr ohrany dikoj prirody Publ., 2014, iss. 10, p. 78–79. (In Russian)
- Zelenskaja L.A. *Tihookeanskaja chajka (Larus schistisagus Stejneger, 1884)* [Pacific gull (*Larus schistisagus Stejneger, 1884*)], Magadan, Institute for Biological Problems of the North, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 213 p. (In Russian)
- Web sources*
- Nomenklatura morskikh l'dov* [Sea ice nomenclature], URL: <http://www.aari.ru/gdsidb/glossary/r1.htm> (access date 11.01.2021) (In Russian).
- Zapovednaja Rossija* [Reserved Russia], URL: <http://www.zapoved.net> (access date 12.01.2021) (In Russian).

Received 15.01.2021

Revised 23.05.2021

Accepted 20.07.2021

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В УСТЬЕ РЕКИ КОЛЫМЫ ЛЕТОМ 2019 ГОДА

Д.В. Магрицкий¹, Н.Л. Фролова², С.А. Агафонова³, В.А. Ефимов⁴, А.Н. Василенко⁵,
А.А. Сазонов⁶, Л.Е. Ефимова⁷

¹⁻⁷ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

¹ *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: magdima@yandex.ru*

² *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova_nl@mail.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: sv_ice@list.ru*

⁴ *Аспирант; e-mail: roxifixat@yandex.ru*

⁵ *Аспирант; e-mail: saiiia24@mail.ru*

⁶ *Ст. преп.; e-mail: sazonov.lexa@mail.ru*

⁷ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ef_river@mail.ru*

Летом 2019 г., впервые за последние 60 лет, проведено масштабное гидрологическое обследование мало изученного устьевое участка р. Колымы, состоящего из придельтового отрезка и дельты. Программа работ включала измерения скоростей течения в речном потоке, уклонов водной поверхности и глубин, расходов, мутности, температуры и электропроводности воды, съемку местности при помощи БПЛА, отбор проб воды и наносов на химический и другие виды анализа, сбор натуральных данных для калибровки методов дистанционного зондирования. Мониторинг за гидрологическими условиями и прохождением паводков проводился на пяти временных постах. Многие наблюдения были выполнены впервые. Несколько серий измерений расходов воды на 24 створах позволили выяснить характер вдольруслового нарастания стока воды р. Колымы, вклад в него главных притоков и Стадухинской протоки, скоростную структуру потока, современное распределение стока в дельте. Последнее уже не соответствует гидравлическим расчетам конца XX в., поскольку доля Каменной Колымы выросла почти на 10%. В пределах устья выделены две обширные зоны смешения. Первая – на придельтовом отрезке – зона смешения вод главной реки и ее правобережных притоков, вторая – в дельте и на устьевом взморье – речных и морских вод. Воды Омолона и Анюя отличаются от колымских существенно меньшей мутностью (5–15 против 120 мг/л), минерализацией (55–70 и 140–160 мг/л) и основным солевым составом воды. Воды этих притоков более холодные. Их шлейф, несмотря на постепенное перемешивание, прижимается к правому берегу придельтового отрезка русла Колымы и достигает вершины дельты, нарушая тем самым репрезентативность наблюдений на посту Черский, и распространяется дальше. Влияние небольших притоков на температурный режим более сложное. В дельте содержание солей в речных водах увеличивается в сторону моря, но действительно морские воды обнаружены (при тех расходах в реке и ветре с моря, которые фиксировались во время экспедиции) лишь на концевом участке Чукочье протоки. На пространственную изменчивость стока взвешенных наносов влияют разбавление колымских вод омолон-анюйскими, а также продольное снижение уклонов и скоростей течения, распределение по рукавам и протокам, поступление большого объема твердого материала с размываемых берегов, таких как в районе знаменитого Дуванного Яра. С помощью новой седиментационной ловушки, ADCP, турбидиметров и гидрологических зондов получены уникальные данные по распределению взвесей в потоке и их составу.

Ключевые слова: дельта, минерализация, температура воды, наносы, зона смешения, сток воды

ВВЕДЕНИЕ

Устье р. Колымы – одно из наименее изученных в России, хотя река относится к очень большим (площадь водосбора 643 тыс. км²). Другой показатель несоответствия объема знаний об устье и его значимости – это величина водного стока, поступающего через устье в Восточно-Сибирское море: в среднем ~125 км³ воды в год, или почти 58% суммарного притока в море всех речных вод. Одновременно с водами в море выносятся речные взвеси – почти 13 млн т/год [Магрицкий, 2016а], растворенные соли – 3,1 млн т/год [Гидрохимический атлас...,

1990], включая загрязняющие вещества [Геоэкологическое..., 2007; Никаноров и др., 2011], но далеко не все, поскольку устье служит для них барьером. Внушительный тепловой сток нижней Колымы (примерно 4600×10¹² кДж [Магрицкий, 2016б]) оказывает мощное тепляющее влияние не только на долину и дельту реки, но и на морское взморье, на многолетнемерзлые породы берегов.

Последние десятилетия для бассейна р. Колымы и в целом для северо-востока РФ характеризуются серьезными климатически обусловленными и антропогенными изменениями стока и гидрологических

условий. Они, по сути, служат наглядным примером реакции рек криолитозоны на разбалансирование системы «климат – вечная мерзлота – водные объекты» [Веремеева, 2017; Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2008, 2016, 2018; Magritsky et al., 2018; Nesterova et al., 2020; Romanovsky et al., 2010]. Во-первых, водные ресурсы реки увеличиваются с середины 1990-х гг., и этот рост уже достиг 15% по сравнению с годами до 1995 г. Это явное следствие естественных изменений температурно-влажностных условий на водосборе Колымы [Василевская, Сточкуте, 2017; Второй..., 2014; Сточкуте, Василевская, 2016; Nesterova et al., 2020] и, возможно, деградации многолетней мерзлоты с высвобождением замерзшей воды [Davudov, 2011]. Хотя фактор ухудшения «качества первичных данных» авторами не исключается [Магрицкий, 2020]. Во-вторых, произошло межсезонное перераспределение стока воды в пользу прежде всего зимней межени: +174%. Главная причина – эксплуатация двух крупных водохранилищ (рис. 1) – Колымского (годы вывода на проектные характеристики – 1980–1989 гг., створ плотины расположен в 1893 км от моря) и меньшего по размеру Усть-Среднеканского (2013–2018 гг., в 1677 км) [Магрицкий, 2008, 2018; Magritsky et al., 2018]. В-третьих, сток взвешенных наносов среднего и нижнего течения Колымы испытал две волны мощного антропогенного воздействия [Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2001, 2016; Ушаков, 2016]. Вначале, с 1940-х гг., под влиянием масштабной горнодобывающей деятельности (прежде всего в верхнем и частично среднем течении) он заметно увеличился. Но с запуском Колымского гидроузла и удержанием водохранилищем большей части взвесей, он сократился в 1990–1997 гг. в 1,9 раза и не восстанавливался вплоть до устьевых участка. Уменьшились и объемы золотодобычи – на 45% за 1971–1998 гг. К сожалению, после 1997 г. мониторинг расходов наносов в нижнем течении и устье прекратился. В-четвертых, климатически обусловленный нагрев речных вод (+0,5...1,0°C) и техногенное уменьшение водности половодья разнонаправлено влияют на тепловой сток Колымы в ее устье [Василенко и др., 2020; Магрицкий, 2016]. Он сократился на 6,3% (по состоянию на 2012 г.), несмотря на увеличение летом – осенью на 8,8%. В-пятых, уменьшились объемы навигации и дноуглубления.

Об этих важных ранее перечисленных и других изменениях, их гидрологических последствиях мы можем судить лишь по материалам мониторинга на посту Среднеколымск – на границе среднего и нижнего участков Колымы. Хотя в вершине устьевой области с 1977 по 2008 гг. функционировал стоковый пункт наблюдений Колымское-1 (в 9 км

ниже впадения р. Омолон), который считался замыкающим створом [Магрицкий, 2001]. Но с конца 1990-х гг. реальных измерений расходов воды на нем не проводилось. Ниже поста Среднеколымск на протяжении 640 км (вплоть до моря) сток Колымы, как и его сезонные и многолетние колебания, претерпевают существенные вдольрусловые изменения [Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2001, 2016], поскольку нижняя Колыма, помимо многочисленных небольших притоков, принимает справа два своих самых больших притока – реки Омолон и Анной (см. рис. 1). И, по новым оценкам авторов, водный сток увеличивается от Колымского-1 к морю в среднем в 1,2 раза, а от Среднеколымска – в 1,7 раза. То есть, обладая данными наблюдений на посту Среднеколымск, мы не владеем достоверной информацией, например, о величине стока Колымы на выходе ее в море, о дальнейшей трансформации тех внутригодовых и многолетних изменений гидрологических характеристик, что фиксируются на опорном посту. В итоге не можем адекватно судить о способности стока Колымы влиять на региональный климат, гидрологические процессы в устье и на взморье. А они, возможно, уже меняются [Osadchiev et al., 2020]. Вторая причина повышенного внимания к устью Колымы, обуславливающая актуальность и перечень решаемых проведенными исследованиями задач, – это практически полное отсутствие натуральных сведений о его современных гидрологических условиях и устьевых процессах, их реакции на меняющиеся условия формирования и транзита стока на водосборе, гидрологический режим приемного водоема. И это несмотря на еще сохранившуюся здесь экономическую активность и размещение нескольких крупных населенных пунктов, портовую инфраструктуру и речно-морское судоходство, необходимость поддерживать их бесперебойность и безопасность, развивать и встраивать в набирающий грузообороты Северный морской путь. Третья причина – это решение актуальной (для гидрологического сообщества) задачи по увязке данных спутникового зондирования водных объектов и контактных гидрологических измерений с выходом на новый, более информативный и оперативный уровень гидрологического мониторинга, а также апробация новых гидрологических приборов и методик измерений.

Единственным решением обозначенных задач стали комплексные экспедиционные исследования кафедры гидрологии суши МГУ летом 2019 г. с измерением обширного перечня гидрологических характеристик на всем протяжении устьевых участков Колымы (с выходом на устьевое взморье) и использованием технологического оборудования, традиционных и новых методик. Сопоставление собран-

ных «в поле» материалов с данными стационарного и спутникового мониторинга позволило извлечь дополнительную ценную информацию. Таких материалов по устью Колымы, тем более по его современному гидрологическому состоянию, еще нет. Ранее, в XX в., эпизодические измерения расходов воды и другие гидрологические работы в устье Колымы выполнялись в 1928–1929, 1934–1937 (ГУСМП), 1953–1954 (Арктикпроект) [Гиляров, Иванов, 1967; Самбуренко, 1938] и совсем ограниченные в 1991 г. (ААНИИ). То, что мы знали до недавнего времени о распределении расходов воды по рукавам дельты Колымы [Михайлов, 1997], было полу-

чено главным образом расчетно-гидравлическими методами [Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Пискун, 2002]. В XXI в. состоялось уже четыре гидрологические экспедиции в устье Колымы, организованные сотрудниками кафедры гидрологии суши МГУ: 11–16 августа 2017 г. несколько измерений расходов воды выполнены Д.И. Школьным, с 24 июля по 21 августа 2019 г. состоялась комплексная гидрологическая экспедиция под рук. Д.В. Магрицкого и Н.Л. Фроловой, с 6 по 30 июля 2020 г. и с июня по август 2021 г. две экспедиции с решением геохимических задач под рук. С.Р. Чалова и В.А. Ефимова.

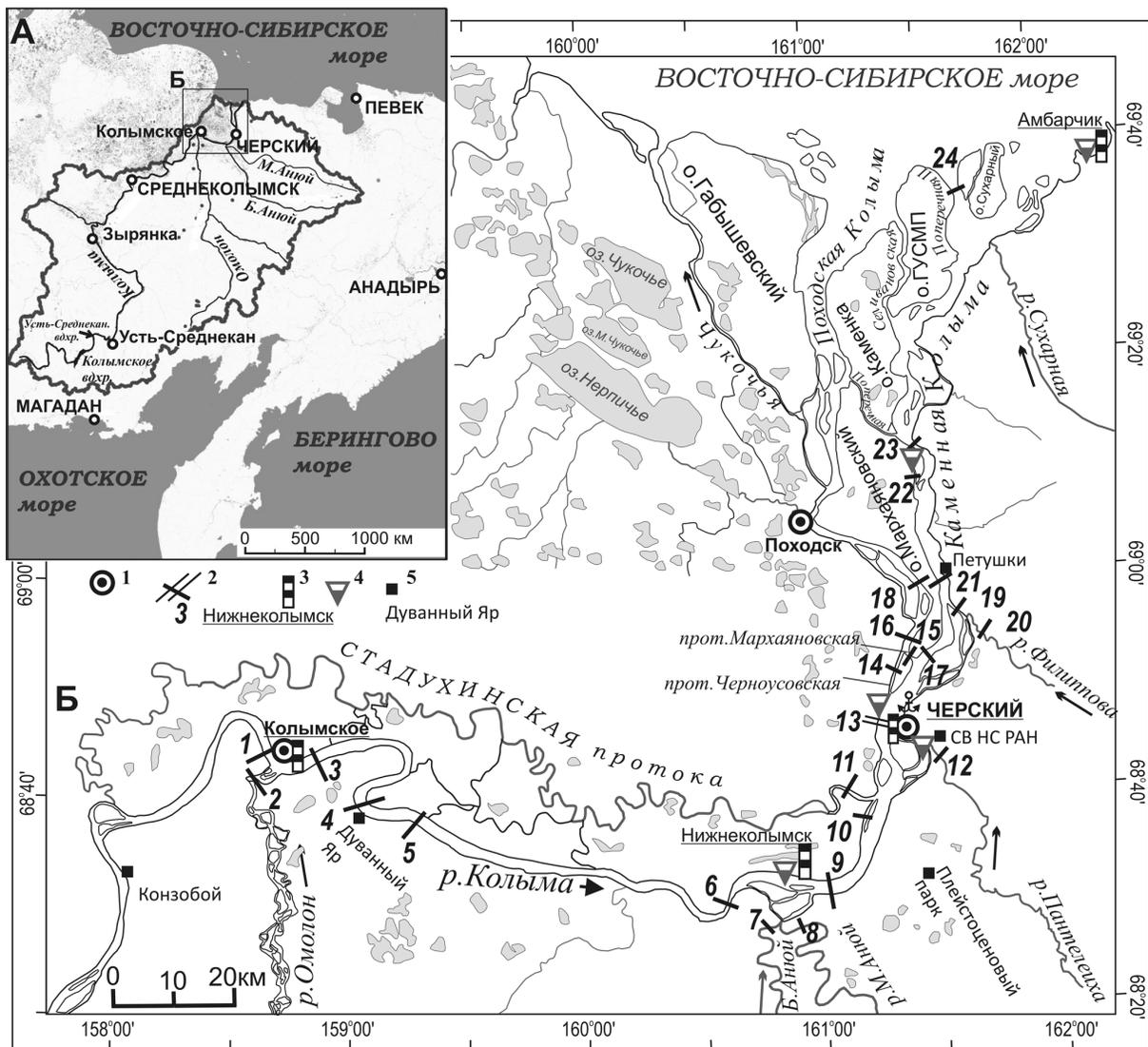


Рис. 1. Картограммы северо-восточного сектора РФ с границами бассейна р. Колымы (А) и устьевом участке р. Колымы (Б):

1 – населенные пункты; 2 – местоположение и номера расходных створов (нумерация в соответствии с таблицей); 3 – гидрологические посты РОСГИДРОМЕТА; 4 – временные посты экспедиционного отряда; 5 – примечательные места и объекты

Fig. 1. Schematic maps of the north-eastern sector of the Russian Federation with the boundaries of the Kolyma River basin (A) and the river section of the Kolyma River mouth (B):

1 – settlements; 2 – location and numbers of discharge measurement cross-sections (numbering in accordance with the table); 3 – ROSHYDROMET hydrological gages; 4 – temporary gages during expedition; 5 – notable places and objects

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главным источником сведений о современном гидрологическом состоянии устья Колымы и устьевых процессах стали материалы экспедиционных измерений в период с 24 июля по 16 августа 2019 г. Натурными измерениями были охвачены весь устьевой участок Колымы (от устья р. Омолон до морского края дельты) и ближнее устьевое взморье вплоть до морского гидропоста Амбарчик (см. рис. 1). Местом базирования гидрологического отряда численностью шесть человек была выбрана Северо-Восточная научная станция РАН (рук. С.А. Зимов) в пос. Черском на р. Пантелеихе. Программа работ включала: 1) обустройство пяти временных водомерных постов, оборудованных логгерами Solinst и реперами, непрерывный мониторинг на них уровней и температуры воды, одно-двухразовые в течение суток измерения электропроводности воды; 2) несколько серий измерений электропроводности и температуры воды по глубине и ширине потока на протяжении устьевого участка Колымы, а также в устьях притоков и в базовом гидростворе; 3) измерения скоростей течения и расходов воды с катеров; 4) определение высотных отметок и уклонов водной поверхности в Колыме при помощи GNSS приемников; 5) отбор проб воды для установления химического состава и весовой мутности воды, а также наносов для гранулометрического и химического анализа; 6) установку в базовом створе седиментационных ловушек; 7) измерение скоростей движения донных гряд и рельефа дна с использованием эхолотного комплекса LOWRANCE; 8) рекогносцировочное обследование реки, дельтовых рукавов, устьевого взморья и берегов, а также водных объектов в Плейстоценовом парке (подробно о нем на сайте <https://pleistocenepark.ru/ru/>) с высотной съемкой его территории с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro. Часть собранных во время этой экспедиции и обработанных данных, в частности по детальному химическому составу воды и взвесей, по влекомым наносам будет представлена в других публикациях.

Временные посты (в/п) с логгерами Solinst были оборудованы на р. Пантелеихе, перед ее впадением в Колыму и в районе пристани Северо-восточной научной станции (СВНС); на Колыме – в Нижнеколымске и Черском, в дельтовой протоке Березкина, соединенной с Каменной Колымой, на морском гидропосту Амбарчик (см. рис. 1). Самописцы уровней воды фирмы Solinst барботажные, поэтому вводилась поправка на атмосферное давление с такого же логгера Solinst, но в здании СВНС. Частота записи 15 мин. Данные с логгеров были сравнены с измерениями уровней воды на постоянных

постах Колымское, Черский и Амбарчик, любезно предоставленных наблюдателями, а также взятых с сайтов Центра регистра и кадастра [Информационная..., 2020] и AllRivers [AllRivers, 2020].

Отметки уровней воды у Черского и Нижнеколымска, уклоны водной поверхности, отметки в поперечном морфостворе были получены с помощью GNSS оборудования (Global Navigation Satellite System) фирм Leica и Trimble. Их полноценное применение для высотной привязки постов в устье Колымы было ограничено большими расстояниями от базовой станции в п. Черский и отсутствием отметок ГГС в районе исследований. Репер на посту Черский имеет высоту в условной системе координат (м усл.). В итоге, для участка протяженностью 5,67 км между поселками Черский и Зеленый Мыс перепад высотных отметок уровней воды составил 11,3 см (9 августа 2019 г.), т. е. падение оказалось 0,02 м/км. Между Нижнеколымском и Черским перепад высот 14 августа был 0,694 м (при расстоянии 36,8 км), т. е. падение составило 0,02 м/км.

Температура и электропроводность воды *in situ* измерялись электрокондуктометром MAPK (Нижний Новгород, Россия) и гидрологическим зондом YSI Pro 30 (США). Было проведено 239 измерений электропроводности – 44 на придельтовом отрезке Колымы (по 3 измерения на вертикали – у поверхности, средний и придонный горизонты, несколькими сериями), 44 – в вершине дельты (на базовом створе), 72 – в дельте, 32 – в устьях Омолона, Анюя и Стадухинской протоки, 24 – на главном посту на р. Пантелеихе, 23 – на водных объектах Плейстоценового парка. Одновременно было отобрано и стандартными методами изучено в лаборатории 46 проб воды – на основной солевой состав [Аналитические..., 2017]. Сопоставление измеренной электропроводности (Σ , мкСм/см) и определенной суммы шести основных ионов (Σ_i , мг/л) позволило получить надежную линейную зависимость для диапазона суммы ионов 60–200 мг/л:

$$\Sigma_i = 0,855\Sigma - 13,5 \quad (R^2 = 0,97). \quad (1)$$

По измерениям 10 августа в базовом створе получена зависимость, расположенная выше основной, возможно по причине увеличения содержания сульфат-ионов. Значительный объем данных по температуре воды и ее изменениям в поперечном сечении гидростворов был получен с помощью термодатчика доплер-акустического профилографа течений ADCP RiverRay. Он измеряет температуру воды у поверхности с погрешностями, имеющими систематическое отклонение. Разница температуры воды, полученной с помощью зонда и ADCP, составила всего $\pm 0,1 \dots 0,2^\circ\text{C}$. Поэтому при измерении

температуры воды в створах мы получали правдоподобную тенденцию ее изменения (от одного берега к другому) и разность между точками.

Большой и важный блок гидрологических работ составили измерения скоростей течения и расходов воды с помощью ADCP RiverRay в соответствии с рекомендациями РД 52.08.767-2012 [Руководящий..., 2012]. Сделано 39 измерений (двумя проходами) – на Колыме (выше и ниже впадения в нее главных притоков и протоков), в устьях рек Омолон, Анюй и Пантелеиха, в устье Стадухинской протоки, в вершине дельты (базовый гидроствор), в истоках и на отдельных участках дельтовых рукавов, в устьевом створе Второй Поперечной протоки (см. рис. 1; табл.). Измерения выполнялись почти синхронно, несколькими сериями и сопровождали остальные гидрологические определения. На базовом гидростворе с 26 июля по 16 августа 2019 г. было проведено восемь измерений расходов. Каждое из них содержало 2–3 трека, расхождение между значениями составило 0,1–1,1%. Для других створов оно не превысило нормативные 5%, кроме трех случаев (см. табл.). Управление ADCP и обработка данных измерений осуществлялись в программе WinRiver II. Расчет распределения расходов воды в узлах разветвлений и соединений выполнялся с опорой на водно-балансовые решения.

Пробы воды с взвешенными наносами отбирались с разных горизонтов с помощью погружного насоса. Далее они разделялись на жидкую фракцию и взвеси (путем фильтрования на вакуумной установке Millipore через заранее взвешенные мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм). В пробах воды определялась концентрация главных ионов, биогенных элементов, органического вещества, а также микроэлементов [Аналитические..., 2017]. Фильтры с осадком просушивались для последующего определения мутности воды, взвешенных форм микроэлементов и органического вещества. Гранулометрический состав взвешенных частиц определялся методом лазерной дифракции на лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22 (Германия) в лаборатории географического факультета МГУ. Оптическая мутность фиксировалась сразу «в поле» при помощи портативного турбидиметра НАСН 2100р. Каждое определение состояло из трех–пяти измерений, результаты которых усреднялись. Сопоставление данных по весовой (s , мг/л) и оптической (OTu , NTU) мутности позволило построить расчетную зависимость для условий летне-осенней межени с паводками и диапазона мутности от 5 до 90 мг/л:

$$s = -0,0058OTu^2 + 1,242OTu - 0,36 (R^2 = 0,92). \quad (2)$$

Для всестороннего анализа данных по мутности анализировались также данные проекта ArcticGRO [Arctic..., 2020].

С целью характеристики метеоусловий во время экспедиционных работ были использованы данные метеонаблюдений за июль и август 2019 г. за атмосферным давлением, приведенным к уровню моря, среднесуточной температурой воздуха, суточными слоями осадков, скоростью и направлением приземного ветра с трех метеостанций: в с. Колымском (верхний участок работ), п. Черский (вершина дельты) и м/с Амбарчик (на побережье). Источники – материалы наблюдателей на метеостанциях Амбарчик и Черский, срочные наблюдения с сайта gr5.ru [Расписание..., 2019].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспедиционные работы 2019 г. проводились на устьевом участке Колымы длиной 282 км. Он, согласно [Атлас..., 2017; Гиляров, Иванов, 1967; Магрицкий, 2001; Михайлов, 1997], включает придельтовый широкопойменный отрезок с верхней границей у устья р. Омолон, куда могут распространяться со стороны моря большие нагоны (обеспеченностью <10%), и многорукавную неприливную дельту выполнения с вершиной у п. Черский. Длина и площадь дельты 120 км и 3250 км² соответственно. В 282 и 153 км от морского края дельты (МКД) в Колыму с правого берега впадают ее самые большие притоки – реки Омолон и Анюй (см. рис. 1). Одна из особенностей придельтового отрезка – наличие крупной Стадухинской протоки (длиной 350 км). Она отделяется от Колымы выше впадения р. Омолон, далее, сильно меандрируя, течет параллельно основному руслу реки и впадает в нее выше вершины дельты. Со Стадухинской соединяются практически все левобережные протоки, увеличивая ее сток.

В вершине дельты (ВД) Колыма разделяется на Каменную Колыму (правый рукав) и Черноусовскую протоку (левый) (см. рис. 1). Длина судходной Каменной Колымы ~120 км. В Каменной Колыме много песчано-илистых островов и отмелей, разделенных короткими и узкими протоками. В 7 км ниже вершины дельты она дает начало поперечной протоке Мархаяновской. Ее слияние с Черноусовской протокой образует основной левобережный рукав – протоку Походская Колыма (длина 90 км). От Походской влево отходит мелководная и несудоходная протока Чукочь длиной 91 км, самостоятельно впадающая в море. Между протоками Каменная Колыма и Походская Колыма располагаются Первая Поперечная протока (9 км), Селивановская протока (20 км) и Вторая Поперечная

Таблица
Данные измерений скоростей течения, расходов воды и параметров поперечного сечения потока в июле–августе 2019 г. на устьевом участке р. Колымы

Водоток, створ (км от базового створа в п. Черском), координаты	№ на рис. 1	Дата	Количество проходов, разность, %	Ширина русла, м	Средняя глубина, м	Расход воды, м ³ /с	Скорость течения, м/с	
							Средняя	Максимальная
Колыма, п. Колымское, выше устья р. Омолон (+164 км), 68,744116° с. ш., 158,639811° в. д.	1	1.08	2, 1	1386	6,10	6570	0,78	1,19
		8.08	2, 0	1749	4,75	5490	0,66	1,07
Омолон река, устье, 68,677025° с. ш., 158,609177° в. д.	2	1.08	2, 0	370	4,30	1230	0,78	1,18
		8.08	4, 2	335	3,85	897	0,70	1,06
Колыма, ниже устья р.Омолон (+153 км), 68,726302° с. ш., 158,904667° в. д.	3	1.08	1, нет	1960	6,04	7800	0,66	0,96
		8.08	2, 0	2060	3,95	5910	0,73	1,22
Колыма, Дуванный Яр (+123 км), 68,653411° с. ш., 159,057471° в. д.	4	1.08	1, нет	2321	4,75	6970	0,63	0,87
		1.08	1, нет	921	14,5	6670	0,50	0,76
Колыма, выше устья р.Анной (+51 км), 68,516662° с. ш., 160,615839° в. д.	6	4.08	3, 2	986	13,5	7370	0,55	0,91
		3.08	3, 2	283	6,4	399	0,22	0,31
Большой Анной река, устье, 68,456403° с. ш., 160,761453° в. д.	7	10.08	2, 3	370	4,92	277	0,15	0,35
		3.08	2, 2	412	4,22	408	0,24	0,40
Малый Анной река, устье, 68,451753° с. ш., 160,885115° в. д.	8	10.08	2, 1	654	2,60	258	0,15	0,40
		4.08	2, 0	2525	5,70	8400	0,59	0,90
Колыма, ниже устья р. Анной (+32 км), 68,519510° с. ш., 161,062380° в. д.	9	10.08	2, 0	2423	6,13	6660	0,45	0,78
		2.08	4, 5	153	1,58	59,4	0,25	0,40
Протока к западу от о. Мал. Осередыш, 68,632220° с. ш., 161,195460° в. д.	10	2.08	4, 2	500	3,37	680	0,40	0,62
		26.07	2, 3	140	2,58	21,7	0,06	0,13
Стадухинская протока, устье, 68,659298° с. ш., 161,115631° в. д.	11	5.08	2, 11	126	2,64	33,7	0,10	0,21
		26.07	2, 1	3111	6,00	7290	0,39	0,61
р. Пантелеиха, выше впадения Пантелеихинской протоки, 68,733381° с. ш., 161,455615° в. д.	12	31.07	2, 1	3050	6,10	7620	0,41	0,65
		2.08	2, 1	2881	5,83	8520	0,51	0,87
Колыма, п. Черский – базовый створ (0 км), 68,762344° с. ш., 161,275677° в. д.	13	5.08	2, 1	3125	5,90	9670	0,53	0,83
		6.08	2, 1	2880	5,50	9010	0,57	0,86
		9.08	2, 0	3202	5,30	7940	0,47	0,75
		10.08	2, 0	3037	5,40	7210	0,44	0,66
		16.08	3, 0	3096	5,72	10100	0,61	0,87

Продолжение таблицы

Водооток, створ (км от базового створа в п. Черском), координаты	№ на рис. 1	Дата	Количество проходов, разность, %	Ширина русла, м	Средняя глубина, м	Расход воды, м ³ /с	Скорость течения, м/с	
							Средняя	Максимальная
Чернусовская протока (дельта), средн. отсек (-9,4 км), 68,841352° с. ш., 161,335270° в. д.	14	31.07	2, 0	507	5,87	1020	0,35	0,53
Мархьяновская протока (дельта), средн. отсек, 68,869249° с. ш., 161,392280° в. д.	15	31.07	2, 11	328	17,5	1260	0,22	0,54
Походская Кольма (дельта), исток (-16 км), 68,886988° с. ш., 161,389141° в. д.	16	4.08	2, 0	1148	6,90	3320	0,42	0,67
		16.08	2, 1	1310	11,2	3510	0,47	0,70
Каменная Кольма (дельта), ниже Мархьяновской протоки (-15,4 км), 68,876261° с. ш., 161,488226° в. д.	17	31.07	1, нет	1402	10,6	5030	0,34	0,52
		16.08	2, 0	1039	7,23	6130	0,42	0,64
Походская Кольма (дельта), исток (-16 км), 68,886988° с. ш., 161,389141° в. д.	18	16.08	2, 1	1310	11,2	3510	0,47	0,70
		31.07	2, 4	424	3,62	337	0,22	0,51
Филипповская протока (дельта), устье – ниже впадения р. Филипповки, 68,930401° с. ш., 161,602297° в. д.	19	16.08	–	–	–	460*	–	–
		5.08	2, 1	75	5,08	5,46	0,01	0,15
Каменная Кольма (дельта), ниже Филипповской протоки (-29,5 км), 68,983573° с. ш., 161,533197° в. д.	21	5.08	2, 0	1256	10,0	6190	0,49	0,75
		28.07	1, нет	141	3,86	108	0,20	0,48
Березкина протока (дельта), исток, 69,136300° с. ш., 161,446240° в. д.	22	28.07	2, 2	760	16,5	5700	0,45	0,73
		28.07	1, нет	1448	5,50	3440	0,43	0,64
Каменная Кольма (дельта), ниже впадения Березкина прот. (-51,5 км), 69,180494° с. ш., 161,466410° в. д.	23	28.07	1, нет	–	–	–	–	–
		28.07	2, 2	760	16,5	5700	0,45	0,73
Поперечная II (дельта), устьевой створ (-103,5 км), 69,585141° с. ш., 161,678545° в. д.	24	28.07	1, нет	–	–	–	–	–
		28.07	1, нет	1448	5,50	3440	0,43	0,64

Примечание: * обозначено надежное значение, полученное по русловому водному балансу.

протока (11 км). Правый берег Каменной Колымы высокий (до 30–40 м), с каменными отвесными мысами. Левобережье дельты, наоборот, равнинное, заболоченное, с многочисленными старицами, тундровыми речками (висками) и термокарстовыми озерами. Это комплекс разновозрастных морских террас. В устьях Каменной Колымы, Походской Колымы и Второй Поперечной – обширные бары, выдвинутые в Колымский залив на 4–6 км за линию МКД. Судходная Каменная Колыма продолжается на бере бороздиной с глубинами от 4,5 до 7 м.

На устьевом участке ранее действовали три гидрологических поста – уречный в с. Колымское (в 282 км от моря и выше устья Омолона) со стоковым гидроствором Колымское-1 (272 км, ниже устья р. Омолон), уречные посты в пгт Нижнеколымск (155 км) и п. Черский (120 км) (см. рис. 1). Эпизодические уречные измерения выполнялись на посту Край леса. В 1988 г. Нижнеколымск был закрыт. Данные по стоку воды в Колымском-1 имеются с 1977 по 2008 г. В действительности же последние измерения расходов воды выполнены в 1998 г.

Гидрологические и метеорологические условия во время экспедиции. По погодным условиям экспедиционные изыскания можно разделить на два подпериода. До начала августа над устьевой областью Колымы господствовал циклональный тип погоды с атмосферным давлением от 995 до 1015 гПа, частыми и повсеместными осадками с середины и до конца июля (рис. 2), понижением температуры воздуха от 25°C (11 июля) до 4–10°C (и ниже) в третьей декаде июля, сильными ветрами до 5–7 м/с, в основном северных румбов, создававшими сильное волнение, ухудшавшее условия проведения измерений, а также подпор потока и подъем уровня. Вообще сильные ветры в июле и августе здесь не редкость. Циклональную погоду сменил антициклональный тип устойчивой, сухой и теплой погоды с атмосферным давлением вплоть до 1025 гПа, температурой воздуха с максимальными значениями в 18–20°C и ветрами со скоростью 1–2 м/с и даже штилем. Во время экспедиции осадков в п. Черский выпало больше, чем в с. Колымское, а минимальное их количество наблюдалось на морском побережье.

Экспедиционный выезд пришелся на летне-осенний паводочный сезон, присущий рекам с восточносибирским типом водного режима, который осложнялся сбросами из колымских водохранилищ (см. рис. 2). Об этом свидетельствуют данные водомерных наблюдений как на постоянных постах средней и нижней Колымы, так и на временных пунктах, открытых участниками экспедиционных работ. По сути, экспедиционные исследования «захватили» три паводочные волны, возможно с добавлением подпорного эффекта со стороны моря.

С первой декады июля и по конец месяца по реке прошел небольшой паводок. С конца июля наблюдалось более значительное повышение уровня с пиком 5–6 августа и постепенным спадом до 11–12 августа. После началось интенсивное и большее по величине повышение уровня вплоть до 15–16 августа и далее. Размах колебаний уровня составил около 60 см.

В пределах всей дельты отмечено влияние на ход уровня нагонных явлений, усиливающееся с продвижением к морю – от поста в Нижнеколымске к постам Черский (ВД), Край леса (средняя часть дельты) и Амбарчик на морском побережье. Причем оно проявляет себя двойко – на внутри- и межсуточном временных масштабах и более продолжительно – с учетом «муссонного» характера ветров на арктическом побережье: летом превалируют сильные ветры в направлении с холодных арктических морей на нагретую сушу, поддерживая, таким образом, высокое стояние уровней в устьях арктических рек.

Закономерности пространственно-временной изменчивости температуры воды. Временные флуктуации температуры воды, во-первых, следовали, прежде всего, за изменениями температуры воздуха. На первом этапе пребывания на объекте температура воды в Колыме снижалась с 13 до 9,5°C (в базовом створе и на стрежне), на втором этапе отмечен ее рост до 15–16°C (см. рис. 2). Свое влияние оказывала и водность реки, поскольку увеличение расходов воды сдерживало нагрев речных вод. Во-вторых, присутствовала явная внутрисуточная изменчивость в диапазоне от 0,1 до 2–2,5°C, усиливающаяся во время антициклонального типа погоды и с удалением от моря, а также на р. Пантелеиха, на которой были организованы непрерывные наблюдения, т. е. по сути на небольших водотоках. В-третьих, значительная ширина и сложный профиль русла Колымы и, главное, впадение притоков формировали неравномерное распределение температуры воды по ширине. Установлено, что в летний период имело место далеко распространяющееся в виде шлейфа более холодных вод, прижатых к правому берегу, охлаждающее влияние вод Омолона и Анюя на прогретые в южной части водосбора и колымскими водохранилищами воды главной реки [Геоэкологическое..., 2007; Ресурсы..., 1969]. Разница температур воды у левого и правого берегов Колымы сразу ниже устья Омолона составила до 1,5°C, ниже Анюя – до 1,2°C, в створе Черского – до 1°C (рис. 3). Она, вероятно, уменьшается с потеплением в этой части бассейна и, наоборот, возрастает с понижением здесь температуры воздуха. Небольшие по размеру и водности притоки, такие как р. Пантелеиха, а также Стадунинская протока

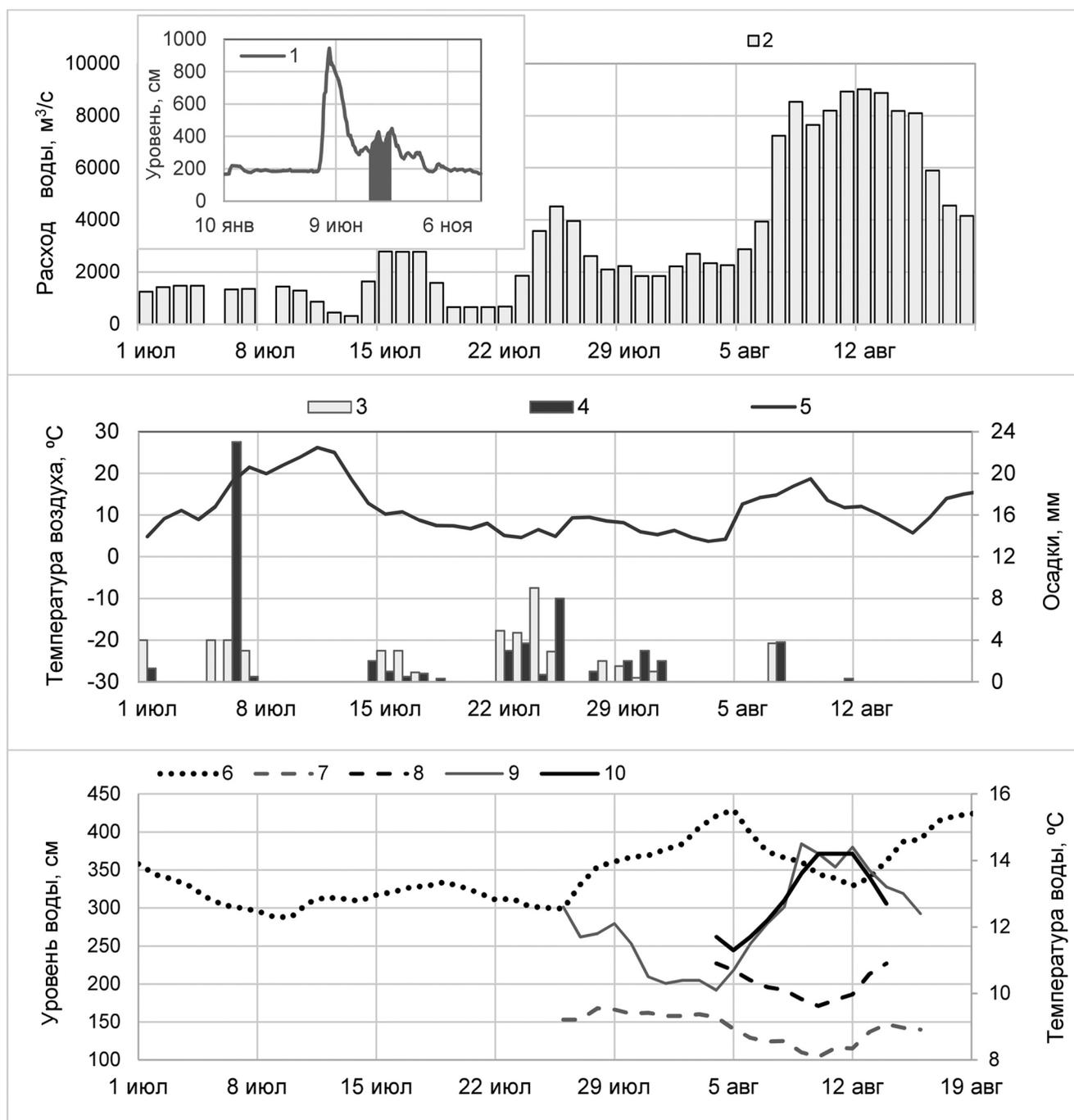


Рис. 2. Гидрометеорологические условия в июле–августе 2019 г. по данным наблюдений на постах государственной гидрометсети и экспедиционных измерений:

1 – уровень воды в р. Колыме за 2019 г. (пост с. Колымское; см над нулем поста); 2 – расход воды в р. Колыме в створе Усть-Среднеканской ГЭС [РусГидро; 2020]; 3 – осадки по м/с Колымское; 4 – осадки по м/с Черский; 5 – температура воздуха по м/с Черский; 6 – уровень воды в р. Колыме за июль–август (пост с. Колымское; см над нулем поста); 7 – уровень на в/п Черский (логгер); 8 – уровень на в/п Нижнеколымск (логгер); 9 – температура воды на в/п Черский (логгер); 10 – температура воды на в/п Нижнеколымск (логгер)

Fig. 2. Hydrological and meteorological situation in July and August 2019 according to ROSHYDROMET and expedition measurements:

1 – Kolyma water level in 2019 (Kolymskoe ROSHYDROMET gage, cm upper base level); 2 – discharges from Ust-Srednekan hydropower station; 3 – precipitation in Kolymskoe ROSHYDROMET station; 4 – precipitation in Cherskiy ROSHYDROMET station; 5 – air temperature in Cherskiy ROSHYDROMET station; 6 – Kolyma water level in July and August 2019 (Kolymskoe ROSHYDROMET gage, cm upper base level); 7 – Kolyma water level near Cherskiy settlement (logger); 8 – Kolyma water level near Nizhnekolymsk settlement (logger); 9 – water temperature near Cherskiy settlement (logger); 10 – water temperature near Nizhnekolymsk settlement (logger)

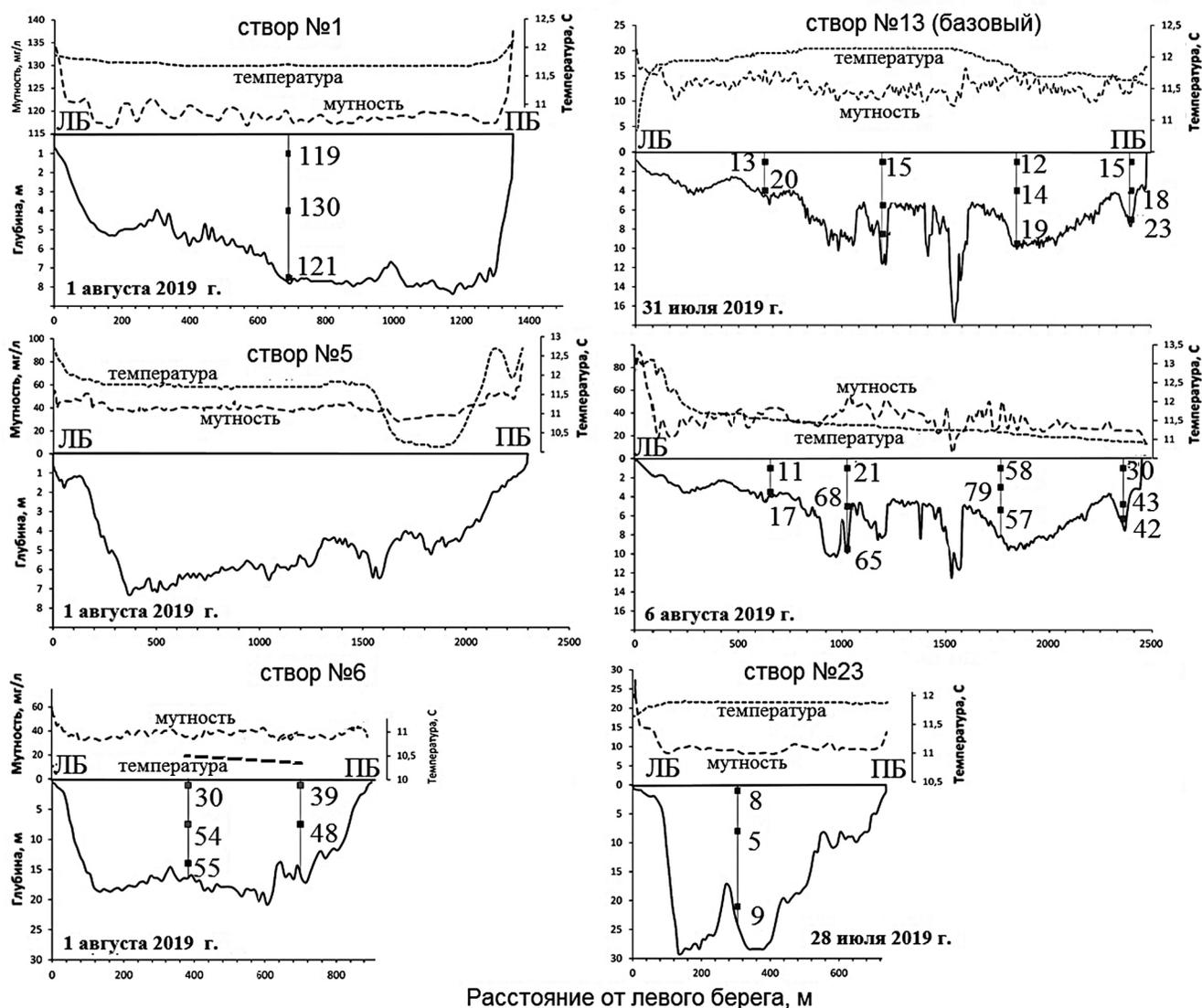


Рис. 3. Распределение температуры воды, мутности и глубины по поперечному сечению речного потока. Верхний рисунок – распределение приповерхностных температур воды (правая ось) и мутности воды (левая ось), измеренных или рассчитанных на основе данных ADCP. Нижний рисунок – значения мутности воды (мг/л) на разных горизонтах вертикалей, полученные по результатам изучения проб воды с взвешями; нижняя кривая – профиль дна. Номера створов соответствуют рис. 1

Fig. 3. Water temperature, turbidity and depth distribution into the Kolyma River channel.

The upper figure – distribution of surface water temperatures (right axis) and turbidity (left axis), measured or calculated using the ADCP data. The lower figure – turbidity (mg/l) in different depths according to sediment samples, the lower curve is the bottom profile.

The cross-section numbers correspond to Fig. 1

разнонаправленно влияли на температурные характеристики прибрежной зоны Колымы и пограничных дельтовых рукавов. В условиях циклональной холодной погоды воды Пантелеихи создавали локальный охлаждающий эффект на прибрежную зону у правого берега Колымы в створе Черского. А с установлением антициклональной погоды быстро нагретые воды Пантелеихи обусловили скачок температуры на 3,5°C в узкой 200-метровой прибрежной зоне, тогда как от левого берега до правого температура по всей ширине Колымы снижалась на 1–1,5°C в диапазоне от 14,5 до 12,8°C. Это

побуждает задуматься о репрезентативности публикуемых данных мониторинга за температурой воды на посту Черский, измерения которой проводятся в устье Пантелеихи. Кроме того, сравнение измеренных на посту Черский и средней по сечению в базовом створе температур воды показало, что занижение рассчитанных по ним величин теплового стока составляет от 2 до 12%. В целом, на малых водотоках после антициклонального прогрева температуры воды были на 2–5°C выше, чем в Колыме. В-четвертых, неравномерное распределение температур по ширине Колымы в базовом створе сохра-

нялось и в дельте. В западную часть дельты (Походскую Колыму) поступали более теплые колымские воды, в том числе из протоки Стадухинской, а в Каменную Колыму – колымские воды и вдоль правого берега более холодные воды правобережных притоков. Эти различия прослеживались на протяжении не менее 40 км. В-пятых, различия поверхностной и придонной температуры воды в Колыме не превышали 0,1–0,2°C, что свидетельствует о хорошем турбулентном перемешивании в потоке.

Зоны смешения в устье р. Колымы. Один из специфических устьевых процессов – это смешение вод реки и моря и нарастание солености воды в сторону приемного водоема, трансформация стока растворенных веществ в устьевой зоне смешения и интрузия морских вод (при определенных условиях) на устьевой участок [Михайлов и др., 2018]. В качестве удобного (в плане простоты и точности измерений) маркера этих процессов выбирают электропроводность воды (Σ , мкСм/см), зависящую прежде всего от концентрации растворенных в ней веществ. Анализ пространственной изменчивости электропроводности показал, что в пределах устьевого участка Колымы находятся две обширные зоны смешения. Первая – на придельтовом отрезке – вод главной реки и ее притоков, прежде всего Омолона и Анюя, вторая – в дельте и на устьевом взморье – речных и морских вод. Причем первая была во время экспедиции более выраженной.

Воды упомянутых правобережных притоков отличаются от колымской воды не только температурой, но также минерализацией и химическим составом. Колымским водам, поступающим на придельтовый отрезок, присуща повышенная минерализация: во время экспедиции она варьировала в диапазоне от 140 до 160 мг/л (Σ), что в 1,5 раза выше в сравнении с 1990–2000 гг. [Геоэкологическое..., 2007]. Возможно, это следствие ранее прошедших на водосборе интенсивных дождей, хорошо промывших оттаявший верхний слой почвогрунтов. Подобный процесс описан в [Ресурсы..., 1969]. Воды гидрокарбонатные и кальциевые, но с повышенным содержанием сульфатов. Минерализация вод Омолона и Анюя – от 55 до 70 мг/л, $\Sigma = 60–85$ мкСм/см. Воды также гидрокарбонатные и кальциевые, но концентрация сульфат-ионов почти сравнима с содержанием гидрокарбонатов. Похожие значения электропроводности в водоемах, протоках и висках Плейстоценового парка (между М. Анюем и Пантелеихой) – 65–70 мкСм/см. В итоге, на протяжении всего придельтового отрезка зафиксировано снижение электропроводности воды – от 180–200 мкСм/см выше впадения Омолона до 160–170 мкСм/см в вершине дельты (рис. 4А). Причем полного смешения колымских и омолон-анюйских

вод не происходит. И шлейф вначале омолонских вод, а затем объединенных омолон-анюйских вод, прижимающийся к правому берегу, достигает базового створа. Здесь разница между электропроводностью у левого берега – середины потока и непосредственно у правого берега составляла 40–50 мкСм/см и больше, а сумма ионов 26 июля снижалась с 125 до 83 мг/л, 10 августа – с 150–160 до 87–98 мг/л.

К средней части дельты, по-видимому, происходило полное перемешивание, и по направлению к морю электропроводность воды в главных рукавах возрастала в пределах зоны смешения речных и морских вод от 140–150 до 175 мкСм/см на морском крае дельты (см. рис. 4А). Проникновения соленых морских вод на глубине не обнаружено (измерения на вертикалях производились через каждый метр). Но повышенное содержание ионов хлора присутствовало, например, 28 июля 2019 г. в створе Край леса – 4,5–5,5 мг/л (при $\Sigma = 114–117$ мг/л и $\Sigma = 147–150$ мкСм/см), а также недалеко от бара Каменной Колымы – 6,5–8 мг/л (134 мг/л). В то же время, по словам жителей п. Черский и материалам Ю.А. Долженко [Долженко, 2005], до вывода Колымского гидроузла на проектную мощность во время сильных нагонов и осенне-зимних меженных расходов воды морская вода могла достигать средней части дельты вплоть до п. Петушки (в 30 км ниже базового створа). Этому также могло способствовать периодически проводившееся (до 1996 г.) дноуглубление на устьевом баре Каменной Колымы. То есть основная часть устьевой зоны смешения с ее фронтальной подзоной при расходах воды, измеренных во время экспедиции, располагалась все же на устьевом взморье. О ее местоположении и сезонной динамике можно судить по [Osadchiev et al., 2020]. Обратная ситуация – в протоке Чукочьей (см. рис. 4А). Если выше истока протоки – еще в Походской Колыме – электропроводность составила 150–155 мкСм/см, то в начале, середине и устьевом створе Чукочьей 178 мкСм/см (142 мг/л), 203 (171) и 6130 мкСм/см (3470 мг/л) соответственно. Воды хлоридно-натриевые.

Во время экспедиции – с 27 июля по 13 августа – электропроводность воды на основном посту имела наибольшие значения в конце июля – начале августа (85–105 мкСм/см), к концу первой декады августа она уменьшилась до 50–55 мкСм/см, затем снова начала увеличиваться, тем самым демонстрируя асинфазность с колебаниями уровня.

Скоростное поле потока и продольная трансформация стока воды. Во время экспедиции расходы воды (Q) Колымы в ВД варьировали от 7210 м³/с (10 августа) до 10100 м³/с (16 августа) (см. табл.). Для сравнения, средний многолетний расход воды в створе Колымское-1 – 3340 м³/с, а расчетный сред-

ний на морском крае дельты – примерно 4000 м³/с. В июле 2020 г. диапазон изменений Q составил 6490–9080 м³/с, а 13 августа 2017 г. – $Q = 11360$ м³/с. В итоге, для диапазона расходов воды от 6500 до 11400 м³/с и по 14 измерениям удалось построить кривую расходов, связавшую Q в ВД и уровни на посту Черский ($H_{\text{ч}}$, см над нулем поста)

$$Q = -0,0202H_{\text{ч}}^2 + 30H_{\text{ч}} + 5012. \quad (3)$$

Но «ущербность» этой связи в сильном влиянии на уровни в Черском не только расходов воды, но и сгонно-нагонных явлений [Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Михайлов, 1997]. Осред-

ненные по сечению скорости изменялись в диапазоне от 0,4 до 0,6 м/с. Они хорошо коррелируются с расходами воды. Средние в элементарных вертикальных отсеках скорости достигали максимальных значений на расстоянии 1,3–2,2 км от левого берега, увеличиваясь в 2–3 раза. Максимальные же скорости обнаружены на стрежне потока и у поверхности – 0,61–0,87 м/с. Коэффициент шероховатости равен 0,03. Это позволяет при знании уклонов водной поверхности, определяемых с помощью спутниковой альтиметрии, ширины (по спутниковым снимкам) и глубины потока (по связи с шириной – по материалам промеров 2017, 2019 и 2020 гг.) оперативно оценивать расход воды в устье р. Колымы.

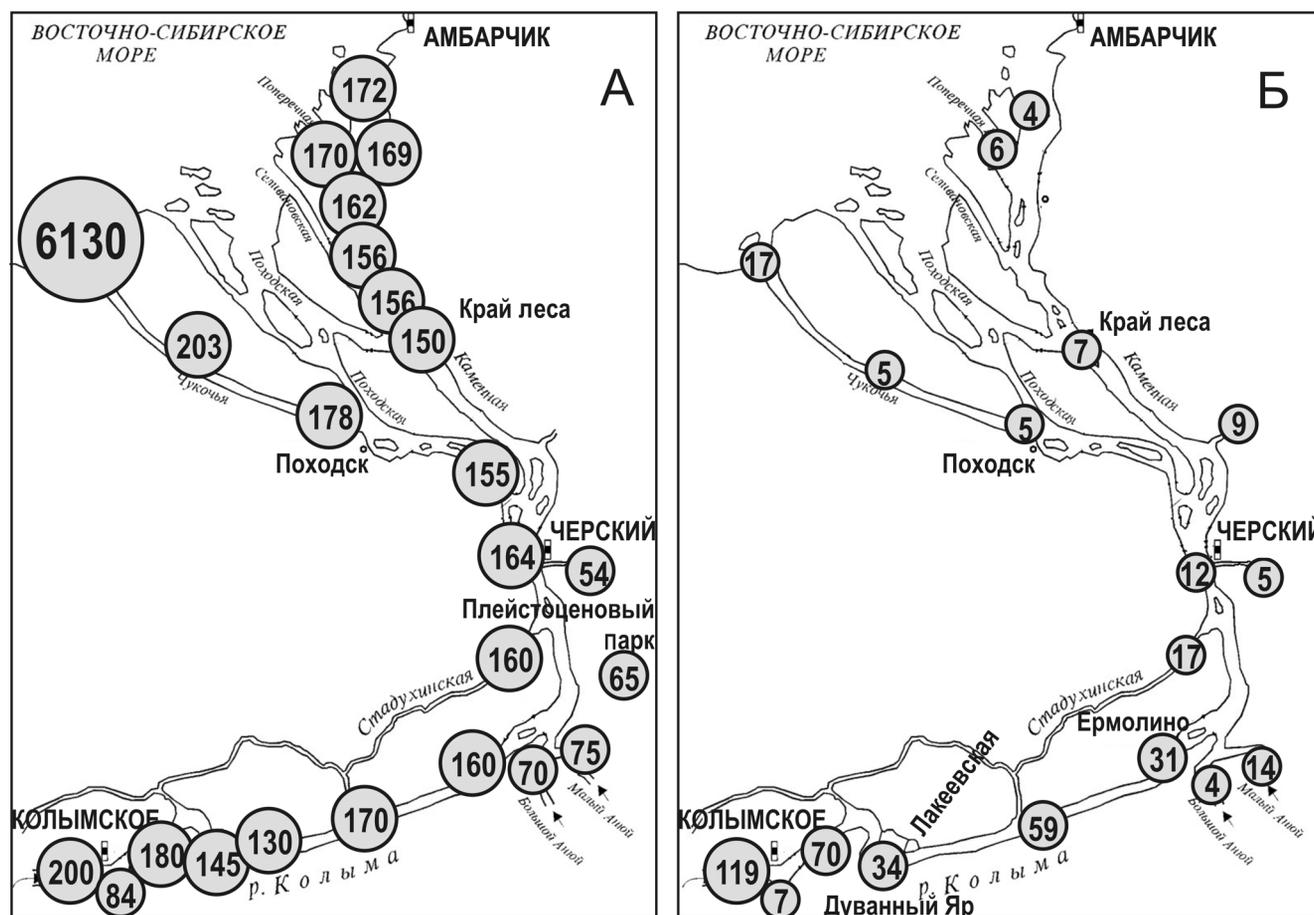


Рис. 4. Схемы пространственной изменчивости электропроводности воды, мкСм/см (А, в основном по данным измерений 28 июля и 1 августа 2019 г.) и мутности воды в стрежневой части створа на глубине 1 м, мг/л (Б) с указанием гидрологических постов, населенных пунктов, Плейстоценового парка и местных названий отдельных участков на берегу

Fig. 4. Schemes of spatial variability of water conductivity, µS/cm (A) (mainly according to measurements on July 28 and August 1, 2019) and water turbidity at a depth of 1 m, mg/l (B); hydrological gages, settlements, the Pleistocene park and native names of different riverbank sites are shown

Выше Черского, вдоль придельтового отрезка русла, расходы в Колыме увеличивались 1–3 августа (с учетом времени добегаания, равным в среднем 2 сут.) на 33% за счет поступления вод Омолона

(18,7%), Анюя (12,3%), Стадухинской протоки (того стока, который поступал в нее выше с. Колымское; приблизительно 1/6 от расхода в ее устье) и Пантелеихи. Остальные малые притоки не рассма-

тривались, так как данных по ним не было. В период 8–10 августа увеличение составило около 28%: Омолон – 16,3%, Анюй – 9,7%. 16 августа 2017 г. доля Омолона составила 23,3% при Q в Колымском 5810 м³/с. Руслевой водный баланс на придельтовом отрезке не соблюдался. Так, в первой серии измерений суммарный боковой приток (ΣQ_i) превысил разницу расходов воды Колымы в створах Колымского Q_k и Черского Q_c (примерно на 10% от разности Q_c и Q_k). Во второй серии измерений, выполнявшихся при меньших расходах воды в реке (см. таблицу), наоборот $\Sigma Q_i < (Q_c - Q_k)$ примерно на те же 10%. То есть пойма, Стадухинская и другие протоки играют мощную регулируемую роль. Кроме того, по длине придельтового отрезка расходы в Колыме уменьшались до устья Анюя, что свидетельствовало о перетоке колымских вод в Стадухинскую протоку и др. Вообще очень важными представляются сведения по расходам воды в нижней части Стадухинской протоки, впадающей в Колыму выше п. Черский. Ранее расходы воды в ней ни разу не измеряли, хотя протока довольно большая, по водности сравнимая с Анюем, и оказывает весомое влияние на гидрологические условия устьевого участка. Средние скорости по длине придельтового отрезка снижались 1–2 августа с 0,8 до 0,5 м/с, а максимальные – с 1,2 до 0,8–0,9 м/с.

Ниже Черского, т. е. уже в дельте, главные процессы – рассредоточение стока Колымы по дельтовым рукавам, уменьшение уклонов и скоростей течения, окончательное распластывание волн половодья и паводков с перекрыванием стоковых колебаний уровня сгонно-нагонными, порой способными генерировать обратные течения. Данные измерений 2019 г. свидетельствуют о следующем распределении стока по рукавам дельты. Самым водоносным является рукав Каменная Колыма. Причем доля его стока выросла как по сравнению с данными середины XX в. и выполненными на их основе расчетами, так и по сравнению с измерениями в 1991 г. То есть этот рукав – активный, а Походская Колыма – постепенно отмирающий. Сейчас при расходе в ВД 7500–7700 м³/с (и меньше) доля стока в Каменной Колыме ниже отделения Мархаяновской протоки >70% (см. таблицу), тогда как в [Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Пискун, 2002] она 57–59%. При увеличении водности реки доля Каменной Колымы закономерно уменьшается, что опять же характеризует его как активный [Михайлов и др., 2018] и наиболее пригодный для судоходства рукав – до 64–65%, тогда как в [Пискун, 2002] доля равна 58,1%. Измерения 1991 г., итоги которых в [Пискун, 2002] подверглись сомнению, не ошибочные, и действительно происходит перераспределение стока в систему Каменной Колымы.

Для остальных рукавов и протоков установлено, что Черноусовская и Мархаяновские протоки снизили свои доли. При расходе в ВД 7620 м³/с (31.07.2019) доли Черноусовской – 13,4% (в [Иванов, Котрехов, 1976] при тех же расходах – 16,2–17,5%), Мархаяновской – 16,5% (ранее 23,5–25,7%). Доля Второй Поперечной оказалась очень большой – 45,9% (28.07.2019), что, вероятно, связано с влиянием ветро-волнового фактора. Получены расходы для ранее не исследованных водотоков – Филипповской (от 4,1 до 4,6% при увеличении расхода в ВД) и Березкиной (1,44%) проток, а также виски – протоки Походской (с истоком ниже с. Походск) – 0,35% (11.08.2017). В сторону моря средние и максимальные скорости потока уменьшались, особенно в неглубоких и узких протоках, таких как Филипповская и Березкина – до 0,2 (средняя) и 0,5 м/с (максимальная). Вблизи от МКД возможны обратные течения, которые были обнаружены в устье Второй Поперечной – в придонном горизонте.

Закономерности изменчивости мутности воды. Мутность в Колыме 28 июля – 3 августа была очень высокой выше впадения Омолона – средняя по сечению 120 мг/л (или 165 NTU). Ниже по течению из-за смешения с менее мутными водами Омолона (6,5 мг/л, или 6–7,5 NTU), Большого Анюя (4,6 мг/л) и Малого Анюя (9,4 мг/л), снижения уклонов водной поверхности и скоростей течения она заметно снижалась – до 16 мг/л в Черском, 6,5 и 4–5,5 мг/л на среднем отрезке (Край леса) и в устье Каменной Колымы (см. рис. 4Б). Вблизи от бара Каменной Колымы были обнаружены высокие значения мутности в придонном слое (55 мг/л) и увеличение доли песчаной фракции с 4–5 до 23% от всего объема пробы. Вероятно, это следствие обнаруженного здесь обратного течения и ветро-волнового взмучивания донных отложений.

Вблизи сильно размываемых берегов наблюдалось значительное, но быстро исчезающее увеличение мутности. Так, в створе Дуванного Яра весовая мутность в прибрежной зоне достигала 170–350 мг/л в сравнении с 70 мг/л на стрежне реки. В 2020 г. получены еще более высокие показатели. В 35 км ниже Дуванного Яра шлейф мутности частично смешивался с колымскими водами, что привело к повышению концентрации взвешенных наносов в поверхностном слое более чем на 20 мг/л. А к створу выше впадения р. Анюй мутность уже составляла 31 мг/л. Тем не менее, авторы предполагают, что именно усилившаяся после 1990-х гг. береговая термоэрозия на Колымской низменности, сложенной многолетнемерзлыми породами и полигонально-жильными льдами, – один из главных факторов современного увеличения мутности воды нижней Колымы, а не поступление наносов со

«светлыми» водами притоков. Похожее обнаружено в низовьях Лены [Магрицкий, 2015].

На всех вертикалях максимальные значения мутности регистрировались в придонном горизонте (см. рис. 3). В механическом составе наносов на долю глин (средний диаметр $<0,001$ мм) приходилось около 6% от массы пробы (в базовом створе), илов (0,001–0,01 мм) – 45%, пыли (0,01–0,1 мм) – 42%, песка (0,1–1 мм) – 4%, гравия (1–10 мм) – 3%. В период прохождения паводка доля илов и пылеватых частиц возрастала до 55% и 49%. Средний диаметр наносов составил 0,067 мм.

В течение экспедиции мутность воды в базовом створе вначале увеличивалась вслед за увеличением расходов и уровней во время паводка. Максимальное увеличение мутности было зафиксировано в придонных слоях у левого берега Колымы (с 6 до 76 мг/л); минимальное – в поверхностных слоях у правого берега (с 12 до 17 мг/л). Потом, во время съемки 10 августа и по окончании паводка, мутность на всех горизонтах у левого берега снизилась на 20–30 мг/л. У правого берега, в зоне влияния вод правобережных притоков, мутность осталась неизменной. Съемка 16 августа проводилась на фоне нового подъема уровня. Следствием стал новый рост мутности воды по всей ширине створа – до 41 мг/л у левого берега и 35 мг/л у правого.

ВЫВОДЫ

В июле – августе 2019 г., впервые с середины XX в., было проведено масштабное гидрологическое обследование устья р. Колымы. Программа работ включала измерения скоростей течения, уклонов и глубин, расходов, мутности, температуры и электропроводности воды, скорости перемещения донных гряд, наземную рекогносцировку и аэрофотосъемку, отбор проб воды и наносов на химический анализ. Гидрологический мониторинг проводился на пяти временных постах. Получены хорошие связи между уровнями и расходами воды, оптической и весовой мутностью, электропроводностью и минерализацией воды и др. Несколько серий измерений расходов позволили выяснить характер вдольруслового нарастания стока воды Колымы, вклад в него главных притоков и Стадухинской протоки, скоростную структуру потока, современное распределение стока в дельте. Последнее уже не соответствует гидравлическим расчетам последней четверти XX в. Доля судоходной Каменной Колымы выросла

почти на 10%. Тогда как Походская Колыма, Черноусовская и Мархаяновские протоки снизили свои доли. На придельтовом отрезке балансовые изменения стока воды регулируются начальным расходом самой реки, боковой приточностью, регулирующей ролью широкой поймы и многочисленных проток, связанных со Стадухинской протокой. Во время экспедиции вклад Омолона и Анюя был 16–19 и 10–12%, сток Стадухинской протоки был сопоставим со стоком Анюя, средние скорости продольно снижались с 0,8 до 0,5 м/с в Черском и Край леса и до 0,4 м/с на устьевом баре, зона обратных течений была обнаружена лишь в устье Каменной Колымы.

В пределах устьевого участка выделены две обширные зоны смешения. Проведено более 240 термокондуктометрических измерений, отобрано 46 проб воды. Первая зона – на придельтовом отрезке русла Колымы – зона смешения вод главной реки и ее правобережных притоков, вторая – в дельте и на устьевом взморье – речных и морских вод. Воды Омолона и Анюя отличаются от колымских существенно меньшей мутностью (5–15 против 120 мг/л), минерализацией (55–70 против 140–160 мг/л) и основным солевым составом воды с более высоким содержанием сульфатов. Воды главных притоков более холодные и их шлейф шириной несколько сотен метров, несмотря на постепенное перемешивание, достигает вершины дельты, тем самым нарушая репрезентативность наблюдений на посту Черский, и распространяется дальше. Влияние небольших притоков на температурный режим Колымы и дельтовых рукавов более сложное, обусловленное их водностью, местными изменениями температуры воздуха и осадками. В дельте содержание солей в речных водах увеличивается в сторону моря, но действительно морские воды обнаружены лишь на концевом участке Чукочьей протоки.

На пространственную изменчивость взвешенных наносов влияют разбавление колымских вод омолон-анюйскими, снижение уклонов и скоростей течения, распределение по рукавам и протокам, поступление большого объема твердого материала с размываемых берегов. На участке Дуванного Яра хорошо видно, что происходит в настоящее время с берегами, сложенными ледовыми комплексами. С помощью седиментационной ловушки, ADCP, турбидиметров и гидрологических зондов получены уникальные данные по распределению взвесей в потоке и их составу.

Благодарности. Исследования выполнены за счет грантов РФФИ Арктика 18-05-60021 и 18-05-60219 (материалы по мутности и минерализации воды, измерения в июле 2020 г.). Отдельная благодарность Сергею Афанасьевичу, Галине Михайловне, Никите и Анастасии Зимовым за прекрасные условия для размещения и успешной работы экспедиционного отряда; С.В. Губину – за предоставленные пробы воды по Чукочьей протоке; Д.И. Школьному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России / отв. ред. В.Н. Коротяев, Г.И. Рычагов, Н.А. Римский-Корсаков. М.: АПР, 2017. 148 с.
- Василевская Л.Н., Стоцкунте Ю.В. Анализ многолетней изменчивости атмосферных осадков и высоты снежного покрова на северо-востоке России за 1966–2014 гг. // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2017. Т. 159. Кн. 4. С. 681–399.
- Василенко А.Н., Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 8–22.
- Веремева А.А. Формирование и современная динамика озерно-термокарстового рельефа тундровой зоны Колымской низменности по данным космической съемки. Пушино, 2017. 133 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. 1008 с.
- Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И.Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
- Гидрохимический атлас СССР. М.: Гидрометеиздат, 1990. 110 с.
- Гиляров Н.П., Иванов В.В. Водный режим дельты реки Колымы по лабораторным исследованиям // Труды ААНИИ. 1967. Т. 278. С. 22–38.
- Долженко Ю.А. Эффективность и экологическая безопасность обеспечения судоходных глубин на устьевых барах арктических рек Якутии. Новосибирск, 2005. 288 с.
- Иванов В.В., Котрехов Е.П. Опыт численного моделирования неустановившегося движения воды в много рукавной дельте реки // Труды ААНИИ. 1976. Т. 314. С. 16–35.
- Магрицкий Д.В. Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев рек Восточной Сибири. М.: МГУ, 2001. 300 с.
- Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 3–16.
- Магрицкий Д.В. Климатически обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. С. 285–294.
- Магрицкий Д.В. Проблемы информационного обеспечения исследований крупномасштабных гидрологических процессов в Российской Арктике // II Всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны». Расширенные тезисы. М., 2020. С. 253–256.
- Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики // Вопросы географии. Серия География полярных регионов. 2016а. Вып. 142. С. 444–466.
- Магрицкий Д.В. Факторы и особенности изменений теплового стока арктических рек России // Труды V Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». М.: РГАУ-МСХА, 2016б. С. 287–294.
- Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 85–95.
- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 412 с.
- Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек: учеб. пособие. М.: Триумф, 2018. 316 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевая область р. Колыма в современных условиях антропогенного воздействия // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 74–88.
- Пискун А.А. Методика расчета водного и руслового режима в сложно разветвленных дельтах рек при отсутствии данных наблюдений за русловыми деформациями. СПб., 2002. 155 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 280 с.
- Руководящий документ РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами Stream Pro и Rio Grande. М., 2012. 80 с.
- Самбуренко И.З. Материалы по гидрологии реки Колымы // Труды ААНИИ. 1938. Т. 105. С. 183–235.
- Стоцкунте Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. 2016. № 2(37). С. 84–96.
- Ушаков М.В. Влияние добычи золота на мутность воды реки Колымы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 9. С. 316–325.
- Davydov S.P. Global warming, permafrost and contemporary biochemical cycles: the Kolyma lowland, northeastern Siberia, *Climate change. Europe, Northern Asia, and North America. 4th European Dialogue in Evian*, 2011, p. 49–58.
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, no. 87(2), p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Nesterova N., Makarieva O., Zemlyanskova A. Hydrometeorological changes in the North-East of Russia, *E3S Web of Conferences. IV Vinogradov Conference*, 2020, vol. 163, p. 1–5, DOI: 10.1051/e3sconf/202016305010.
- Osadchiev A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas, *Remote sensing*, 2020, no. 12, p. 1–25, DOI: 10.3390/rs12050844.
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichin-

sky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, no. 21, p. 136–155, DOI: 10.1002/PPP.683.

РусГидро. URL: <http://www.rushydro.ru/> (дата обращения 01.03.2020).

Расписание погоды / Rp5.ru. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения 01.11.2019).

AllRivers. Уровень воды онлайн. URL: <https://allrivers.info/> (дата обращения 20.11.2020).

Arctic Great Rivers Observatory. ArcticGRO. URL: <https://arcticgreatrivers.org/> (дата обращения 19.03.2020).

Электронные источники

Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Информационно-аналитический Центр Регистра и кадастра. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 20.11.2020).

Поступила в редакцию 04.03.2021

После доработки 16.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

HYDROLOGICAL CONDITIONS AT THE MOUTH OF THE KOLYMA RIVER IN SUMMER 2019

D.V. Magritsky¹, N.L. Frolova², S.A. Agafonova³, V.A. Efimov⁴,
A.N. Vasilenko⁵, A.A. Sazonov⁶, L.E. Efimova⁷

¹⁻⁷ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*

¹ *Docent, Ph.D. in Geography; e-mail: magdima@yandex.ru*

² *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova_nl@mail.ru*

³ *Senior researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: sv_ice@list.ru*

⁴ *Ph.D. student; e-mail: roxifixat@yandex.ru*

⁵ *Ph.D. student; e-mail: saiiia24@mail.ru*

⁶ *Senior instructor; e-mail: sazonov.lexa@mail.ru*

⁷ *Senior researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ef_river@mail.ru*

A poorly-studied Kolyma River mouth section (near-delta section and the delta) was surveyed in summer 2019, first since the 1950-s. The complex hydrological survey included measurements of flow rates, water discharges, water depths, water surface slopes, water turbidity, temperatures, and conductivity. We also obtained remote sensing data using quadcopter, took samples of water and sediments for chemical and other analyses, and collected field data for the satellite data calibration. Five temporary hydrological gauges with loggers were organized to monitor hydrological conditions and the passage of river floods. Some measurements were made for the first time. Several series of runoff measurements at 24 cross-sections made it possible to reveal the along-channel increase of the Kolyma River flow, the contribution of main tributaries and the Stadukhinskaya anastomosing branch, velocities structure of the flow and the actual runoff distribution within the delta. The latter is already different from hydrological calculations of the late 20th century, because the proportion of the Kamennaya Kolyma branch has increased by nearly 10%. Two zones of different water masses mixing were identified within the mouth area. The first zone is within the near-delta section where waters of the Kolyma River and its right tributaries are mixed. The second one is in the delta and on the seashore, where fresh and salt waters are mixed. The water of the Omolon and Anui rivers are less turbid (5–15 vs 120 mg/l) and less mineralized (55–70 vs 140–160 mg/l), and have basic salt composition as compared with the Kolyma River water. Waters of these tributaries are cooler. Despite gradual mixing, they flow along the right bank of the near-delta section of the Kolyma River channel reaching the head of the delta and moving further on. Thus the temperature data of the Cherskiy gauge are not representative. The influence of small inflows on the temperature regime is more complex. Mineralization of river waters increases towards the sea within the delta, but the real sea waters were found only in the lower part of the Chukochia branch. The spatial variability of the suspended sediment runoff is influenced by the dilution of Kolyma River water with waters of Anui and Omolon rivers, decreasing water surface slopes and current velocities downstream, runoff distribution in the delta, and a great amount of sediment material from eroded riverbanks, e.g. near the well-known Duvanny Yar. A new sediment trap, ADCP, turbidimeters and different probes were applied to collect unique data about sediment composition and their distribution within the stream.

Keywords: delta, mineralization, water temperature, sediments, mixing zone, water runoff

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 18-05-60021 and 18-05-60219; materials on water turbidity and mineralization, measurements in July 2020). Our special thanks to Sergei Afanasievich, Galina Mikhailovna, Nikita and Anastasia Zimovs who provided everything for accommodation and successful work of the expedition; to S.V.Gubin for water samples from the Chukuchya Branch; and to D.I. Shkolny.

REFERENCES

- Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice], St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2017, 272 p. (In Russian)
- Atlas: morfodinamika ust'evykh sistem krupnykh rek arkticheskogo poberezh'ya Rossii* [Atlas: morphodynamics in the mouth systems of large rivers of the Arctic coast of Russia], Moscow, APR Publ., 2017, 148 p. (In Russian)
- Davydov S.P. Global warming, permafrost and contemporary biochemical cycles: the Kolyma lowland, northeastern Siberia, *Climate change. Europe, Northern Asia, and North America*, 4th European Dialogue in Evian, 2011, p. 49–58.
- Dolzhenko Yu.A. *Effektivnost' i ekologicheskaya bezopasnost' obespecheniya sudokhodnykh glubin na ust'evykh barakh arkticheskikh rek Yakutii* [Efficiency and environmental safety of ensuring navigable depths at the mouth bars of the Arctic rivers of Yakutia], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Technical Sciences, Novosibirsk, 2005, 288 p. (In Russian)
- Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya* [Geocological state of the Russian Arctic coast and environmental safety], Moscow, GEOS Publ., 2007, 585 p. (In Russian)
- Gidrokhimicheskii atlas SSSR* [Hydrochemical Atlas of the USSR], Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 110 p. (In Russian)
- Gilyarov N.P., Ivanov V.V. Vodnyi rezhim del'ty reki Kolymy po laboratornym issledovaniyam [Water regime of the Kolyma River delta according to laboratory studies], *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*, 1967, vol. 278, p. 22–38. (In Russian)
- Ivanov V.V., Kotrekhov E.P. Opyt chislennogo modelirovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody v mnogorukavnoi del'te reki [Experience in numerical simulation of unsteady water movement in a multi-arm river delta], *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*, 1976, vol. 314, p. 16–35. (In Russian)
- Magritskii D.V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean, *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, p. 1–14.
- Magritsky D.V. [Climatic and anthropogenic changes in water flow of the main rivers of the Russian Federation in their lower reaches and sea mouths], *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii* [Modern trends and prospects of hydrometeorology in Russia] (Irkutsk, 21–23 marta 2018), Irkutsk, IGU Publ., 2018, p. 285–294. (In Russian)
- Magritsky D.V. [Factors and features of changes in the heat flow of Arctic rivers in Russia], *Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii* [Ice and thermal processes at water objects of Russia] (Vladimir, 11–14 oktyabrya), Moscow, RGAU-MSKha Publ., 2016, p. 287–294. (In Russian)
- Magritsky D.V. [Problems of Information support for studies of large-scale hydrological processes in the Russian Arctic], *II Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy. Ekosistemy i klimat Arkticheskoi zony"* [Ecosystems and climate of the Arctic zone] (Moskva, 25–27 noyabrya 2020), Moscow, IGKE, 2020, p. 253–256. (In Russian)
- Magritsky D.V. *Estestvennye i antropogennye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima nizov'ev i ust'ev rek Vostochnoi Sibiri* [Natural and anthropogenic changes in the hydrological regime of the lower reaches and mouths of the rivers of Eastern Siberia], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2001, 300 p. (In Russian)
- Magritsky D.V. Faktory i zakonomernosti mnogoletnikh izmenenii stoka vody, vzveshennykh nanosov i teploty Nizhnei Leny i Vilyuya [Reasons and regularities of long-term changes of runoff of water, suspended sediments and heat on the lower reaches of the Lena and the Vilyuy], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 6, p. 85–95. (In Russian)
- Magritsky D.V. Faktory i zakonomernosti prostranstvennoi i mnogoletnei izmenchivosti postupleniya rechnykh nanosov v morya Rossiiskoi Arktiki [Factors and regularities of territorial and long-term variability of sediment load to the seas of the Russian Arctic], *Voprosy geografii, Ser. Geografiya polyarnykh regionov*, 2016, iss. 142, p. 444–466. (In Russian)
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, no. 87(2), p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [River mouths of Russia and adjacent countries: past, present and future], Moscow, GEOS Publ., 1997, 412 p. (In Russian)
- Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritsky D.V. *Osnovy gidrologii ust'ev rek, uchebnoe posobie* [Fundamentals of estuary hydrology: a textbook], Moscow, Triumph Publ., 2018, 316 p. (In Russian)
- Nesterova N., Makarieva O., Zemlyanskova A. Hydrometeorological changes in the North-East of Russia, *E3S Web of Conferences. IV Vinogradov Conference*, 2020, vol. 163, p. 1–5, DOI: 10.1051/e3sconf/202016305010.
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. The Kolyma River mouth area under present conditions of anthropogenic impact, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2011, no. 8, p. 549–558.
- Osadchiev A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas, *Remote sensing*, 2020, no. 12, p. 1–25, DOI: 10.3390/rs12050844.
- Piskun A.A. *Metodika rascheta vodnogo i ruslovogo rezhima v slozhno razvetvlennykh del'takh rek pri otsutstvii dannykh nablyudenii za ruslovymi deformatsiyami* [Method of calculating water and riverbed regime in complex branched river deltas in the absence of data on observations of riverbed deformations], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, St. Petersburg, 2002, 155 p. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR], vol. 19, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 280 p. (In Russian)
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, no. 21, p. 136–155, DOI: 10.1002/PPP.683.

- Rukovodyashhij dokument RD 52.08.767-2012. Rasход vody na vodotokax. Metodika izmerenij akusticheskimi doplerovskimi profilografami "Stream Pro" i "Rio Grande"* [Guidance document. GD 52.08.767-2012. Water discharges of watercourses. Methods of measurement by acoustic Doppler profilographs "Stream Pro" and "Rio Grande"], Moscow, 2012, 80 p. (In Russian)
- Samburenko I.Z. Materialy po gidrologii reki Kolymy [Materials on the hydrology of the Kolyma River], *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*, 1938, vol. 105, p. 183–235. (In Russian)
- Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. Mnogoletnie izmeneniya temperatury vozdukhа i pochvy na krainem severovostoke Rossii [Long-term changes in air and soil temperature at the Far North-East of Russia], *Geograficheskii vestnik*, 2016, no. 2(37), p. 84–96. (In Russian)
- Ushakov M.V. Vliyanie dobychi zolota na mutnost' vody reki Kolymy [Impact of the extraction of alluvial gold on the Kolyma River turbidity], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2016, no. 9, p. 316–325. (In Russian)
- Vasilenko A.N., Magritsky D.V., Frolova N.L. Zakonomernosti izmenenii srednegodovoi temperatury vody rek Arkticheskoi zony Rossii v svyazi s izmeneniyami klimata [Patterns of changes in average annual water temperature of the rivers in the Arctic zone of Russia under climate changes], *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2020, no. 2, p. 8–22. (In Russian)
- Vasilevskaya L.N., Stochkute Yu.V. Analiz mnogoletnei izmenchivosti atmosferykh osadkov i vysoty snezhnogo pokrova na severovostoke Rossii za 1966–2014 gg. [Analysis of the Long-Term Variations in Precipitation and Snow Depth in the Northeast of Russia in 1966–2014], *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta, Ser. Estestvennye nauki*, 2017, vol. 159, iss. 4, p. 681–399. (In Russian)
- Veremeeva A.A. Formirovanie i sovremennaya dinamika ozerno-termokarstovogo rel'efa tundrovoi zony Kolymskoi nizmennosti po dannym kosmicheskoi s'emki [Formation and modern dynamics of the lake-thermokarst relief within the tundra zone of the Kolyma Lowland according to satellite data], *Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography*, Pushchino, 2017, 133 p. (In Russian)
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation], Moscow, Roshydromet Publ., 2014, 1008 p. (In Russian)
- Web sources*
- AllRivers. Water level online, URL: <https://allrivers.info/> (access date 20.11.2020).
- Arctic Great Rivers Observatory. ArcticGRO, URL: <https://arcticgreatrivers.org/> (access date 19.03.2020).
- Information system on water resources and water management of Russian river basins. Information and Analytical Center of the Register and Cadastre, URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (access date 20.11.2020).
- RusHydro, URL: <http://www.rushydro.ru/> (access date 01.03.2020).
- Weather schedule, Rp5.ru, URL: <https://rp5.ru/> (access date 01.11.2019).

Received 04.03.2021

Revised 16.06.2021

Accepted 20.07.2021

ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПЛАТО ПУТОРАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 4000 ЛЕТ

Е.Ю. Новенко¹, Н.Г. Мазей², Д.А. Куприянов³, О.В. Руденко⁴, В.А. Баталова⁵, Е.Г. Нагорная⁶

^{1–3,6} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения*

¹ *Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, ст. науч. сотр.*

⁴ *Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, институт естественных наук и биотехнологии, кафедра географии, экологии и общей биологии*

⁵ *Геттингенский университет, кафедра палинологии и динамики климата*

¹ *Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: lenanov@mail.ru*

² *Канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: natashamazei@mail.ru*

³ *Вед. инженер; e-mail: dmitriykupriyanov1994@yandex.ru*

⁴ *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: olrudenko2011@yandex.ru*

⁵ *Аспирант; e-mail: vlada1996batalova@mail.ru*

⁶ *Вед. инженер; e-mail: nagornaya@geogr.msu.ru*

В работе представлена детальная реконструкция растительности и условий окружающей среды на западе плато Путорана за последние 4000 лет. Получены новые палеоботанические данные и результаты анализа концентрации макрочастиц угля в кернах донных отложений двух озер, расположенных в лесном и гольцовом поясах гор. Хронологическая привязка результатов исследований основана на детальном радиоуглеродном AMS-датировании, возраст верхних горизонтов донных осадков установлен при помощи анализа изотопов $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$. Согласно полученным данным, природные условия на западе плато Путорана были близки к современным на протяжении прошедших 4000 лет. Однако в период между 3,1 и 2,5 тыс. кал. л. н. (тысяч календарных лет назад) установлено увеличение в нижних поясах плато пространств, занятых лесами и редколесьями из лиственницы, ели и березы, видимо в ответ на потепление климата. Для этого же периода выявлено возрастание числа и интенсивности пожаров в районе исследований. Наступившее затем похолодание привело к постепенной деградации лесной растительности и почти полному исчезновению из состава лесных сообществ ели и расширению площади тундровых группировок. Данные подсчетов макрочастиц угля в донных отложениях отражают низкую пожарную активность после 2,5 тыс. кал. л. н. вплоть до последних 200 лет. Во временном интервале 1,1–0,55 тыс. кал. л. н. поступление макрочастиц угля в озера не зафиксировано. В верхних горизонтах донных отложений озер, накопившихся в течение последних 200 лет, выявлен резкий рост концентрации макрочастиц угля до максимальных значений за весь изученный период, что отражает не имеющее аналогов за последние 4000 лет усиление пожарной активности.

Ключевые слова: растительность, спорово-пыльцевые спектры, пожары, озера, донные отложения

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий исследованию Арктики уделяется повышенное внимание в связи с возрастающим интересом научного сообщества к глобальным климатическим изменениям и наблюдаемому потеплению климата, особо сильно проявляющемуся в высоких широтах [IPCC, 2019]. Один из важнейших инструментов реконструкции природной среды – палеолимнологические исследования [Суббето и др., 2017]. Поскольку озера являются уникальным природным архивом и содержат информацию об изменениях растительности, климата и окружающей среды, их изучению в приполярных областях Северной Евразии посвящено большое количество работ [Палеоклимат..., 2019].

Территория Сибири изучена значительно меньше, чем европейская часть России и арктические

регионы зарубежной Европы и Северной Америки, хотя потребность в детальной палеоэкологической информации велика. Исследования динамики растительности, климата и озерных экосистем приполярных областей в голоцене проводились на Таймыре [Антропоген Таймыра, 1982; Удачин и др., 2013; Большианов и др., 2013; Andreev et al., 2003, 2004a], в дельте р. Лены [Andreev, Klimanov, 2000; Andreev et al., 2004b, Biskaborn et al., 2013, 2016; Herzs Schuh et al., 2013], в Якутии [Пестрякова, 2008; Ушницкая и др., 2014; Pestryakova et al., 2012; Klemm et al., 2013, 2016; Müller et al., 2009; Nazarova et al., 2013] и на северо-востоке Сибири [Lozhkin, Anderson, 2013, 2020; Murton et al., 2017].

Подробная пыльцевая летопись и климатические реконструкции получены А.А. Андреевым с соавторами [Andreev et al., 2004a] по данным изучения

озера Лама на северо-западе плато Путорана. Детально изучены озера южной части полуострова Таймыр [Исследование..., 2006; Сырых и др., 2017]. Озера на севере плато исследовались сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [Палеоклимат..., 2019]. Западная часть плато Путорана до настоящего времени оставалась практически неизученной.

В данной работе представлены результаты, которые посвящены исследованию изменений природной среды в западной части плато Путорана в позднем голоцене. Особое внимание в наших исследованиях уделено реконструкции истории пожаров в регионе по данным изучения макроскопических частиц угля в озерных отложениях. Пожары оказывают большое воздействие на многолетнюю мерзлоту, лесные и тундровые экосистемы, а также существенное влияние на хозяйственную деятельность человека. Исследования палеопожаров в приполярных районах сосредоточены, в основном, на севере Канады, на Аляске [Vachula et al., 2020; Gajewski, 2021] и на севере европейской части России [Barhoumi et al., 2019; Barhoumi et al., 2020]. Этой теме в криолитозоне Сибири посвящено очень мало работ [Heim et al., 2019], а для плато Путорана представленные исследования – это первая подобная работа.

Цель нашей работы – детальная реконструкция динамики растительности и условий окружающей среды на западе плато Путорана за последние 4000 лет по данным изучения озерных отложений, выявление взаимосвязей между климатическими изменениями и пожарными режимами региона.

Район исследований. Горы Путорана – это крупное сильно-расчлененное плато высотой до 900–1200 м над уровнем моря на северо-западе Среднесибирского плоскогорья. Территория сложена палеозойскими толщами осадочных и вулканических пород. Наиболее важной составляющей геологического строения района исследований являются базальты трапповой формации горных пород триасового возраста [Исаченко, 1985]. Своеобразие рельефа территории образует сочетание уплощенных вершин, ступенчатых склонов и глубоко врезанных долин рек и озерных котловин [Янченко и др., 2010].

Плато Путорана лежит севернее Полярного круга в пределах крайней западной части Восточно-Сибирской субарктической климатической области и испытывает воздействие как Сибирского антициклона, так и атлантических воздушных масс. Это положение делает природу плато Путорана (особенно его северо-западной части, где сосредоточены наши исследования) чувствительной к климатическим изменениям. По наблюдениям на метеостанции Дудинка (1970–2012), среднегодовая температура составляет -9°C , средняя температура января и июля -34 и

$+12^{\circ}\text{C}$ соответственно, осадков выпадает 540 мм/год. Территория находится в пределах области сплошного распространения многолетней мерзлоты.

В растительности плато Путорана выделяют четыре высотных пояса: лесной, подгольцовый (субальпийский), гольцовый (альпийский) и пояс холодных каменистых пустынь. Верхняя граница леса на западе плато расположена на высоте 400–600 м. Лесной пояс плато Путорана относится к подзоне северной редкостойной тайги. Преобладающая древесная порода – лиственница даурская *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. В районе исследований широко распространены также смешанные редколесья из *Larix gmelinii*, лиственницы сибирской *L. sibirica* Ledeb., ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. и березы пушистой *Betula pubescens* var. *pumila* (L.) Govaerts [Флора Путорана, 1976]. В низких сырых участках развиты лиственничные редины с березой карликовой *Betula nana* L. и ивой сизой *Salix glauca* L. в кустарниковом ярусе, встречаются небольшие участки со сфагновыми ельниками (*Picea obovata*). В подгольцовом поясе в хорошо дренированных местообитаниях преобладают кустарниковые заросли из ольхи кустарниковой *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus, можжевельника карликового *Juniperus communis* var. *saxatilis* Pall., *Betula nana* L. и горно-тундровые сообщества (кассиопеи четырехгранной *Cassiope tetragona* (L.) D. Don, дриады восьмилепестной *Dryas octopetala* L., водяники почти-голарктической *Empetrum nigrum* subsp. *subholarcticum* (V.N. Vassil.) Kuvaev. Вдоль русел рек развиты ивняки (ива лохматая *Salix lanata* L.). Гольцовый пояс занят тундровой растительностью. На вершинах гор выше 800 м встречаются разреженные растительные группировки из ивы полярной *Salix polaris* Wahlenb., новосиверсии ледяной *Geum glaciale* Adams ex Fisch., незабудки альпийской *Myosotis alpestris* var. *albicans* (Riedl) Y.J. Nasir, минуэртии крупноплодной *Minuartia macrocarpa* (Pursh) Ostenf., *Dryas octopetala* [Янченко, 2008].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реконструкция изменения растительности и частоты лесных пожаров в позднем голоцене основана на результатах исследований кернов донных отложений двух озер, расположенных в разных высотных поясах в западной части плато Путорана. Полевые работы, бурение и отбор образцов в этих озерах были выполнены группой исследователей из Университетского колледжа в Лондоне в 2006 г. в рамках проекта, посвященного изучению экологии сообществ хирономид и созданию калибровочной модели для реконструкции палеоклимата [Self et al., 2015]. Для озерных колонок были получены радиоуглеродные датировки

и для верхних горизонтов проведено определение абсолютного возраста на основе содержания изотопа ^{210}Pb в отложениях. Однако после окончания проекта образцы озерных отложений оказались долгое время не востребованными и в 2019 г. были переданы для изучения на географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Результаты этих исследований представлены в настоящей работе.

Изученные озера расположены в бассейне р. Хантайки (рис. 1). Первое из них – озеро Глухое – имеет площадь 230 га и расположено в широкой заболоченной долине в нижнем поясе гор ($68^{\circ}09'54''$ с. ш., $92^{\circ}10'23''$ в. д., 569 м над уровнем

моря). Второе озеро – это небольшой водоем без названия (в представленной работе мы обозначили его как озеро Безымянное), находится в 5 км к северу от Глухого ($68^{\circ}12'12''$ с. ш., $92^{\circ}10'44''$ в. д.) и занимает котловину размером 6,8 га на высоте 805 м над уровнем моря в гольцовом поясе гор. Озеро Глухое окружено лиственничным редколесьем, в подлеске которого обильны *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* и *Betula nana* [Self et al., 2015]. Растительный покров вокруг озера Безымянного образован преимущественно лишайниками, в наиболее защищенных местообитаниях отмечены куртины ив.

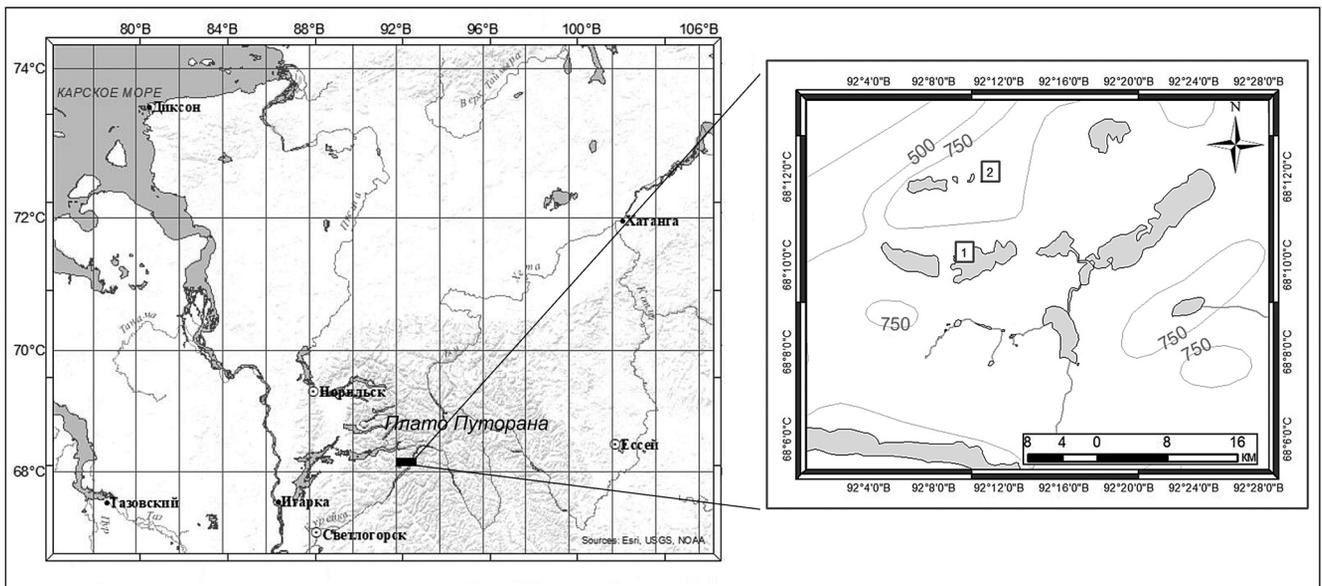


Рис. 1. Географическое положение района исследований. Цифрами обозначены изученные озера: 1 – Глухое; 2 – Безымянное

Fig. 1. Location of the study area. Numbers indicate studied lakes: 1 – the Glukhoe Lake; 2 – the Bezymyannoe Lake

Отбор образцов проводился в летний период 2006 г. в наиболее глубоких точках озер. Колонки донных отложений были отобраны при помощи бура HON-Kajak [Renberg, 1991] диаметром 70 мм. Исследованы приповерхностные донные отложения. В озере Глухом глубина скважины составила 32 см, в озере Безымянном – 34 см. В обоих озерах отложения представлены слабо консолидированной темно-серой гиттией.

Для колонок донных отложений изученных озер в лаборатории радиоуглеродного датирования NERC Radiocarbon Facility and SUERC AMS Laboratory (allocation number 1746.1013) были получены по три AMS-датировки (табл.). Дополнительно один образец из основания колонки донных отложений озера Глухого (глубина 31,75–32,00 см) был проанализирован в лаборатории Beta-Analytical, США [Self et al., 2015]. Датирование верхних 4–8 см осадка в обоих озерах было проведено при

помощи анализа изотопов $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$. Расчеты скорости седиментации в озерах были выполнены на основе возрастной модели отложений (рис. 2) при помощи программы Bacon [Blaauw, Christen, 2011] в программной среде R.

Образцы для спорово-пыльцевого анализа были подготовлены по стандартной методике [Moore et al., 1991]. При анализе помимо пыльцы и спор был проведен подсчет микрочастиц угля (линейные размеры <40 мкм). За 100% принята сумма пыльцы древесных пород (AP) и травянистых растений (NAP). В каждом образце подсчитано более 500 пыльцевых зерен и спор. Интервал отбора образцов для палинологического анализа составлял 3 см.

Реконструкция частоты пожаров проведена на основе анализа содержания макроскопических (размер >125 мкм) частиц угля в озерных отложениях [Conedera et al., 2009]. Методика выделения микрочастиц угля [Mooney, Tinner, 2011] включала

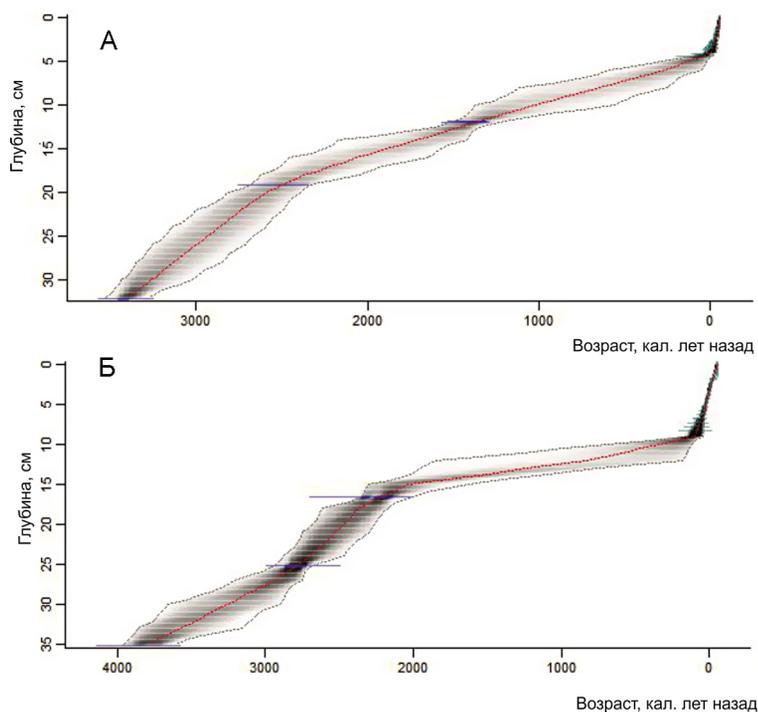


Рис. 2. Возрастные модели для донных отложений:
А – озеро Глухое; Б – озеро Безымянное

Fig. 2. Ade-depth model for bottom sediments in studied lakes:
А – the Glukhoe Lake; Б – the Bezymyannoe Lake

обработку образца объемом 1 см³ 10%-м водным раствором NaOCl в течение не менее 24 часов при комнатной температуре, промывание дистиллированной водой через сито с диаметром ячеек 125 мкм

и затем подсчет всех выделенных частиц угля под стереоскопическим микроскопом при 40-кратном увеличении. Отбор образцов осуществлялся непрерывно с шагом 1 см.

Для выявления регионального сигнала динамики лесных пожаров, определяемых фоновыми скоростями накопления частиц угля в отложениях, а также выявления локальных пожарных эпизодов (пожаров или их серий, происходивших в окрестностях озера [Conedera et al., 2009]) использовался программный пакет CharAnalysis [Higuera et al., 2007]. Программа позволяет производить расчет скорости накопления частиц угля (Charcoal accumulation rate, CHAR-индекс), а также определять фоновые и пороговые значения CHAR для отделения локального и регионального сигналов динамики лесных пожаров. При расчете фоновых и пороговых значений скоростей накопления частиц угля в отложениях, а также для выявления локальных пожарных эпизодов как метод сглаживания с периодом сглаживания 300 лет применялась LOWESS (локально взвешенная линейная регрессия). Период интерполяции данных составлял 25 лет.

Латинские названия растений даны по [The Plant List..., 2013], водорослей по [AlgaeBase, 2020].

Таблица

Результаты радиоуглеродного датирования отложений озер Глухое и Безымянное

Лабораторный номер образца	Глубина отбора образца, см	Радиоуглеродный возраст ¹⁴ C, л. н. (1σ)	Интервал калиброванного возраста 2σ, кал. л. н. (вероятность калибровки)
<i>Озеро Глухое</i>			
SUERC-51090	11,75–12,00	1527±35	1316–1322 (0,012) 1345–1478 (0,859) 1481–1517 (0,129)
SUERC-51091	19,00–19,25	2488±35	377–2380 (0,003) 2426–2724 (0,997)
SUERC-51092	26,25–26,50	2311±35	2157–2244 (0,254) 2300–2366 (0,734) 2392–2405 (0,012)
Beta-312807	31,75–32,00	3210±30	3371–3466 (0,991) 3475–3479 (0,009)
<i>Озеро Безымянное</i>			
SUERC-51098	16,50–16,75	2293±40	2155–2262 (0,464) 2298–2357 (0,536)
SUERC-51099	25,00–25,50	2663±40	2737–2851 (1,000)
SUERC-51100	33,00–33,50	3556±40	3701–3704 (0,072) 3716–3803 (0,296) 3812–3932 (0,631)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным радиоуглеродным датировкам (см. табл.), отложения, вскрытые скважинами в озерах Безымянное и Глухое, начали накапливаться около 3,9 и 3,0 тыс. кал. л. н. соответственно.

Результаты спорово-пыльцевого анализа. Несмотря на положение озер в различных высотных поясах гор, состав и соотношение основных компонентов спорово-пыльцевых спектров на спорово-пыльцевых диаграммах обоих озер обладают высокой степенью сходства (рис. 3, 4).

Доля пыльцы деревьев и кустарников в спектрах изученных озер составляет 70–80% (см. рис. 3, 4). Такое высокое содержание пыльцы древесных растений в отложениях озера Безымянного указывает на ее возможный перенос горно-долинными ветрами из нижних поясов гор в верхние. Согласно определению возраста при помощи анализа изотопов $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$ в керне донных отложений озера Безымянного, его верхние 7 см накапливались в течение последних 140 лет, когда условия были близки к современным. Доля пыльцы деревьев и кустарников в этих отложениях достигает 80%, хотя это озеро находится в гольцовом поясе гор и окружено лишайниками и редкими куртинами высших растений.

В группе пыльцы древесных и кустарниковых растений преобладает пыльца кустарников *Betula nana* и *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (40–60%), в небольшом количестве отмечена пыльца *Juniperus communis* var. *saxatilis* и *Salix*. Участие пыльцы деревьев (*Picea*, *Larix*, *Betula* sect. *Betula*, *Alnus* sp., *Abies* и *Pinus*) не превышает 10–20%. В спектрах из разрезов озера Глухого пыльца лиственницы отмечена в количестве 0,2–1,5%, а в спектрах озера Безымянного ее доля не превышает 1%, что близко к процентным соотношениям пыльцы *Larix* в поверхностных пробах севера Восточной Сибири, отобранных в лиственничных редколесьях и тундрах [Niemeier et al., 2015]. Пыльца лиственницы очень плохо сохраняется в отложениях [Непомелуева, Дурягина, 1990], а пыльца *Larix gmelinii*, преобладающей древесной породы в районе исследований, может полностью разрушаться при фоссилизации (устное сообщение Болиховской Н.С.). Доля пыльцы древесных форм березы и ели составляет 10–20 и 3–5% соответственно, что адекватно отражает их участие в древостоях в нижнем поясе гор. В отложениях обнаружена также пыльца *Alnus* sp., *Abies*, *Pinus* subgen. *Diploxylon* и *P.* subgen. *Haploxylon*. В настоящее время в районе исследований эти древесные породы отсутствуют [Флора Путорана, 1976], но, возможно, они произрастали на западе плато Путорана ранее.

В группе пыльцы трав и кустарничков, доля которой варьирует от 15 до 25%, преобладает пыльца *Cyperaceae*, *Poaceae* и *Thalictrum* (7–10%), в небольшом количестве отмечена пыльца *Artemisia*, *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Rosaceae*, *Fabaceae*, *Onagraceae*, *Ranunculaceae*, *Ericales*. Постоянные компоненты группы спор – *Selaginella selaginoides* (L.) P. Beauv. ex Mart. & Schrank, *Huperzia selago* (L.) Bernh. ex Schrank & Mart. и *Equisetum*, определены также споры *Lycopodium annotinum* L., *L. clavatum* L., *Polypodiaceae* и *Sphagnum*. В спектрах озер Безымянного и Глухого обильны зеленые водоросли, представленные *Pediastrum duplex* Meyen, *P. kawraiskii* Schmidle, *P. boryanum* (Turpin) Meneghini, *P. simplex* Meyen, *Botryococcus braunii* Kützing и *Zygnemataceae*.

Несмотря на общую монотонность спорово-пыльцевых спектров и отсутствие резких изменений в соотношении их основных доминантов, спорово-пыльцевые диаграммы были разделены на зоны на основе кластерного анализа с помощью модуля CONISS в программе TILIA [Grimm, 1987]. В разрезах отложений изученных озер характеристики выделенных зон и их возрастные границы оказались очень близки, поэтому мы приняли общие для обоих озер обозначения и нумерацию пыльцевых зон Put-1-5.

Пыльцевая зона Put-1 представлена только в отложениях озера Безымянного (34–28 см, 3,9–3,1 тыс. кал. л. н.). Спектры этой зоны отличаются высоким содержанием пыльцы гипоарктических кустарников (*Betula nana*, *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*). В большом количестве отмечены водоросли, обильны микрочастицы угля.

Спорово-пыльцевые спектры зоны Put-2 (озеро Безымянное: 28–21 см, озеро Глухое: 20–26 см; 3,1–2,5 тыс. кал. л. н.) характеризуются относительно высокой долей пыльцы деревьев. В группе пыльцы травянистых растений и кустарничков рассматриваемой пыльцевой зоны отмечено увеличение содержания пыльцы *Cyperaceae*. В спектрах из отложений озера Безымянного заметно сократилось количество микрочастиц угля.

Участие пыльцы *Picea* и *Pinus* в спектрах донных осадков озер достигает 5–7%, пыльца древесной березы (*Betula* sect. *Betula* в диаграмме *Betula alba-type*) присутствует в количестве около 10%. Ель произрастает в районе исследований на северо-восточной границе своего ареала и в виде небольшой примеси участвует в лиственничных лесах в нижнем поясе гор [Флора Путорана, 1976]. Мы не располагаем данными по поверхностным спорово-пыльцевым спектрам западной части плато Путорана, поскольку такие исследования не проводились. Но исходя из закономерностей соотношения компонентов спектров в поверхностных пробах севера

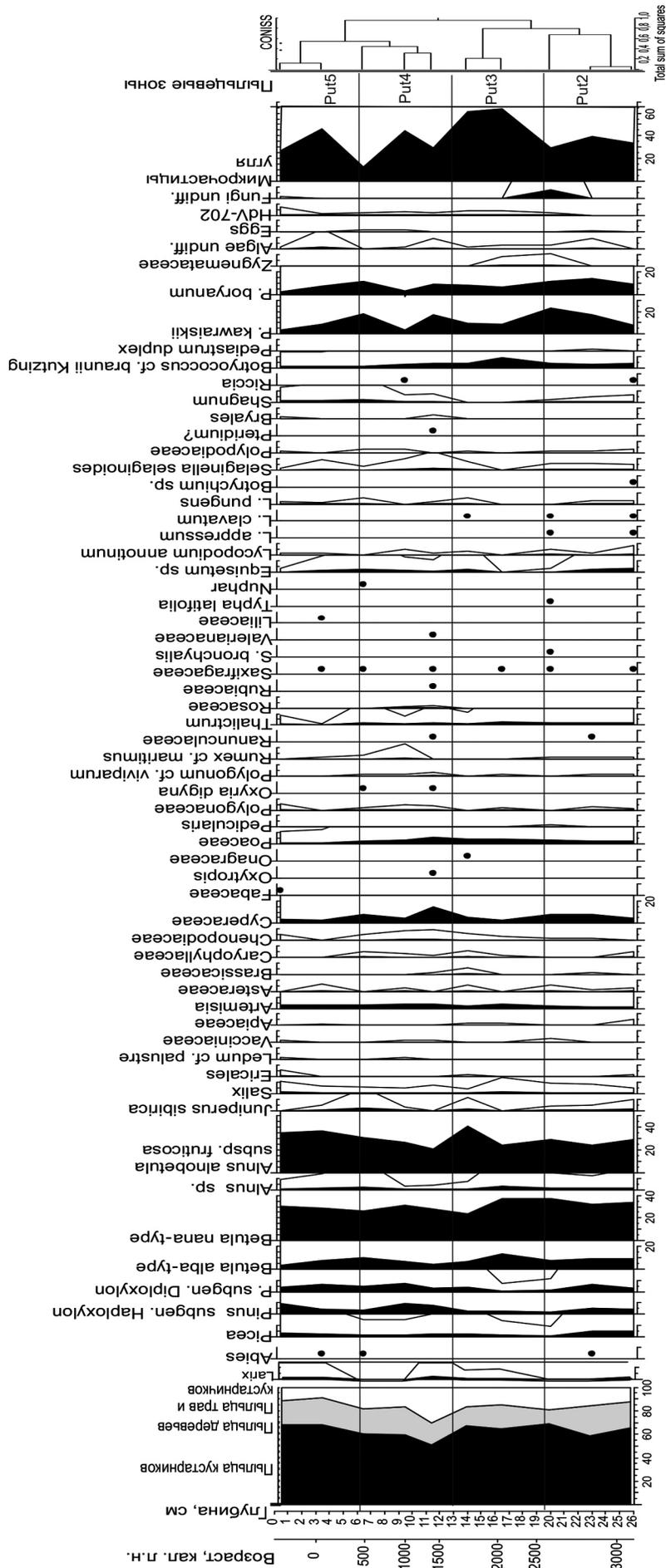


Рис. 3. Спорно-пыльцевая диаграмма разреза отложений озера Глухого
 Fig. 3. Pollen diagram of the sediment core from the Glukhoye Lake

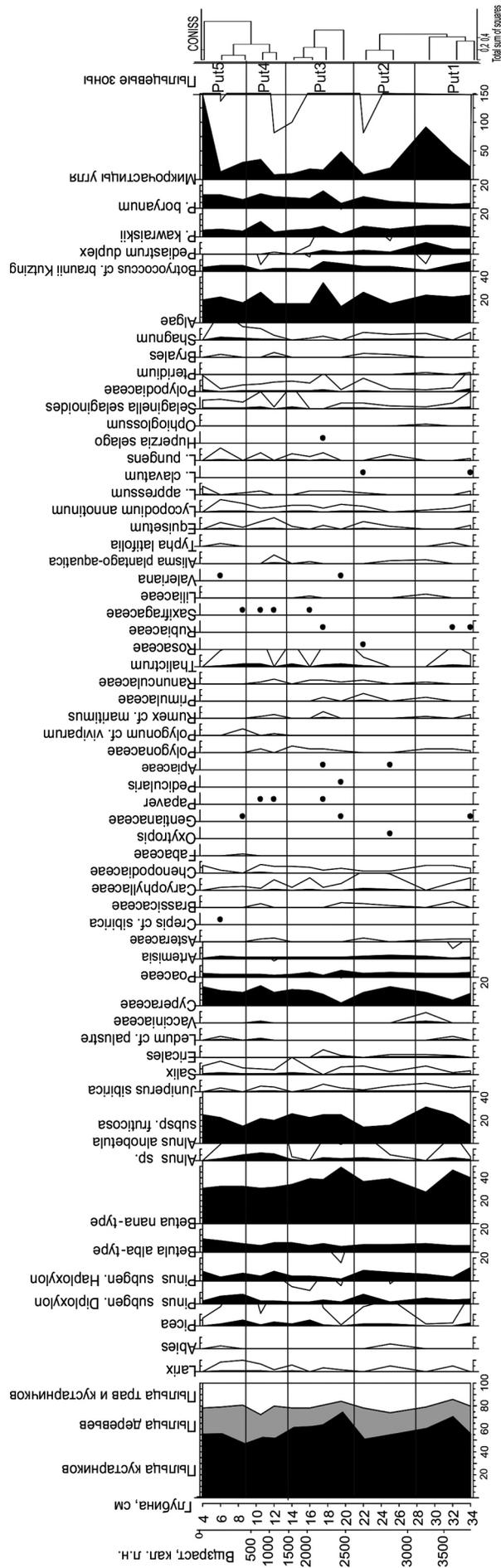


Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма разреза отложений озера Безымянного

Fig. 4. Pollen diagram of the sediment core from the Bezimyannoye Lake

Восточной Сибири [Niemeyer et al., 2015] можно предположить, что увеличение доли пыльцы ели может служить индикатором ее большего участия в локальных растительных сообществах. В спектрах присутствует пыльца *Abies*, *Pinus* subgen. *Diploxylon* и *P.* subgen. *Haploxylon*, сейчас произрастающих в регионах, расположенных к юго-западу от района исследований. Возможно, рост их участия в спорово-пыльцевых спектрах отражает расширение их ареала на северо-запад. Но достоверных свидетельств их существования в окрестностях изученных озер пока нет. Здесь необходимы дальнейшие исследования макроостатков, устьиц хвой.

Пыльцевая зона Put-3 (озеро Безымянное: 21–14 см; озеро Глухое: 20–13 см; 2,5–1,5 тыс. кал. л. н.) характеризуется снижением доли пыльцы деревьев и одновременным увеличением обилия пыльцы кустарников (*Betula nana*, *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*), что, возможно, свидетельствует о частичной деградации лесной растительности и расширении площади тундровых группировок.

Пыльцевая зона Put-4 (озеро Безымянное: 14–9 см; озеро Глухое: 13–7 см; 1,5–0,2 тыс. кал. л. н.). Возраст верхней границы этой зоны, установленный по результатам датирования озерных отложений озера Глухого по короткоживущим изотопам ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb, определен как 1880 г. н. э. с погрешностью около 10 лет. Спорово-пыльцевые спектры отличаются возрастанием доли пыльцы *Pinus* и большим разнообразием пыльцы травянистых растений. В спектрах из озера Глухого возрастает процентное соотношение спор *Selaginella selaginoides*.

Пыльцевая зона Put-5 (озеро Безымянное: 9–0 см; озеро Глухое: 7–0 см; 1880 г. н. э. – настоящее время) характеризует верхние горизонты донных отложений озер. В спектрах этой зоны заметно возрастает содержание пыльцы *Larix*, *Pinus*, *Betula* и *Picea*. Пыльца кустарников формирует отчетливый пик. В керне из озера Глухого доля пыльцы *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* достигает 50 и 30% от AP+NAP соответственно. Первые флористические исследования на западе плато Путорана были проведены Ф. Шмидтом в 1866 г. [Флора Путорана, 1976]. Эти исследования не выявили присутствия видов сосен во флоре района исследований, следовательно, мы можем заключить, что пыльца *Pinus* в этой зоне является заносной. В течение последнего столетия увеличивается концентрация микрочастиц угля. В отложениях озера Безымянного доля частиц угля достигает 150% от суммы пыльцы и спор.

Результаты изучения макроскопических частиц угля в озерных отложениях. Распределение скоростей накопления частиц угля в отложениях озера Глухого (рис. 5) показывает, что скорость аккумуляции частиц угля колеблется в интерва-

ле от 0 до 0,22 частицы/(см²·год). В нижней части толщи отложений, соответствующей датировкам 3,0–2,5 тыс. кал. л. н., фоновая скорость аккумуляции частиц угля варьирует в интервале от 0,02 до 0,05 частицы/(см²·год) с максимальными значениями интерполированных значений около 0,07 частицы/(см²·год). Для данного временного интервала выделены три локальных пожарных эпизода. В период 2,5–0,25 тыс. кал. л. н. фоновая и интерполированная скорости аккумуляции частиц угля колеблются от 0 до 0,25 частицы/(см²·год), при этом для относительно незначительных всплесков скоростей накопления угля до 0,25 частицы/(см²·год) (1,7–1,9; 1,0–1,35 и 0,50–0,25 тыс. кал. л. н.) идентифицировано по одному локальному пожарному эпизоду. Последние 250 лет характеризуются резким ростом скоростей аккумуляции угля до значений 0,22 (фоновая скорость) и 0,31 частицы/(см²·год) (интерполированная скорость), что является максимальным значением для всей колонки озерных отложений. Для данного интервала выделен один локальный пожарный эпизод.

В колонке донных отложений озера Безымянного (рис. 5) распределение фоновых скоростей аккумуляции частиц угля отмечается в диапазоне 0 до 0,09 частицы/(см²·год). В нижней части анализируемой колонки озерных отложений, датированной от 3,9 до 3,0 тыс. кал. л. н., отмечаются фоновые скорости

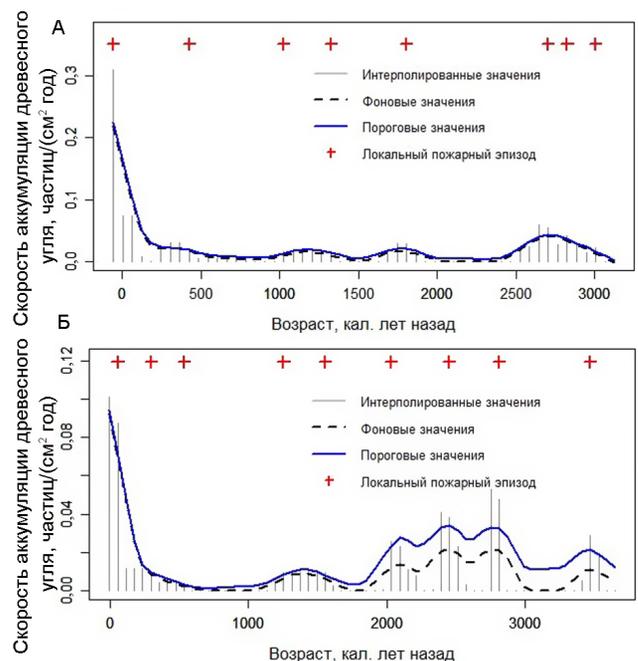


Рис. 5. Скорость накопления макроскопических частиц угля в отложениях: А – озера Глухого; Б – озера Безымянного

Fig. 5. Macroscopic charcoal accumulation rate in sediments of: А – the Glukhoe Lake; Б – the Bezymyannoe Lake

накопления частиц угля в диапазоне 0,01–0,02 частицы/(см²·год), при кратковременном всплеске интерполированных значений скорости аккумуляции угля в интервале 3,4–3,6 тыс. кал. л. н., которому соответствует один локальный пожар. В интервале 3,0–2,0 тыс. кал. л. н. назад скорости аккумуляции частиц угля возрастают и достигают значений 0,04 для фоновых скоростей и 0,05 частицы/(см²·год) для интерполированных. В этом интервале отмечаются три ярко выраженных периода увеличения скоростей накопления около 2,8; 2,4 и 2,05 тыс. кал. л. н., каждому из которых соответствует локальный пожарный эпизод. В период 2,0–1,1 тыс. кал. л. н. скорости аккумуляции частиц угля снижаются до значений 0–0,01 частицы/(см²·год) со слабо выраженным пиком 1,55–1,3 тыс. кал. л. н., которому соответствуют два локальных пожарных эпизода. В интервале 1,1–0,55 тыс. кал. л. н. скорости аккумуляции частиц угля практически равны нулю. Начиная примерно с 550 лет назад, отмечается постепенное увеличение фоновых и интерполированных скоростей аккумуляции частиц угля до 0,01 частицы/(см²·год) с двумя локальными пожарными эпизодами. В последние 170 лет скорости резко возрастают до 0,1 частицы/(см²·год), что также является максимальными значениями для всей анализируемой колонки.

Полученные результаты палинологических исследований по двум разрезам озерных отложений показали, что растительность западной части плато Путорана на протяжении последних 4000 лет была близка к современной, хотя климатические изменения позднего голоцена оказывали влияние на соотношение лесных и тундровых сообществ. Выявленные закономерности хорошо согласуются с реконструкциями растительности и климата, выполненными на основе детальных палинологических данных озера Лама, расположенного на северо-западе плато Путорана примерно в 130 км от района исследований [Andreev et al., 2004a]. Согласно этим данным, охватывающим позднеледниковье и весь голоцен, лесные сообщества в нижнем поясе гор достигали максимального развития в период между 7,2 и 5,2 тыс. кал. л. н., а затем началось постепенное сокращение площадей, занятых лесными ценозами. Большую роль стали играть кустарниковые сообщества и открытые пространства и уже к 2,5 тыс. кал. л. н. растительность приобрела современный облик. Климатические реконструкции также не выявили значительных колебаний температур и осадков, которые могли бы приводить к глубоким перестройкам условий окружающей среды [Andreev et al., 2004a; Self et al., 2015]. Согласно обобщению палеоклиматических данных в циркумполярной Арктике, выполненному по десяткам раз-

резов, в том числе на Таймыре и Восточной Сибири в рамках крупного международного проекта CAPE и сотрудниками ААНИИ, амплитуды колебаний температур в Сибирской арктической провинции были максимальны в раннем голоцене и постепенно сокращались от раннего голоцена к позднему [CAPE..., 2001; Палеоклимат..., 2019].

Несмотря на относительно однообразный состав спорово-пыльцевых спектров изученных озер, детальный анализ полученных данных и изучение концентрации макроскопических частиц угля позволили установить влияние климатических изменений на растительность и пожары в районе исследований. Как показали методические исследования в различных регионах, основная часть макроскопических частиц угля (с линейным размером >125 мкм) осаждается на расстоянии от нескольких сотен метров до 20 км в зависимости от типа, площади и интенсивности пожара [Higuera et al., 2007; Conedera et al., 2009]. И таким образом, полученные нами данные позволяют описать пожары, происходившие на территории, прилегающей к изученным озерам.

В период между 3,1 и 2,5 тыс. кал. л. н. изменение спорово-пыльцевых спектров и соотношение основных пыльцевых таксонов в озерных отложениях (зона Put-2), очевидно, отражают потепление климата и увеличение территории, занятой лесами и редколесьями в лесном и подгольцовом поясах плато. Результаты изучения макроскопических частиц угля показали увеличение их концентрации во временном интервале 3,0–2,5 тыс. кал. л. н. в озере Глухом и в интервале 3,0–2,0 тыс. кал. л. н. в озере Безымянном. Возрастание летних температур, вероятно, послужило причиной увеличения частоты возникновения пожароопасных погодных условий, что могло привести к усилению пожарной активности.

Похолодание климата около 2,5 тыс. кал. л. н., отчетливо прослеженное в реконструкции палеотемператур по данным анализа сообществ хирономид из изучаемых озер [Self et al., 2015], привело к частичной деградации лесной растительности и увеличению площади тундровых группировок (пыльцевая зона Put-3). Количество пожаров и концентрация макроскопических частиц угля в озерах понизились. Похолодание в этот период прослеживается и по палинологическим данным озер Таймыра [Палеоклимат..., 2019]. Реконструкции летних температур на основе древесно-кольцевых хронологий [Hantemirov, Shiyatov, 2002] и исследования патологических нарушений древесины лиственницы сибирской на Ямале [Хантемиров и др., 2011] также указывают на существенное похолодание в Арктике 2,7–2,5 тыс. кал. л. н.

В течение довольно длительного периода, начиная с 2,5 тыс. кал. л. н. и до последних 150 лет растительный покров развивался в направлении постепенного сокращения участия лесных сообществ в растительном покрове и усиления роли гипоарктических кустарников (*Betula nana*, *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa*, *Salix*), тундровых кустарничков и трав. Показательно возрастание в спектрах из озера Глухого количества спор гипоарктомонтанного вида *Selaginella selaginoides*, что в сочетании с другими характеристиками спорово-пыльцевых спектров отражает увеличение безлесных сообществ (лугов, зарослей кустарников). По данным изучения озера Лама, похолодание климата Малого ледникового периода определено временным интервалом 520–90 лет назад [Палеоклимат..., 2019]. Полученные нами данные изучения озерных отложений не выявили существенных колебаний окружающей среды в течение последнего тысячелетия. Результаты спорово-пыльцевого анализа и подсчетов макрочастиц угля в целом отражают прохладные климатические условия и небольшое количество пожаров. В некоторые временные интервалы (например, 1,1–0,55 тыс. кал. л. н.) поступление макрочастиц угля в озерные отложения вообще не происходило. Согласно результатам дендрохронологических исследований и реконструкциям пожарных режимов по пожарным подсушинам на стволах деревьев, Малый ледниковый период характеризовался существенным сокращением числа пожаров в лиственных лесах криолитозоны Средней Сибири [Kharuk et al., 2011].

Концентрация макрочастиц угля в верхних горизонтах донных отложений озер Глухого и Безымянного, накопившихся в течение последних 200 лет, возросла до максимальных значений за весь поздний голоцен. В спорово-пыльцевых спектрах

из озера Безымянного зафиксирован также наиболее высокий пик содержания микрочастиц угля по сравнению с остальным временем накопления отложений изученного разреза, что отражает поступление угольных частиц не только на локальном, но на региональном уровне. Эти данные указывают на увеличение частоты и площадей пожаров в регионе на современном этапе. Однако причины и масштабы возрастания пожарной активности требуют дальнейших детальных исследований.

ВЫВОДЫ

На основе полученных палинологических данных и изучения вариаций концентрации макроскопических частиц угля в донных отложениях двух озер в западной части плато Путорана были сделаны следующие выводы.

Природные условия на западе плато Путорана были близки к современным на протяжении последних 4000 лет. Однако, в период между 3,1 и 2,5 тыс. кал. л. н. установлено увеличение доли лесной растительности в нижнем поясе гор и возрастание числа и интенсивности пожаров, что является откликом экосистемы на потепление климата. Наступившее затем направленное похолодание климата обусловило постепенную деградацию лесной растительности и расширение площади тундровых группировок, а также снижение пожарной активности вплоть до последних 200 лет. Заметные изменения природной среды отмечены в течение последнего столетия.

Концентрация макрочастиц угля в верхних горизонтах донных отложений озер, накопившихся в течение последних 200 лет, характеризуется максимальными значениями за весь изученный период, что отражает не имеющее аналогов за последние 4000 лет усиление пожарной активности.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке проекта РНФ № 20-17-00043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропоген Таймыра. М.: Наука, 1982. 184 с.
- Большаянов Д.Ю., Савельева Л.А., Пестрякова Л.А., Вахрамеева П.С., Баранская А.В. Методика извлечения палеогеографической информации из донных отложений арктического озера Севастьян-Кюеле // Известия Русского географического общества. 2013. Т. 145. № 2. С. 49–65.
- Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1985. 320 с.
- Исследование природы Таймыра. Вып. 5. Четвертичная история, климат, почвы, флора и растительность, животный мир / под ред. Зиганшина Р.А., Поспеловой Е.Б. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2006. 190 с.
- Непомидуева Н.И., Дурягина Д.А. К истории лиственных лесов среднего Тимана в голоцене (Коми АССР) // Ботанический журнал. 1990. № 3. С. 326–335.
- Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене / под ред. Большаянова Д.Ю., Веркулича С.Р. СПб.: ААНИИ, 2019. 204 с.
- Пестрякова Л.А. Диатомовые комплексы озер Якутии. Якутск: ГОУ ВПО «Якутский гос. ун-т им. М. К. Аммосова», 2008. 178 с.

- Субетто Д.А., Назарова Л.Б., Пестрякова Л.А., Сырых Л.С., Андроников А.В., Бискаборн Б., Дикманн Б., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Греков И.М. Палеолимнологические исследования в российской части Северной Евразии: обзор // Сибирский экологический журнал. 2017. Т. 24. № 4. С. 369–380.
- Сырых Л.С., Назарова Л.Б., Херциу У., Субетто Д.А., Греков И.М. Реконструкция палеоэкологических и палеоклиматических условий голоцена на юге Таймыра по результатам анализа озерных донных отложений // Сибирский экологический журнал. 2017. № 4. С. 417–426.
- Удачин В.Н., Большианов Д.Ю., Вотяков С.Л., Киселева Д.В., Хворов П.В., Аминов П.Г., Иванов Ю.К. Первые данные о геохимии микроэлементов в донных отложениях арктического озера Кентэтурку (полуостров Таймыр) // Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого. 2013. № 160. С. 356–359.
- Ушницкая Л.А., Пестрякова Л.А., Субетто Д.А., Троева Е.И. Морфометрическая характеристика озер Лено-Амгинского междуречья // Наука и Образование. 2014. № 4(76). С. 71–76.
- Флора Путорана: материалы к познанию особенностей состава и генезиса горных субаркт. флор Сибири / под ред. Малышева Л.И. Новосибирск: Наука, 1976. 245 с.
- Хантемиров Р.М., Горланова Л.А., Сурков А.Ю., Шиятов С.Г. Экстремальные климатические события на Ямале за последние 4100 лет по дендрохронологическим данным // Известия РАН. Сер. географическая. 2011. № 2. С. 89–102.
- Янченко З.А. Анализ локальной флоры окрестностей оз. Лама (Северо-Запад плато Путорана) // Вестник КрасГАУ. 2008. № 6. С. 97–102.
- Янченко З.А., Романов А.А., Герасименко В.Я. Геодинамические процессы, морфология, ландшафт и особенности высотной поясности гор Путорана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 6. С. 355–365.
- Andreev A.A., Klimanov V.A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia, *Journal of Paleolimnology*, 2000, vol. 24, p. 81–91.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A., Melles M., Lisitsyna O.M., Hubberten H.-W. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene, *Quaternary International*, 2004a, vol. 122, p. 69–84, DOI: 10.1016/j.quaint.2004.01.032.
- Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Klimanov V., Rachold V., Hubberten H.W. Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2004b, vol. 209, p. 197–217.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Siegert C., Ebel T., Klimanov V.A., Melles M., Bobrov A.A., Dereviagin A. Yu., Lubinski D.J., Hubberten H.-W. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, Arctic Russia, *Boreas*, 2003, vol. 32, p. 484–505, DOI: 10.1080/03009480310003388.
- Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M.P., Brossier B., Paradis L., Pastor T., Alleaume S., Ali A.A. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia), *The Holocene*, 2019, vol. 29(12), p. 1906–1920, DOI: 10.1177/0959683619865593.
- Barhoumi C., Ali A.A., Peyron O., Dugerdil L., Borisova O., Golubeva Yu., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Ryzhkova N., Joannin S. Did long-term fire control the coniferous boreal forest composition of the northern Ural region (Komi Republic, Russia)? *J. Biogeogr.*, 2020, vol. 47, p. 2426–2441, DOI: 10.1111/jbi.13922.
- Biskaborn B.K., Herzschuh U., Zibulski R., Diekmann B., Bolshiyarov D., Savelieva L. Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology*, 2013, vol. 49(2), p. 155–170.
- Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A., Vakhrameeva P.S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinecke L., Pestryakova L.A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 406–421, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6(3), p. 457–474.
- CAPE project members Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change, *Quaternary Sci. Rev.*, 2001, vol. 20, p. 1275–1287.
- Conedera M., Tinner W., Neff C., Meurer M., Dickens A.F., Krebs P. Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation, *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, no. 5–6, p. 555–576.
- Gajewski K. Climate, fire and vegetation history at treeline east of Hudson Bay, northern Quebec, *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 254, 106794, DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.106794.
- Grimm E. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares, *Computers, Geosciences*, 1987, vol. 13, p. 13–35, DOI: 10.1016/0098-3004(87)90022-7.
- Hantemirov R., Shiyatov S.G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia, *The Holocene*, 2002, vol. 12(6), p. 717–727.
- Heim R.J., Bucharova A., Brodt L., Kamp J., Rieker D., Soromotin A.V., Yurtaev A., Hölzel N. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years, *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 760, 143425, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425.
- Herzschuh U., Pestryakova L.A., Savelieva L.A., Heinecke L., Böhmer T., Biskaborn B.K., Andreev A., Ramisch A., Shinneman A.L.C., Birks H.J.B. Siberian larch forests and the iron content of thaw lakes form a geochemically functional entity, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, p. 2408, DOI: 10.1038/ncomms3408.
- Higuera P.E., Peters M.E., Brubaker L.B., Gavin D.G. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model, *Quaternary Science Reviews*, 2007, vol. 26, no. 13–14, p. 1790–1809.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L., Im S.T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities, *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, p. 045208, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045208.
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L.A. Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the bo-

- real treeline in north-central Siberia, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 422–434, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.015.
- Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 386, p. 702–713, DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.033.
- Lozhkin A., Anderson P. Late quaternary lake records from the Anadyr lowland, Central Chukotka (Russia), *Quaternary Science Reviews*, 2013, vol. 68, p. 1–16.
- Lozhkin A.V., Anderson P.M. Features of the formation of lakes in the cryogenic regions of the upper Kolyma, Northeast Siberia, *The Bulletin of the North-East Scientific Center*, 2020, vol. 5, p. 13–23.
- Müller S., Tarasov P.E., Andreev A.A., Diekmann B. Late Glacial to Holocene environments in the present-day coldest region of the Northern Hemisphere inferred from a pollen record of Lake Billyakh, Verkhoynsk Mts, NE Siberia, *Climate of the Past Discussions*, 2009, vol. 5, p. 73–84.
- Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, p. 1–18.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen Analysis. Blackwell, Oxford, 1991. 216 p.
- Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Korzun J.A., Tsygankova V.I., Anderson P.M., Savvinov G.N., Danilov P.P., Boeskorov V., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Lupachev A.V., Zanina O.G., Tikhonov A., Vasilieva G.V. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana uplands, Northeast Siberia, *Quaternary Research*, 2017, vol. 87, no. 2, p. 314–330.
- Nazarova L., Lüpfert H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. Holocene climate conditions in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje, *Quaternary International*, 2013, vol. 290–291, p. 264–274, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.11.006.
- Niemeyer B., Klemm J., Pestryakova L.A., Herzschuh U. Relative pollen productivity estimates for common taxa of the northern Siberian Arctic, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, vol. 221, p. 71–82, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2015.06.008.
- Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Presentday variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records, *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 51, p. 56–70.
- Renberg I. The HON-Kajak sediment corer, *Journal of Paleolimnology*, 1991, vol. 6, p. 167–170.
- Self A.E., Jones V.J., Brooks S.J. Late Holocene environmental change in arctic western Siberia, *The Holocene*, 2015, vol. 25, p. 150–165, DOI: 10.1177/0959683614556387.
- Vachula R.S., Sae-Lim J., Russell J.M. Sedimentary charcoal proxy records of fire in Alaskan tundra ecosystems, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 541, 109564, DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.109564.
- Электронные ресурсы
 IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/cite-report/> (дата обращения 28.02.2021).
 The Plant List. Version 1.1, 2013, URL: <http://www.theplantlist.org/> (дата обращения 03.03.2021).
 AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, 2020, URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения 03.03.2021).

Поступила в редакцию 21.03.2021

После доработки 03.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE WESTERN PART OF THE PUTORANA PLATEAU OVER THE PAST 4,000 YEARS

E.Yu. Novenko¹, N.G. Mazei², D.A. Kupriyanov³, O.V. Rudenko⁴, V.A. Batalova⁵, E.G Nagornaya⁶

^{1-3, 6} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Department of Quaternary Research, Senior Scientific Researcher

⁴ Orel State University named after I. S. Turgenyev, Institute of Earth Sciences and Bioengineering,
 Department of Geography, Ecology and General Biology

⁵ Georg-August-University Göttingen, Department of Palynology and Climate Dynamics

¹ Leading Scientific Researcher; D.Sc. in Geography; e-mail: lenenov@mail.ru

² Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Biology; e-mail: natashamazei@mail.ru

³ Leading Engineer; e-mail: dmitriykupriyanov1994@yandex.ru

⁴ Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: olrudenko2011@yandex.ru

⁵ Ph.D. Student; e-mail: vlada1996batalova@mail.ru

⁶ Leading Engineer; e-mail: nagornaya@geogr.msu.ru

The paper presents a detailed reconstruction of vegetation and environmental conditions in the western part of the Putorana Plateau over the past 4,000 years. New paleobotanical data were obtained, as well as the results of the analysis of macroscopic charcoal particles in two cores of bottom sediments from the lakes located in forest and tundra belts of the plateau. Cores chronology is based on detailed AMS radiocarbon dating, and the uppermost layers of cores are dated by $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$ analysis. According to the data obtained, vegetation pattern in the study area was close to modern one over the past four millennia. However, between 3.1 and 2.5 ka BP (thousands of calendar years ago) an increase of the area of larch, spruce and birch forests and woodlands was recorded in the lower belts of the plateau, apparently in response to the climate warming.

During the same period the number and intensity of fires in the study area also increased. The subsequent cooling led to the gradual degradation of woodlands, almost complete disappearance of spruce from the forest communities, and the expansion of tundra communities. Macroscopic charcoal data for the bottom sediments indicate rather low fire activity since 2.5 ka BP up until recent 200 years. No input of macroscopic charcoal particles to the lakes was recorded for the time interval of 1.1–0.55 ka BP. A sharp increase of concentration of macroscopic charcoal particles in the upper horizons of bottom sediments that have accumulated over the recent 200 years up to the maximum values for the entire studied period reflects a growing fire activity that has no analogues over the past four thousand years.

Keywords: vegetation, spore-pollen spectra, fires, lakes, bottom sediments

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-17-00043).

REFERENCES

- Andreev A., Tarasov P., Schwamborn G., Ilyashuk B., Ilyashuk E., Bobrov A., Klimanov V., Rachold V., Hubberten H.W. Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2004b, vol. 209, p. 197–217.
- Andreev A.A., Klimanov V.A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia, *Journal of Paleolimnology*, 2000, vol. 24, p. 81–91.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A., Melles M., Lisitsyna O.M., Hubberten H.-W. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene, *Quaternary International*, 2004a, vol. 122, p. 69–84, DOI: 10.1016/j.quaint.2004.01.032.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Siegert C., Ebel T., Klimanov V.A., Melles M., Bobrov A.A., Dereviagin A.Yu., Lubinski D.J., Hubberten H.-W. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, Arctic Russia, *Boreas*, 2003, vol. 32, p. 484–505, DOI: 10.1080/03009480310003388.
- Antropogen Tajmyra* [Anthropogen of the Taymyr Peninsula]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 184 p. (In Russian)
- Barhoumi C., Ali A.A., Peyron O., Dugerdil L., Borisova O., Golubeva Yu., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Ryzhkova N., Joannin S. Did long-term fire control the coniferous boreal forest composition of the northern Ural region (Komi Republic, Russia)? *J. Biogeogr.*, 2020, vol. 47, p. 2426–2441, DOI: 10.1111/jbi.13922.
- Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M.P., Brossier B., Paradis L., Pastor T., Alleaume S., Ali A.A. Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia), *The Holocene*, 2019, vol. 29(12), p. 1906–1920, DOI: 10.1177/0959683619865593.
- Biskaborn B.K., Herzschuh U., Zibulski R., Diekmann B., Bolshiyarov D., Savelieva L. Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology*, 2013, vol. 49(2), p. 155–170.
- Biskaborn B.K., Subetto D.A., Savelieva L.A., Vakhrameeva P.S., Hansche A., Herzschuh U., Klemm J., Heinicke L., Pestryakova L.A., Meyer H., Kuhn G., Diekmann B. Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north-eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 406–421, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.014.
- Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process, *Bayesian Analysis*, 2011, vol. 6(3), p. 457–474.
- Bol'shiyarov D. Yu., Savel'eva L.A., Pestryakova L.A., Vakhrameeva P.S., Baranskaya A.V. Metodika izvlecheniya paleogeograficheskoy informacii iz donnyh otlozhenij arkticheskogo ozera Sevast'yan-Kyuele [Methods of extracting paleogeographic information from the bottom sediments of the arctic Sevastian-Kuele Lake], *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2013, no. 145(2), p. 49–65. (In Russian)
- CAPE project members Holocene paleoclimate data from the Arctic: testing models of global climate change, *Quaternary Sci. Rev.*, 2001, vol. 20, p. 1275–1287.
- Conedera M., Tinner W., Neff C., Meurer M., Dickens A.F., Krebs P. Reconstructing past fire regimes: Methods, applications, and relevance to fire management and conservation, *Quaternary Science Reviews*, 2009, vol. 28, no. 5–6, p. 555–576.
- Flora Putorana: materialy k poznaniyu osobennostej sostava i genezisa gornyh subarkt. flor Sibiri* [Flora of the Putorana Plateau: materials for understanding the composition and genesis of mountain subarctic floras of Siberia], Malysheva L.I. (ed.), Novosibirsk, Nauka Publ., 1976, 245 p. (In Russian)
- Gajewski K. Climate, fire and vegetation history at treeline east of Hudson Bay, northern Quebec, *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 254, 106794, DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.106794.
- Grimm E. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares, *Computers, Geosciences*, 1987,

- vol. 13, p. 13–35, DOI: 10.1016/0098-3004(87)90022-7.
- Hantemirov R., Shiyatov S.G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia, *The Holocene*, 2002, vol. 12(6), p. 717–727.
- Hantemirov R.M., Gorlanova L.A., Surkov A.Yu., Shiyatov S.G. Ekstremal'nye klimaticheskie sobytiya na Yamale za poslednie 4100 let po dendrochronologicheskim dannym [Extreme climatic events in the Yamal Peninsula over the last 4100 years according to dendrochronological data], *Izvestiya RAN. Ser. geograficheskaya*, 2011, no. 2, p. 89–102. (In Russian)
- Heim R.J., Bucharova A., Brodt L., Kamp J., Rieker D., Soromotin A.V., Yurtaev A., Hölzel N. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years, *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 760, 143425, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143425.
- Herzschuh U., Pestryakova L.A., Savelieva L.A., Heinecke L., Böhmer T., Biskaborn B.K., Andreev A., Ramisch A., Shinneman A.L.C., Birks H.J.B. Siberian larch forests and the ion content of thaw lakes form a geochemically functional entity, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, p. 2408, DOI: 10.1038/ncomms3408.
- Higuera P.E., Peters M.E., Brubaker L.B., Gavin D.G. Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model, *Quaternary Science Reviews*, 2007, vol. 26, no. 13–14, p. 1790–1809.
- Isachenko A.G. *Landshafty SSSR [Landscapes of the USSR]*, Leningrad, Leningrad University Press, 1985, 320 p. (In Russian)
- Issledovanie prirody Tajmyra. Vypusk 5. Chetvertichnaya istoriya, klimat, pochvy, flora i rastitel'nost', zhivotnyj mir [Study of the nature of Taimyr. Issue 5. Quaternary history, climate, soils, flora and vegetation, wildlife]*, R.A. Ziganshina, E.B. Pospelovoj (eds.), Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest SB RAN, 2006, 190 p. (In Russian)
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L., Im S.T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities, *Environmental Research Letters*, 2011, vol. 6, p. 045208, DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045208.
- Klemm J., Herzschuh U., Pestryakova L.A. Vegetation, climate and lake changes over the last 7000 years at the boreal treeline in north-central Siberia, *Quaternary Science Reviews*, 2016, vol. 147, p. 422–434, DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.015.
- Klemm J., Herzschuh U., Pisaric M.F.J., Telford R.J., Heim B., Pestryakova L.A. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record, *Palaeoecography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, vol. 386, p. 702–713, DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.033.
- Lozhkin A., Anderson P. Late quaternary lake records from the Anadyr lowland, Central Chukotka (Russia), *Quaternary Science Reviews*, 2013, vol. 68, p. 1–16.
- Lozhkin A.V., Anderson P.M. Features of the formation of lakes in the cryogenic regions of the upper Kolyma, Northeast Siberia, *The Bulletin of the North-East Scientific Center*, 2020, vol. 5, p. 13–23.
- Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, p. 1–18.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. *Pollen Analysis*. Blackwell, Oxford, 1991, 216 p.
- Müller S., Tarasov P.E., Andreev A.A., Diekmann B. Late Glacial to Holocene environments in the present-day coldest region of the Northern Hemisphere inferred from a pollen record of Lake Billyakh, Verkhoyansk Mts, NE Siberia, *Climate of the Past Discussions*, 2009, vol. 5, p. 73–84.
- Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Korzun J.A., Tsygankova V.I., Anderson P.M., Savvinov G.N., Danilov P.P., Boeskorov V., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Lupachev A.V., Zanina O.G., Tikhonov A., Vasilieva G.V. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana uplands, Northeast Siberia, *Quaternary Research*, 2017, vol. 87, no. 2, p. 314–330.
- Nazarova L., Lüpfer H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. Holocene climate conditions in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje, *Quaternary International*, 2013, vol. 290–291, p. 264–274, DOI: 10.1016/j.quaint.2012.11.006.
- Nepomilueva N.I., Duryagina D.A. K istorii listvennichnikov srednego Timana v golocene (Komi ASSR) [On the Holocene history of larch forests in the Middle Timan (Komi ASSR)], *Botanicheskij zhurnal*, 1990, no. 3, p. 326–335. (In Russian)
- Niemeyer B., Klemm J., Pestryakova L.A., Herzschuh U. Relative pollen productivity estimates for common taxa of the northern Siberian Arctic, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, vol. 221, p. 71–82, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2015.06.008.
- Paleoklimat polyarnyh oblastej Zemli v golocene [The Holocene paleoclimate of the Earth's polar regions]*, D.Yu. Bol'shiyanova, S.R. Verkulicha (eds.), St. Petersburg, AANII, 2019, 204 p. (In Russian)
- Pestryakova L.A. *Diatomovye komplekсы ozer Yakutii [Diatom complexes of lakes in Yakutia]*, Yakutsk, Yakutsk State University by M.K. Ammosova Publ., 2008, 178 p. (In Russian)
- Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Presentday variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in Central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records. *Quaternary Science Reviews*, 2012, vol. 51, p. 56–70.
- Renberg I. The HON-Kajak sediment corer, *Journal of Paleolimnology*, 1991, vol. 6, p. 167–170.
- Self A.E., Jones V.J., Brooks S.J. Late Holocene environmental change in arctic western Siberia, *The Holocene*, 2015, vol. 25, p. 150–165, DOI: 10.1177/0959683614556387.
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A., Syryh L.S., Andronikov A.V., Biskaborn B., Diekmann B., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V., Grekov I.M. Paleolimnologicheskie issledovaniya v rossijskoj chasti Severnoj Evrazii: obzor [Paleolimnological studies in the Russian part of Northern Eurasia: review], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2017, no. 4, p. 369–380. (In Russian)
- Syrykh L.S., Nazarova L.B., Hercshu U., Subetto D.A., Grekov I.M. Rekonstrukciya paleoekologicheskikh i paleoklimaticheskikh uslovij golocena na yuge Tajmyra po rezul'tatam analiza ozernyh donnyh otlozhenij [Reconstruction of paleoecological and paleoclimatic conditions of the Holocene in the southern Taimyr Peninsula according to the results of the analysis of lake bottom sediments], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2017, no. 4, p. 417–426. (In Russian)
- Udachin V.N., Bol'shiyanov D.Yu., Votyakov S.L., Kiseleva D.V., Hvorov P.V., Aminov P.G., Ivanov Yu.K. Pervye

- dannye o geohimii mikroelementov v donnyh otlozheniyah arkticheskogo ozera Kenteturku (poluostrov Tajmyr) [The first data on the geochemistry of trace elements in the bottom sediments of the arctic Kenteturku Lake (the Taimyr Peninsula)], *Trudy Instituta geologii i geohimii im. akademika A.N. Zavarickogo*, 2013, no. 160, p. 356–359. (In Russian)
- Ushnickaja L.A., Pest'jakova L.A., Subetto D.A., Troeva E.I. Morfometricheskaja harakteristika ozer Leno-Amginskogo mezhdurech'ja [Morphometric characteristics of lakes within the Lena-Amga interfluve], *Nauka i Obrazovanie*, 2014, no. 4(76), p. 71–76. (In Russian)
- Vachula R.S., Sae-Lim J., Russell J.M. Sedimentary charcoal proxy records of fire in Alaskan tundra ecosystems, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 541, 109564, DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.109564.
- Yanchenko Z.A. Analiz lokal'noj flory okrestnostej oz. Lama (Severo-Zapad plato Putorana) [Analysis of the local flora of the Lama Lake surroundings (North-West of the Putorana Plateau)], *Vestnik KrasGAU*, 2008. no. 6, p. 97–102. (In Russian)
- Yanchenko Z.A., Romanov A.A., Gerasimenko V.Ya. Geodinamicheskie processy, morfologiya, landshaft i osobennosti vysotnoj pojasnosti gor Putorana [Geodynamic processes, morphology, landscape and specific features of the altitudinal zonality of the Putorana Mountains], *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2010, no. 6, p. 355–365. (In Russian)

Web sources

- AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, 2020, URL: <https://www.algaebase.org> (access date 03.03.2021).
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/cite-report/> (access date 28.02.2021).
- The Plant List. Version 1.1, 2013, URL: <http://www.theplantlist.org/> (access date 03.03.2021).

Received 21.03.2021

Revised 03.06.2021

Accepted 20.07.2021

ПРИЛИВНАЯ ДИНАМИКА ВОД В ДЕЛЬТЕ ПЕЧОРЫ В ЛЕТНЮЮ МЕЖЕНЬ

А.М. Алабян¹, А.Н. Василенко², Н.А. Демиденко³, И.Н. Крыленко⁴,
Е.Д. Панченко⁵, А.А. Попрядухин⁶

^{1,2,4,6} *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

³ *Институт океанологии имени П.П. Ширинова РАН*

⁵ *Институт водных проблем РАН, лаборатория гидродинамики*

¹ *Канд. геогр. наук, доц.; e-mail: andrei_alabyan@mail.ru*

² *Ст. преподаватель; e-mail: saiiia24@mail.ru*

³ *Науч. сотр.; e-mail: demidenko_nikola@mail.ru*

⁴ *Канд. геогр. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: krylenko_i@mail.ru*

⁵ *Мл. науч. сотр.; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru*

⁶ *Инженер; e-mail: gidroartem@mail.ru*

В августе 2020 г. состоялась гидрологическая экспедиция в устье Печоры, результаты которой позволяют коренным образом переосмыслить динамику вод в микроприливной дельте крупнейшей реки западного сектора Российской Арктики. Выявлены ранее неизвестные особенности циклических изменений гидравлических параметров водотоков дельты, вызываемые приливыми колебаниями уровня моря. Неравномерное изменение уровней воды на морском крае дельты по мере продвижения приливной волны по мелководной Коровинской губе в западном направлении приводит к появлению реверсивных течений и существенному изменению распределения стока между главным руслом Печоры и основными дельтовыми рукавами. При стоковом расходе воды 1,9–2,0 тыс. м³/с и величине прилива у мыса Болванский Нос 1,0 м в устье главного русла Большой Печоры наблюдались реверсивные движения водных масс с максимальными расходами воды 4,76 тыс. м³/с на отливе и 4,11 тыс. м³/с в сторону реки на приливе. Поступления осолоненных морских вод в русло при этом зафиксировано не было. Основное перераспределение стока в дельте происходило посредством реверсивных течений в проливе Месино у д. Андег, где от Малой Печоры влево отходят рукава Тундровый Шар и Средний Шар. Распределение стока и динамика течений в этом узле в ходе приливного цикла носит исключительно сложный характер и является ключевым фактором обводнения западной части дельты Печоры. На участке от вершины дельты до с. Андег по рукаву Малая Печора проходило на 10–18% речного стока больше, чем по главному судоходному рукаву Большая Печора в зависимости от фазы приливного цикла. В правобережных рукавах Голубковский Шар и Городецкий Шар транзитный сток отсутствовал. Приливные колебания уровня и расхода воды прослеживались и у опорного гидрологического поста с. Оксина в 141 км от устьевого створа.

Ключевые слова: распределение стока, дельтовые рукава, приливный цикл, реверсивные течения, продвижение и трансформация приливной волны, Андегский узел

ВВЕДЕНИЕ

Печора – крупнейшая река западного сектора Российской Арктики. Одна из основных хозяйственных функций устья Печоры – водотранспортная, здесь расположен морской и речной порт Нарьян-Мар, который является важным транспортным узлом как Северного морского пути, так и континентальной части региона. В настоящее время при отсутствии круглогодичного автомобильного сообщения между Нарьян-Маром и Центральной Россией Печора является единственной магистралью, связывающей Ненецкий автономный округ с «материком».

Микроприливно-устьевая область Печоры имеет ключевое значение для рыбного хозяйства региона как место нагула семги и других ценных пород

рыб. Мелководная Коровинская губа, принимающая воды западных рукавов дельты Печоры, имеет важнейшее природоохранное значение, здесь находится Ненецкий государственный природный заповедник. В последние десятилетия в районах Большеземельской и Малоземельской тундры, прилегающих к устью Печоры, ведется освоение нефтяных и газовых месторождений, существенно увеличивающее нагрузку на природу и инфраструктуру региона.

Река Печора впервые упоминается в новгородских летописях в связи с походом воеводы Углебы на Югру в 1032 г., а в начале XVI в. в ее устье был основан первый русский заполярный город Пустозерск [Сухогрузов, 2000]. История гидрографических работ в устье Печоры в XIX в. связана с работой экспедиции капитан-лейтенанта П.И. Кру-

зенштерна (сына знаменитого мореплавателя И.Ф. Крузенштерна) и геолога А.А. Кейзерлинга [Кейзерлинг, Крузенштерн, 1851], а в послереволюционное время – с изысканиями экспедиции инженера Б.Н. Юрьева для строительства порта в Нарьян-Маре [Юрьев, 1935].

В 1968 г. для систематического изучения гидрологического режима устьевой области Печоры была создана Печорская устьевая станция (ПУС) в составе Нарьян-Марской гидрометеорологической обсерватории Северного управления гидрометеослужбы СССР. Позднее ПУС была реорганизована в Отдел гидрологии устья Печоры в составе Объединенной гидрометеорологической станции Нарьян-Мар.

Наиболее активное изучение динамики вод в микроприливной устьевой области Печоры выполнялось ПУС под методическим руководством Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова (ГОИН) в 1970–1980-е гг. прошлого века [Лупачев, 1979; Лупачев, Скриптунов, 1979; Полонский, 1984]. Помимо научных целей эти исследования часто были ориентированы на решение ряда хозяйственных задач, наиболее известной из которых была оценка последствий изъятия стока Печоры для планировавшейся в те годы переброски в бассейн Волги.

Помимо ПУС и ГОИНа в устье Печоры работали экспедиции Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), Института океанологии им. П.П. Ширшова (ИО РАН) и др., результаты которых обобщены в монографиях [Михайлов, 1997; Печорское море..., 2003; Эстуарно-дельтовые системы..., 2007].

Измерения расходов воды в рукавах дельты Печоры и прочие гидрометрические работы в прошлом веке проводились с использованием методик, предусматривающих постановку судна на якорь на скоростных вертикалях и измерение скоростей течения по горизонтам гидрометрическими вертушками, фиксирующими направление течения [Наставление..., 1968]. При таком порядке выполнения работ измерение расхода воды в крупном рукаве обычно занимало весь рабочий день, что затрудняло исследование нестационарности течений в многорукавной приливной дельте. Оценка влияния приливов на распределение стока была возможна лишь косвенными методами [Полонский, 1987].

В начале XXI в. в практической гидрометрии приливных устьев произошла «революция», связанная с возможностью измерения расходов воды и скоростного поля потока акустик-доплеровскими профилографами [Sepulveda et al., 2006; Vennel, 2006]. Многократное сокращение времени и трудозатрат при измерении нестационарных водных потоков

дало возможность существенно расширить спектр изучаемых гидродинамических процессов в приливных устьях рек, находящихся в различных областях Мирового океана [Losada et al., 2007; Lu et al., 2015; Rollnic, Rosario, 2015; Hoitink, Jay, 2016; Abreu et al., 2020].

С 2011 г. акустик-доплеровские профилографы течений стали применяться и для гидрометрических работ в устье Печоры [Полонский, 2012; Балакина и др., 2013; Борщенко и др., 2020]. Была продемонстрирована их высокая эффективность, однако сделать точные количественные оценки диапазонов приливных колебаний стока в рукавах удавалось далеко не всегда, особенно в межень, когда влияние приливов на перераспределение стока между рукавами дельты происходит наиболее интенсивно.

С целью получения новых, более подробных данных о приливной динамике вод в рукавах дельты Печоры в августе 2020 г. состоялась экспедиция сотрудников кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ с участием научного сотрудника ИО РАН Н.А. Демиденко, имевшего опыт работ в устье Печоры с 1980-х гг. Задачами экспедиции было измерение расходов воды и скоростного поля потока в основных рукавах дельты в течение приливного цикла с непрерывной фиксацией колебаний уровня воды вдоль морского края дельты, в ее вершине и в ключевых узлах распределения стока. Экспедиция была спланирована с учетом опыта работы в приливных устьях крупных рек бассейна Белого моря и использовала отработанные там методики полевых измерений [Алабян и др., 2016, 2018].

Устьевая область Печоры еще с конца прошлого века считалась интересным объектом для математического моделирования [Урнышев, 1988], однако ни одной реально работающей гидродинамической модели, откалиброванной и верифицированной на материалах детальных полевых исследований и пригодной к практическому применению, к настоящему времени не создано. Поэтому задачей экспедиции было получение натуральных данных для разработки, калибровки и верификации такой модели на основе опыта моделирования приливных устьев рек Беломорского бассейна [Панченко и др., 2020; Alabyan, Lebedeva, 2018]. Помимо решения научных задач, связанных с изучением динамического взаимодействия речных и морских вод в условиях многорукавной приливной дельты, гидродинамическое моделирование может найти практическое применение при расчете транспорта загрязнителей в водотоках дельты Печоры, планировании мероприятий по улучшению навигационных условий и защите от наводнений.

Гидрография и водный режим низовьев Печоры. Впадая в юго-восточную часть Баренцева моря, Печора формирует низ-

кроприливное устье с дельтой выполнения и закрытым отмелым устьевым взморьем [Михайлов, 2004; Эстуарно-дельтовые системы..., 2007]. Ее устьевая область включает в себя устьевое взморье (Печорскую губу) и устьевой участок реки протяженностью около 190 км до д. Великовисочное. Отсчет ведется от створа в устье главного рукава Большой Печоры на параллели мыса Болванский Нос (рис. 1). Морской границей устьевой области считается линия, проходящая через полуостров Русский Заворот, цепь Гуляевских Кошек и о. Песяков к о. Варандей.

В 141 км от устьевое створа находится опорный гидрологический пост с. Оксина, а в 22 км

ниже него у д. Большая Сопка – вершина дельты, где русло реки разделяется на два основных рукава – Большую и Малую Печору. В рукавах дельты расположены уреченные посты: д. Осколково (53 км от устьевое створа), д. Андег (75 км) и г. Нарьян-Мар (101 км). Пост в Нарьян-Маре оборудован самописцем, а в Оксине, Осколково и Андеге уровень воды регистрируется наблюдателем дважды в сутки. Наблюдение за уровнем моря ведется на морских постах Ходовариха на п-ове Русский Заворот, Варандей и Константиновский. Средний уровень моря (Печорской губы) имеет отметку $-0,36$ м БС.

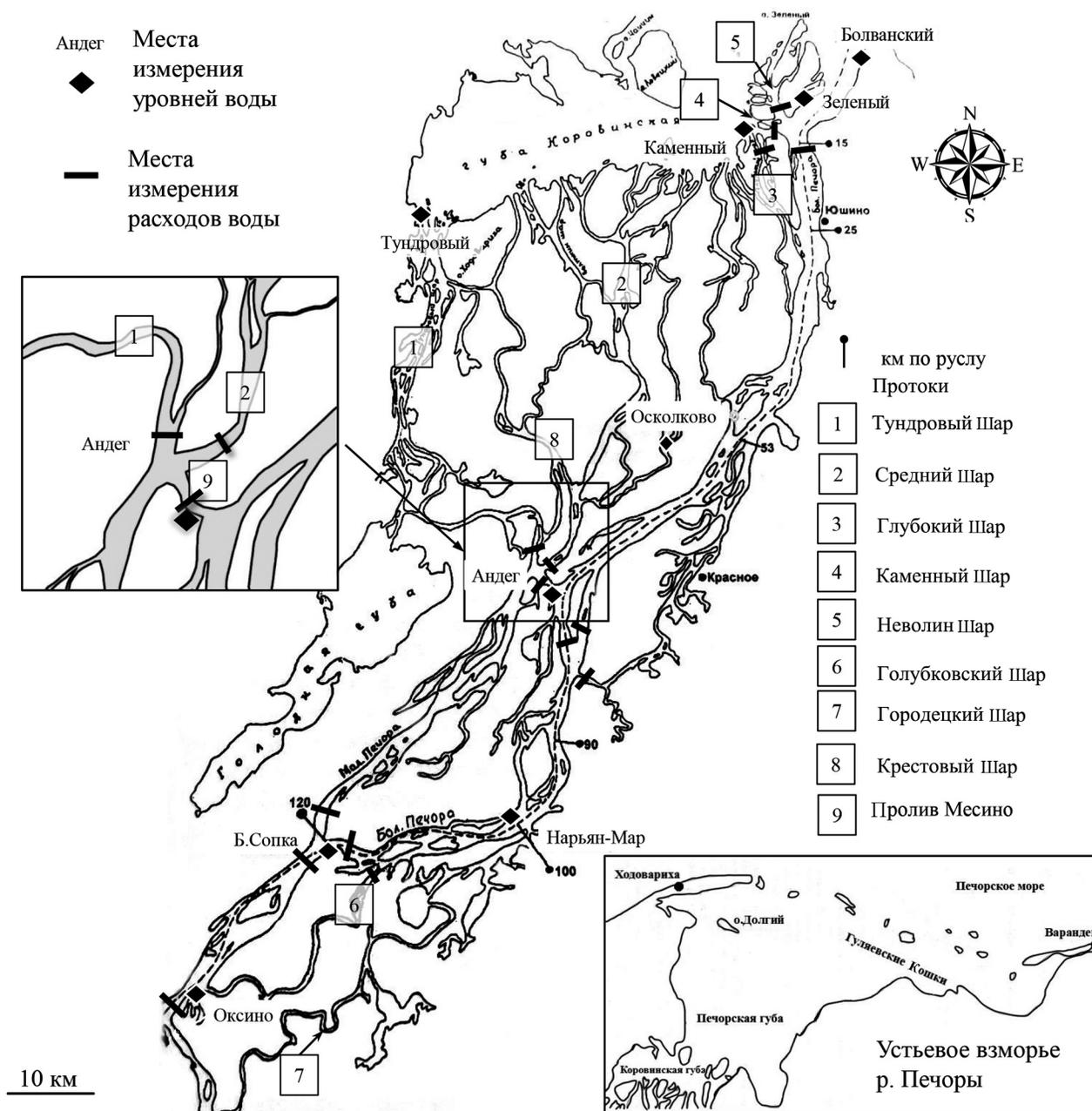


Рис. 1. Схема дельты Печоры и полевых работ 14–25 августа 2020 г.

Fig. 1. Scheme of the Pechora delta and field work of 14–25.08.2020

Площадь бассейна Печоры составляет около 324 тыс. км², длина реки – 1810 км [Ресурсы..., 1972]. Средний многолетний расход воды (норма стока) у с. Оксина за 1932–2020 гг. составляет 4800 м³/с, что соответствует годовому объему стока 151 км³. Максимальный расход воды в вершине дельты наблюдался 15.05.1991 и составил 39 200 м³/с. Средний минимальный расход летней межени около 2500 м³/с, минимальный наблюденный был зарегистрирован 13.08.2013 и составил 1500 м³/с; средний минимальный расход зимней межени – около 500 м³/с, при абсолютном минимуме 388 м³/с, наблюдавшемся 16–18 апреля 1986.

Режим уровней в вершине устьевой области Печоры формируется главным образом под влиянием стока воды, поступающего из ее бассейна. Пик весеннего половодья наблюдается обычно в конце мая. Стоковые подъемы уровня усугубляются ледовыми заторами и достигают 8–9 м в вершине устьевой области и около 5 м в районе Нарьян-Мара. Подъем

уровня воды ниже Нарьян-Мара уменьшается из-за расплывания волны половодья и почти не сказывается на уровне воды в Печорской губе [Эстуарно-дельтовые системы..., 2007].

Распределение стока по рукавам дельты. Согласно измерениям и расчетам В.Ф. Полонского [1984] для ситуации 1977–1980 гг. (табл. 1), в створе с. Оксина более 95% стока концентрировалось в основном русле Печоры. В правобережные протоки Голубковский Шар и Городецкий Шар (Шар – местное название рукавов Печоры) даже в половодье и в дождевые паводки попадала лишь незначительная часть стока. В вершине дельты в правый рукав Большой Печоры, по которому проходит основной судоводный ход, в половодье поступало около 43% общего расхода воды, а в левый, Малую Печору, – около 49%; в межень доля стока Большой Печоры могла уменьшаться до 46%, а Малой Печоры, соответственно, увеличиваться до 54%.

Таблица 1

Распределение стока воды по рукавам дельты Печоры по данным предыдущих исследований, %

Источник	[Полонский, 1984]	[Полонский, 2012]	[Борщенко и др., 2020]
Период измерений	1977–1980	11–13.09.2011	2018–2019
Расход в вершине дельты, тыс. м ³ /с	Половодье	1,9	10–11
Рукав дельты, створ			
<i>Вершина дельты Печоры</i>			
р. Печора, Оксина	95,5	>99	(87,8)
Голубковский Шар, исток	4,2	<1	(12,2)
Городецкий Шар, г. Нарьян-Мар	4,5	0	
р. Печора, Большая Сопка	91,3	(100)	(87,8)
Малая Печора, Большая Сопка	48,6	55	50,7
Большая Печора, Большая Сопка	42,7	45	37,1
Андегский узел			
Малая Печора, Большая Сопка	48,6	45	50,7
Утчер (Тундровый Шар), исток	5,5	?	7,7
Крестовый Шар, исток	1,2	?	1,3
Средний Шар, исток	17,5	?	18,9
Месин, Месино	24,4	?	22,8
<i>Низовья Большой Печоры</i>			
Глубокий Шар, исток	4,2	–	–
Каменный Шар, исток	1,2	–	–
Неволин Шар, исток	4,9	–	–
Большая Печора, устье	64,9	–	–

Примечание: «–» означает отсутствие измерений, «?» – измеренные значения автором не приведены, в скобках указаны значения, не приведенные непосредственно автором, а рассчитанные на основе его данных.

Дальнейшее перераспределение расходов воды Малой Печоры отделяются дельтовые рукава Тундровый Шар (Утчер-Шар) и Средний Шар, от ко-

торого, в свою очередь, отделяется Крестовый Шар (см. рис. 1, врезка). При этом основной поток Малой Печоры резко поворачивает вправо в поперечную протоку с местным названием пролив Месино и соединяется с потоком Большой Печоры. В половодье сток в Андегском узле распределяется в следующем соотношении: 5,5% – Тундровый Шар; 1,6% – Крестовый Шар; 17,5% – Средний Шар; 24,4% – пролив Месино. В межень распределение стока было оценено следующим образом: 3,6% – Тундровый Шар; 0,6% – Крестовый Шар; 25% – Средний Шар; 25% – пролив Месино.

Более поздние измерения, выполненные в различные фазы водного режима акустик-доплеровскими профилографами [Полонский, 2012; Борщенко и др., 2020], показали, что кардинальных изменений в распределении стока по рукавам дельты в половодье за последние 40 лет не произошло (см. табл. 1).

Уровенный режим. Уровень моря в Печорской губе мало зависит от стока Печоры и определяется влиянием морских факторов и ветровыми условиями. В Печорскую губу приливная волна проникает из моря через проливы между островами Гуляевские Кошки (см. рис. 1, врезка), генеральное направление приливных течений в Печорской губе – юго-западное, а отливных – северо-восточное [Лупачев, Скриптунов, 1979]. Приливы имеют неправильный полусуточный характер [Гидрометеорология..., 1990], *высота приливной волны, приходящей дважды в течение суток, разная – чередуются «большая» и «малая» полная вода.* Это обстоятельство в дальнейшем будет иметь ключевое значение при анализе методики и результатов измерения стока в водотоках дельты. Величина «большой» волны прилива составляет 1,0–1,1 м в сизигию и 0,5 м в квадратуру. Помимо периодических приливных колебаний существенную роль играют непериодические сгонно-нагонные колебания уровня моря, происходящие в синоптическом масштабе времени и связанные с прохождением крупных атмосферных вихрей.

Уровенный режим водотоков дельты Печоры обусловлен как изменчивостью сезонного стока воды, так и воздействием приливов и нагонов со стороны моря. Среднее многолетнее превышение уровня воды у Нарьян-Мара над уровнем Печорской губы, соответствующее среднегодовому значению расхода воды в вершине дельты, составляет 75 см, что соизмеримо с величиной прилива в устьевом створе и соответствует уклону 7,5 мм/км. Максимальный уклон в половодье может достигать 3,5 см/км, в то время как минимальное падение среднего уровня в межень составляет около 2 мм/км [Эстуарно-дельтовые системы..., 2007]. Такое соотношение уклона и величины приливных и сгонно-нагонных коле-

баний уровня моря в сочетании с особенностями распространения приливной волны на взморье обуславливает чрезвычайно сложный характер динамики вод в дельте Печоры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика гидрометрических работ в приливных устьях, основанная на измерениях расходов воды в течение полного приливного цикла акустик-доплеровскими профилографами с одновременной регистрацией колебания уровня воды в ключевых узлах устьевой области, была разработана и успешно применена на реках Беломорского бассейна [Алабян и др., 2016, 2018; Мискевич и др., 2018]. Наибольшую эффективность данная методика демонстрирует в комплексе с гидродинамическим моделированием, когда результаты полевых измерений используются для калибровки и верификации модели. Последняя, в свою очередь, увязывает отдельные временные срезы, охваченные измерениями, в континуальную картину динамики вод в многорукавном приливном устье [Панченко и др., 2020; Lu et al., 2013; Alabyan, Lebedeva, 2018; Abreu et al., 2020].

Экспедиция в устье Печоры была проведена летом 2020 г., непосредственно полевые работы выполнялись в период с 14 по 25 августа. Гидрометрические измерения производились при речном стоке, близком к минимальному летнему, амплитуда приливных колебаний уровня моря уменьшалась от сизигии к квадратуре на фоне постепенного снижения уровня после нагона 17 августа (рис. 2).

Для регистрации приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня воды на различных участках устьевой области устанавливались цифровые барометрические самописцы (логгеры) Keller DCX-22 и Solinst Levellogger LT F15/M5, запрограммированные на запись данных с интервалом одна минута. Один из логгеров оставался на базе экспедиции и регистрировал изменение атмосферного давления для введения поправок в записи самописцев, находящихся в воде.

Распространение приливной волны вдоль морского края дельты по Коровинской губе отслеживалось тремя логгерами (см. рис. 1) – «Болванский» (у мыса Болванский Нос в устье главного русла), «Каменный» (у выхода протоки Каменный Шар) и «Тундровый» (у выхода рукава Тундровый Шар). Еще пять логгеров были равномерно распределены вдоль основного рукава Большой Печоры: «Зеленый» на о-ве Зеленый у самого нижнего разветвления основного русла Большой Печоры; «Осколково» и «Андег» у деревень с уровенными постами; «Сопка» у деревни Большая Сопка в вершине дельты и «Оксино» у опорного гидрологического поста.

Высотные отметки «нулей» логгеров определялись с использованием системы дифференциального спутникового позиционирования, состоящей из приемников Javad Triumph-VS, Javad Triumph-1 и EFT M4, с постобработкой в программе Justin. Данные всех логгеров были приведены к единой системе высот, используемой на гидрологическом посту г. Нарьян-Мар.

Измерения расходов воды и скоростного поля потока выполнялись акустическим доплеровским профилографом RiverRay Teledyne RD-Instruments, закрепленным под бортом надувной моторной лод-

ки Фаворит-470. Расчет расходов воды и средней скорости течения выполнялся непосредственно в ходе измерений с использованием программы WinRiver II. Время прохода по створу в зависимости от ширины рукава варьировало от нескольких минут до получаса. В идеальном случае продолжительность каждой серии измерений должна была соответствовать продолжительности полусуточного приливного цикла, однако в реальных условиях она определялась временем наступления экстремумов или стабилизации значений расходов воды и составляла 7,5–11,5 часов.

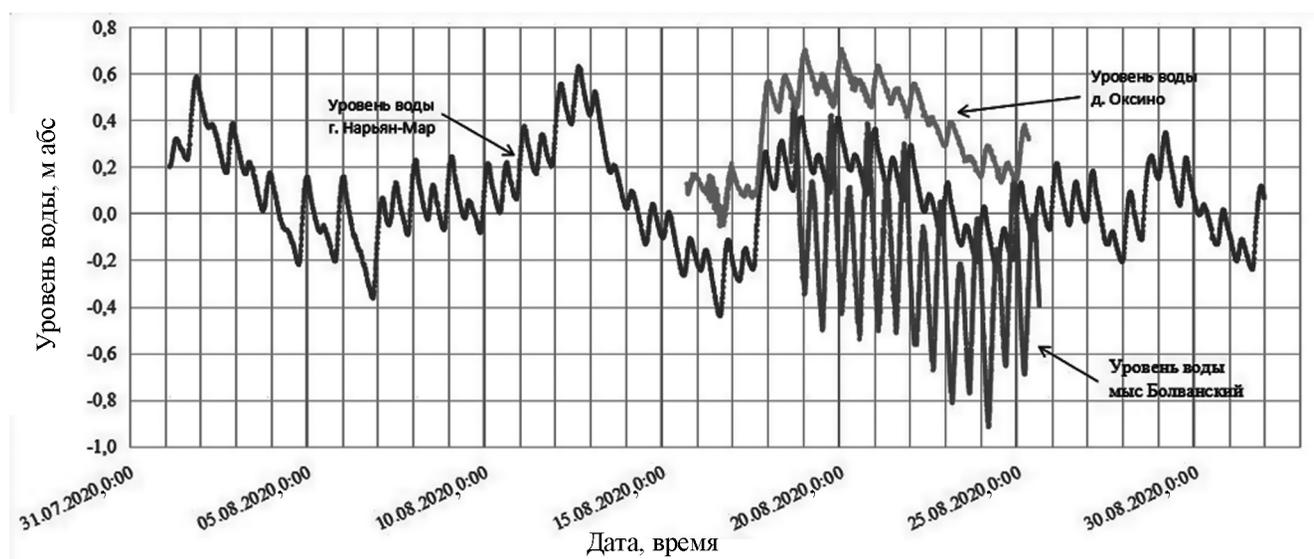


Рис. 2. Ход уровней воды в устьевой области Печоры в августе 2020 г.

Fig. 2. Water level oscillation in the Pechora estuarine area in August 2020

При выполнении гидрометрических измерений периодически (главным образом при работе у морского края дельты в прилив) выполнялось измерение электропроводности воды по всей ее толще зондом YSI, однако проникновения осолоненных вод в рукава дельты зафиксировано не было.

Сопоставление результатов измерений августа 2020 г. с предшествующими измерениями, выполненными в сентябре 2011 г. [Полонский, 2012] при сопоставимой водности реки, производилось исходя из моментов наступления экстремумов уровня по самописцу поста г. Нарьян-Мар.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменения уровней воды по логгерам позволил получить представление о темпах и характере распространения приливной волны вдоль морского края дельты и вверх по главному руслу Печоры. Ввиду относительно медленной трансформации волны ее фазовая скорость при расчете по продвижению гребня (максимум уровня) и фронта

(начало прилива) оказалась практически одинаковой (табл. 2, здесь и далее приводятся данные для «большой» приливной волны). Наибольшие различия наблюдаются на участках наибольшей трансформации волны – непосредственно после захода в русло Большой Печоры со взморья и на перекатном участке Большой Печоры выше г. Нарьян-Мара. Для этих же участков характерна наименьшая скорость распространения волны – 13–16 км/ч, при том что на остальных участках русла она составляет 20–22 км/ч.

К устью Тундрового Шара приливная волна приходит спустя 4,5 часа после захода в основной рукав дельты, где она за это время успевает распространиться на 90–95 км. Таким образом, скорость ее продвижения в западном направлении по мелководной Коровинской губе можно оценить в 12–13 км/ч, при этом высота волны уменьшается более чем в два раза.

Тот факт, что приливные колебания уровня воды отчетливо фиксируются у с. Оксина (рис. 3А), подтверждает правильность тезиса, что вершина дельты не является верхней границей устьевой области

Печоры. Однако ввиду этого к результатам расчета параметров меженного стока Печоры по посту с. Оксина необходимо относиться с некоторой осторожностью. Наши измерения расхода, выполненные 17.08.2020, показали, что его значения в этом створе сильно зависят от фазы приливного цикла: через 3 часа после прихода «большой» приливной

волны и роста уровня на 17 см расход воды уменьшился почти вдвое – с 1960 до 1100 м³/с. При этом в правобережных второстепенных рукавах Голубковский Шар и Городецкий Шар транзитный сток отсутствовал, течения в них носили исключительно реверсивный характер и инициировались колебаниями уровня воды на их выходе в Большую Печору.

Таблица 2

Характеристики продвижения и трансформации приливной волны в основном русле Печоры

Участок реки (от логгера до логгера)	Длина, км	Средняя высота волны, м		Время роста уровня, ч		Время добегания, ч			Скорость	
		Начальная	Конечная	Начало	Конец	Гребень волны	Фронт волны	Среднее	км/ч	м/с
Болванский – Осколково	48	0,90	0,42	5,7	5,5	2,5	3,33	3,0	16,0	4,4
Осколково – Андег	23	0,42	0,39	5,5	5,5	1,0	1,25	1,1	20,9	5,8
Андег – Нарьян-Мар	27	0,39	0,32	5,5	5,5	1,25	1,25	1,25	21,6	6,0
Нарьян-Мар – Сопка	20	0,32	0,30	5,0	5,0	1,25	1,75	1,5	13,3	3,7
Сопка – Оксина	22	0,30	0,23	5,0	5,0	1,0	1,0	1,0	22,0	6,1

Таким образом, вывод В.Ф. Полонского [2012, с. 24] о том, что у поста с. Оксина «в меженных условиях в любой период приливного цикла при отсутствии значительных сгонно-нагонных явлений наблюдается расход воды, весьма близкий к стоковому расходу» нельзя признать обоснованным, так как его измерения 11 сентября 2011 г. выполнялись слишком короткими сериями и только на спаде «малой» приливной волны (см. рис. 3А).

В вершине дельты у д. Большая Сопка (120 км) изменение расхода воды в течение приливного цикла было еще более заметно, диапазон колебания общего расхода воды 17 августа 2020 г. составил 1195–2280 м³/с, изменяясь в противофазе с приливными колебаниями уровня воды, которые составили при этом 14 см (см. рис. 3Б). Соотношение расходов Большой и Малой Печоры в ходе приливного цикла менялось незначительно: при максимальных значениях на отливе оно составляло 45:55% в пользу Малой Печоры, а при минимальных на приливе – 41:59%. Это в целом согласуется с оценками В.Ф. Полонского [1984, 2012] и подтверждает, что кардинальной перестройки разветвленного русла на участке от Большой Сопки до д. Андег за последние 40 лет не произошло. Вместе с тем, также как и для вышележащего участка, вывод о стабильности расходов в рукавах Большая и Малая Печора в течение приливного цикла не подтвердился – 12 сен-

тября 2011 г. «большая» приливная волна к месту измерения просто еще не успела подойти.

В Андегском узле (73 км) в ходе приливного цикла была зарегистрирована наиболее сложная картина перераспределения стока с попеременным развитием обратных течений в дельтовых рукавах. Она обусловливается различными темпами продвижения и трансформации приливной волны (см. рис. 3Б) от мыса Болванский Нос по главному руслу Большой Печоры к д. Андег и по Коровинской губе к выходу Среднего и Тундрового Шара (см. рис. 3В).

Основное изменение стока происходит в проливе Месино, по которому основной поток Малой Печоры проходит в главное русло Большой Печоры. Ввиду того что в русле Большой Печоры на участке от устья до д. Андег периодически наблюдается смена прямого уклона водной поверхности (в сторону моря) на обратный (в сторону реки), основной поток главного рукава дельты имеет реверсивный характер (см. рис. 3Г). Максимальное значение приливного расхода в русле Большой Печоры достигало 4110 м³/с в створе, расположенном в 16 км от устья. При этом максимум отливного расхода составил 4760 м³/с при стоковом расходе порядка 2000 м³/с.

В Андегском узле часть приливного расхода устремлялась из Большой Печоры в Месино, достигая максимального значения примерно за один

час до наступления максимального уровня воды в Андеге (см. рис. 3В). В это время течение в рукавах Тундровый Шар и Средний Шар направлено в сторону моря. Уровни у Андега и в западной части Коровинской губы изменяются с близкой амплитудой и почти синфазно с запаздыванием в устье Тундрового Шара по отношению к Андегу на 1,0–1,5 часа. В малую воду это приводит к появлению в Тундровом Шаре небольшого обратного уклона и слабого

обратного течения ($39 \text{ м}^3/\text{с}$). С приходом «большой» приливной волны в Андег раньше, чем в устье Тундрового Шара, в нем восстановился прямой уклон, и течение развернулось в сторону моря. Максимальный отливный расход там составил $98 \text{ м}^3/\text{с}$. В Среднем Шаре во время измерений 24–25 августа 2020 г. течение происходило только в сторону моря с изменением расхода в диапазоне $270\text{--}590 \text{ м}^3/\text{с}$ в противофазе с расходом в Месино.

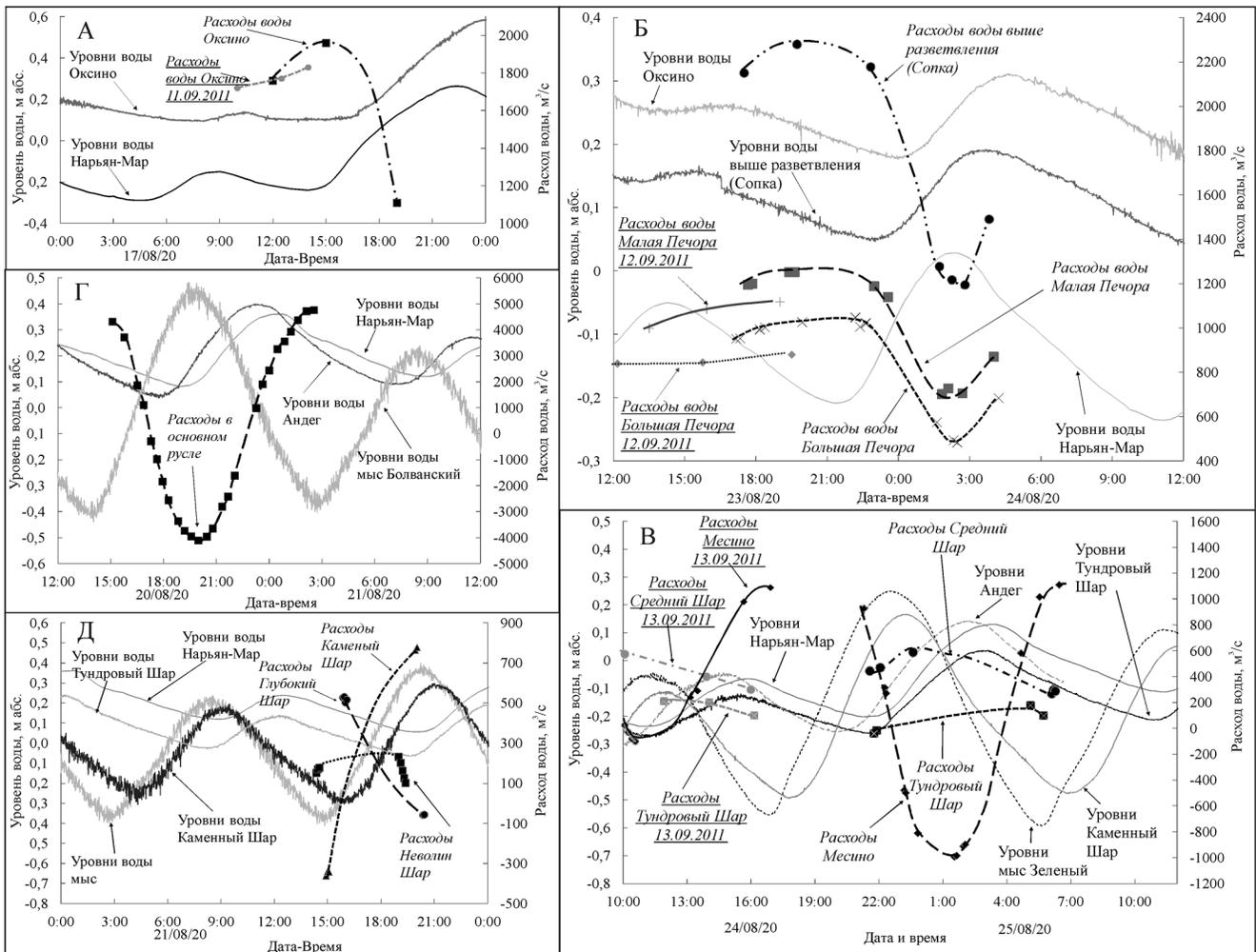


Рис. 3. Ход уровней и расходов воды: А – у с. Оксино, 17.08.2020; Б – в вершине дельты, 23–24.08.2020; В – в Андегском узле разветвления, 24–25.08.2020; Г – в основном русле Печоры в 16 км выше устьевого створа, 20–21.08.2020; Д – в устьевом разветвлении Большой Печоры у о-ва Зеленый, 21.08.2020

Fig. 3. Water table and discharge changes: А – near Oksino settlement, 17.08.2020; Б – at the Pechora delta apex, 23–24.08.2020; В – in the Andeg node, 24–25.08.2020; Г – in the Pechora River main channel 16 km from the mouth, 20–21.08.2020; Д – at the bifurcation near the Zelyonyi Island, 21.08.2020

Сопоставление результатов измерений в Андегском узле 24–25 августа 2020 г. с измерениями 13 сентября 2011 г. [Полонский, 2012] показывает, что выбор оптимального времени и продолжительности серии имеет решающее значение для понимания сути гидродинамических процессов, происходящих в сложной приливной дельте. Измерения 2011 г. выполнялись только при прохождении «малой» при-

ливной волны, причем в основном в ходе ее спада. Однако, даже такие результаты позволили сделать ряд справедливых выводов относительно сложной циркуляции потоков в Андегском узле, вызванной особенностями распространения приливной волны в основном русле Печоры и в Коровинской губе.

При измерении в «малую» приливную волну в 2011 г. обратное течение в протоке Месино, име-

ющее ключевое значение для распределения стока в Андегском узле, наблюдалось менее одного часа при максимальном расходе менее $100 \text{ м}^3/\text{с}$. В 2020 г. при измерении в «большую» приливную волну обратное течение происходило более 4,5 часов при максимальном расходе $992 \text{ м}^3/\text{с}$, который был вполне сопоставим с максимальным расходом отливного течения $1110 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, в рукава западной части дельты Печоры водные массы поступают как с вышележащего участка Малой Печоры, так и из низовьев Большой Печоры в сопоставимом количестве.

Кроме того, измерения 2020 г. опровергают утверждение, что «в течение всего приливо-отливного цикла сохраняются положительные уклоны водной поверхности и односторонние течения в западных рукавах дельты» [Полонский, 2012, с. 27]. Было показано, что в результате реверсивного течения в Тундровом Шаре его водные массы могут попадать в центральную часть дельты через Средний Шар.

Таким образом, в нижней части дельты Печоры в межень возможно условно «круговое» перемещение некоторого объема водной массы: в прилив из низовьев Большой Печоры в Средний и Тундровый Шар, и по ним вновь в сторону моря при реверсивном характере перемещения на отдельных участках дельты. Такой эффект не только интересен с чисто научной точки зрения, но и важен при исследовании возможных путей миграции загрязнителей, переносимых водным потоком. Исследование траекторий их перемещения возможно посредством полевых наблюдений с использованием трассеров или же методом гидродинамического моделирования.

Аналогичная ситуация приливного перераспределения стока наблюдается в устьевом разветвлении главного русла Большой Печоры у о-ва Зеленый (см. рис. 3Д), его причиной также является запаздывание наступления экстремумов уровня воды в Коровинской губе по сравнению с основным руслом. При сопоставимой амплитуде приливных колебаний уровня у мыса Болванский Нос и на выходе из протоки Каменный Шар в ней также происходит реверсивное движение водных масс в противофазе с реверсивным течением в основном русле Большой Печоры. Когда в Большой Печоре отливный расход нарастает с падением уровня, в Каменном Шаре наблюдается обратная ситуация. В малую воду перед началом прилива у мыса Болванский Нос уровень воды у о-ва Зеленый оказывается ниже, чем в Коровинской губе, и вода вытекает из нее в основное русло через Каменный Шар с расходом $361 \text{ м}^3/\text{с}$. По мере выравнивания уровней течение останавливается и нарастает до $777 \text{ м}^3/\text{с}$ при опережающем и более интенсивном развитии прилива в главном русле по сравнению с Коровинской губой.

Характер реверсивного течения в рукаве Глубокий Шар, отделяющемся от Большой Печоры в 25 км выше ее устьевого створа, в целом повторяет характер течения в основном русле, однако приливные течения там слабые. В протоке Неволин Шар, занимающей у о. Зеленый среднее положение, обратного течения зафиксировано не было, хотя изменения расхода воды во время приливного подъема уровня воды происходили значительно и быстро: за 25 минут он уменьшился с 232 до $102 \text{ м}^3/\text{с}$, что отражает локальные особенности строения отмелого устьевого взморья на выходе из рукава.

Таким образом, схема течений в устьевом разветвлении Большой Печоры оказывается аналогичной ситуации в Андегском узле: от мощного приливного потока, проходящего по главному водотоку, отделяется часть водной массы, поступающая в Коровинскую губу по максимально западной траектории из-за наибольшего перепада уровня в том направлении. При этом в среднем рукаве разветвления течение изменяется во времени весьма существенно, но не меняет направления в ходе приливного цикла.

ВЫВОДЫ

На основе современной комплексной методики гидрометрических работ в приливных устьях, базирующейся на непрерывных измерениях расходов воды и отметок водной поверхности в течение приливного цикла в ключевых створах дельты, получены новые сведения о динамике вод в дельте р. Печоры в летнюю межень:

1. Приливные колебания уровня воды и изменения расхода воды, связанные с приливым циклом, зарегистрированы в вершине дельты у опорного гидрологического поста с. Оксина, что говорит о нерепрезентативности данного створа как замыкающего для измерения стока со всего бассейна р. Печоры в период летней межени. Для корректной оценки минимального стока Печоры необходимо проработать вопрос о переносе опорного поста выше по течению, либо о разработке специальной методики измерения расхода воды у поста с. Оксина, включая оборудование его самописцем уровня.

2. Подтверждено, что в вершине дельты Печоры доля стока, поступающего в рукав Малая Печора во все фазы водного режима, больше, чем в основной судоходный рукав Большая Печора. Изменение соотношения стока между рукавами в течение приливного цикла незначительно, однако величины расхода воды при прохождении «большой» приливной волны в обоих рукавах уменьшаются почти в два раза. Это может существенно сказываться на механизме транспорта наносов, их отложении в прилив на перекатах и ухудшении судоходных условий.

3. Скорость распространения приливной волны вдоль морского края дельты в Коровинской губе меньше скорости ее продвижения вверх по основному руслу Большой Печоры. Это является причиной возникновения в водотоках дельты как прямых, так и обратных уклонов в различные фазы приливного цикла, что приводит к формированию сложной системы циркуляционных и реверсивных течений, которые могут оказаться причиной «неочевидной» миграции загрязнителей в водотоках дельты.

4. В низовьях основного рукава Большой Печоры при стоковом расходе порядка 2 тыс. м³/с было зафиксировано максимальное значение приливного расхода воды 4110 м³/с и максимального расхода на отливе 4760 м³/с. Значительное превышение приливного расхода над стоковым в низовьях Большой Печоры способствует обводнению западной части дельты через Андегский узел.

5. Инструментально зафиксирован реверсивный характер течения у д. Андег в проливе Месино с максимальным расходом на приливе 992 м³/с (в сторону Малой Печоры) и на отливе с расходом до 1100 м³/с (в сторону Большой Печоры). При этом незначительные реверсивные движения воды в Тун-

дровом Шаре происходили в противофазе течению в Месино, а обратных течений в Среднем Шаре не наблюдалось.

6. В нижнем разветвлении основного русла Большой Печоры течение в протоке Каменный Шар носит реверсивный характер, находясь в противофазе с течением в основном русле. Течение в Глубоковском Шаре также носит реверсивный характер, но синфазно течению в основном русле. Обратных течений в протоке Неволин Шар, занимающей промежуточное положение между основным руслом и протокой Каменный Шар, зафиксировано не было.

Полученные в ходе экспедиции данные планируется использовать при построении, калибровке и верификации гидродинамической модели дельты Печоры. Она будет ориентирована на изучение как типичных, так и экстремальных гидрологических ситуаций, связанных с изменением стока реки и уровня моря, как это было сделано для устьевых областей Северной Двины и Онеги [Панченко и др., 2020]. Практическое использование модели предполагается для расчета переноса загрязнителей, планирования навигации и мониторинга опасных гидрологических явлений.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-05-60021 «Сток рек и изменение водного и ледотермического режима устьевых областей и морских побережий Российской Арктики в XXI веке». Авторы благодарят участника экспедиции инженера С.В. Платонова, начальника объединенной гидрометстанции Нарьян-Мар Северного УГМС Л.Ю. Севастьянову и весь ее коллектив, сотрудников АО «Росморпорт» А.Ю. Богунова и С.И. Чупрова, а также хозяина турбазы Ханавей-Ся Ф.А. Личутина за неоценимую помощь в выполнении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алабян А.М., Алексеева А.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А., Фингерт Е.А., Демиденко Н.А., Лебедева С.В. Опыт и проблемы гидрологических изысканий в приливных устьях // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2016. С. 260–263.
- Алабян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 4. С. 39–48.
- Балакина О.Н., Волик В.А., Дуркина Л.М., Полонский В.Ф. Состояние наблюдений и работ в устьевой области Печоры // Труды ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 96–107.
- Борщевский Е.В., Мишин Д.В., Горелиц О.В. Комплексные исследования гидрологического режима устьевой области реки Печора // От познания к мировоззрению. Сборник докладов Международной научной конференции памяти Ю.Б. Виноградова. Санкт-Петербургский государственный университет. СПб.: Издательство ВВМ, 2020. С. 1054–1059.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1, Баренцево море. Вып. 1, Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
- Кейзерлинг А., Крузеништерн П. Печорский край в географическом и гидрографическом отношении. Из путевых наблюдений // Журн. Мин-ва внутр. дел. 1851. № 6. С. 421–455; № 8. С. 71–101, 235–251; № 9. С. 361–392.
- Лупачев Ю.В. Гидрологические условия устьевой области Печоры и их возможные изменения при изъятии части стока из бассейна // Труды ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 49–68.
- Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Течения и водообмен в Печорской губе // Труды ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 83–101.
- Мискевич И.В., Алабян А.М., Коробов В.Б., Демиденко Н.А., Попрядухин А.А. Исследования короткопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря (28 июля – 15 августа 2016 г.) // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 369–373. DOI: 10.7868/S0030157418030036.
- Мискевич И.В., Коробов В.Б., Алабян А.М. Специфика инженерно-экологических изысканий в приливных устьях малых рек западного сектора российской Арктики // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 3–4. С. 50–61.

- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
- Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 5–14.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоздат, 1968. Вып. 9. Ч. 1. С. 271–274.
- Панченко Е.Д., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Лебедева С.В. Моделирование гидродинамических процессов в устьях рек Онеги и Северной Двины при различных сценариях климатических изменений // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU – 2020». Тверь: ПолиПРЕСС, 2020. Т. 2. С. 72–75.
- Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социоэкономические проблемы). М.: МОРЕ, 2003. 502 с.
- Полонский В.Ф. Распределение стока воды в устьевой области Печоры и тенденция его изменения // Труды ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 96–110.
- Полонский В.Ф. Метод типовых графиков для определения расходов воды в приливных устьях рек // Водные ресурсы. 1987. № 4. С. 105–113.
- Полонский В.Ф. Влияние приливов на распределение стока воды в дельте Печоры // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 20–27.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 662 с.
- Сухогрузов П.Г. Легенды и действительность. Очерки развития географических знаний о Севере и Коми крае с древнейших времен до начала XX века. Сыктывкар: Геопринт, 2000. 144 с.
- Урнышев А.П. Трансформация приливной волны в устье реки Печоры // Сер. Препринтов «Научн. докл.». АН СССР, УрО, Коми научн. Центр. Сыктывкар, 1989. Вып. 30. 20 с.
- Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / под ред. В.Н. Коротаева и др. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
- Юрьев Б.Н. Устье реки Печоры (Отчет по изысканиям в устье реки Печоры 1926–1934 гг. и физико-географический очерк) / Архангельск: Изд-во Сев. гос. морское пароходство. Бюро сев. портовых изысканий, 1935. 140 с.
- Abreu de C.H.M., Barros M.L.C., Brito D.C., Teixeira M.R., Cunha A.C. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the Lower Amazon River, *Water*, 2020, vol. 12, 660 p., DOI: 10.3390/w12030660.
- Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation, *J. Hydroinformatics*, 2018, vol. 20(4), p. 798–814, DOI: 10.2166/hydro.2018.051.
- Hoitink A.J.F., Jay D.A. Tidal river dynamics: Implication for deltas, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 240–272, DOI: 10.1002/2015RG000507.
- Losada M.A., Diez-Minguito M., Reyes-Merlo M.A. Tidal-fluvial interaction in the Guadalquivir River Estuary: Spatial and frequency-dependent response of currents and water levels, *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 122, no. 2, p. 847–865, DOI: 10.1002/2016jc011984.
- Lu S., Tong C., Lee D.-Y., Zheng J., Shen J., Zhang W., Yan Y. Propagation of tidal waves up in Yangtze Estuary during the dry season, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2015, vol. 120, p. 6445–6473, DOI: 10.1002/2014JC010414.
- Rollnic M., Rosario R.P. Tide propagation in tidal courses of the Para River estuary, Amazon Coast, Brazil, *J. Coastal Res.*, 2013, vol. 165 (SI65), p. 1581–1586, DOI: 10.2112/SI65-267.1.
- Sepulveda H., Valle-Levinson A., Framinan M. Observations of subtidal and tidal flow in the Rio de la Plata estuary, *Cont. Shelf Res.*, 2004, vol. 24, p. 509–525, DOI: 10.1016/j.csr.2003.12.002.
- Vennel R. ADCP Measurements of momentum balance and dynamic topography in a constricted tidal channel, *J. Phys. Oceanography*, 2006, vol. 36, p. 177–188, DOI: 10.1175/JPO2836.1.

Поступила в редакцию 02.03.2021

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

TIDAL FLOW DYNAMICS IN THE PECHORA RIVER DELTA DURING SUMMER LOW WATER

A.M. Alabyan¹, A.N. Vasilenko², N.A. Demidenko³, I.N. Krylenko⁴,
E.D. Panchenko⁵, A.A. Popryadukhin⁶

^{1,2,4,6} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

³ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Scientific Researcher; e-mail: demidenko_nikola@mail.ru

⁵ Institute of Water Problems RAS, Laboratory of Hydrodynamics

¹ Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: andrei_alabyan@mail.ru

² Senior Lecturer; e-mail: saiiia24@mail.ru

⁴ Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵ Junior Researcher; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

⁶ Engineer; e-mail: gidroartem@mail.ru

The results of a hydrological expedition of August 2020 to the Pechora River estuary make it possible to rethink the flow dynamics in the microtidal delta of the largest river in the Western sector of the Russian Arctic. Previously unknown features of cyclic changes in hydraulic parameters of the delta branches caused by tidal fluctuations in the sea level were discovered. The uneven change in water levels along the delta sea border, as the tidal wave moves westward along the shallow inlet of the Korovinskaya Guba Bay, caused the reverse currents and significant changes in the runoff distribution between the Pechora River main channel and principal delta branches. Under the total runoff of 1,9–2,0 thousand m³/s and the tide height of 1,0 m at the cape Bolvansky Nos the reverse currents occurred at the mouth of the Pechora River main channel with maximum flow of 4,76 thousand m³/s at low sea and 4,11 thousand m³/s towards the river at full tide. At the same time, no inflow of brackish water into the river was recorded. The main runoff redistribution in the delta occurs through reverse currents via the Mesino Straight near the Andeg village, where the Tundrovyy Shar and Sredny Shar arms branch off the Malaya Pechora River to the left side. During the tidal cycle the flow distribution and current dynamics in this node are extremely complex being the key factor of watering for the western part of the Pechora River delta. Depending on the tidal phase the river flow through the Malaya Pechora branch from the delta apex to the Andeg village exceeds the main navigation way of the Bolshaya Pechora branch by 10–18%. There was no transit flow in the right-bank Golubkovskiy Shar and Gorodetskiy Shar branches. The tidal level and discharge fluctuations were observed up to the Oksino gauge located 141 km upstream the mouth.

Keywords: runoff distribution, delta branches, tidal cycle, reversible currents, tidal wave propagation and transformation, Andeg node

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic research (project 18-05-60021 River runoff and changes in the water and ice-thermal regime of the estuarine regions and the sea coasts of Russian Arctic in the 21st century). Our special thanks to Eng. S.V. Platonov, member of the expedition, L.Yu. Sevastianova, Head of the Narian-Mal hydrometeorological station of the Northern UGMS, and the staff of the station, A.I. Bogunov and S.I. Chuprov, staff member of the Rosmorport, and F.A. Lichutin, owner of the Hanavej-Sya tourist center for their assistance in the organization of field work.

REFERENCES

- Abreu de C.H.M., Barros M.L.C., Brito D.C., Teixeira M.R., Cunha A.C. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the Lower Amazon River, *Water*, 2020, vol. 12, 660 p., DOI: 10.3390/w12030660.
- Alabyan A.M., Alekseeva A.A., Krylenko I.N., Panchenko E.D., Popryadukhin A.A., Fingert E.A., Demidenko N.A., Lebedeva S.V. [Experience and problems of hydrological survey in tidal estuaries], *Inzhenernyye izyskaniya v stroitel'stve*. Materialy Dvenadcatoy Obshherossijskoj konferencii izyskatel'skih organizacij [Engineering survey for construction. Proc. of 12th All-Russian conference of survey organizations], Moscow, Geomarketing Publ., 2016, p. 260–263. (In Russian)
- Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation. *J. Hydroinformatics*, 2018, vol. 20(4), p. 798–814, DOI: 10.2166/hydro.2018.051.
- Alabyan A.M., Panchenko E.D., Alekseeva A.A. Osobennosti dinamiki vod v prilivnyh ust'jah malyh rek bassejna Belogo morja [Hydrodynamic features of small tidal estuaries of the White Sea basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 4, p. 39–48. (In Russian)
- Balakina O.N., Volik V.A., Durkina L.M., Polonskii V.F. Sostojanie nabljudenij i rabot v ust'evoj oblasti Pechory [The state of observations and work in the Pechora mouth area], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 2013, no. 214, p. 96–107. (In Russian)
- Borshchenko E.V., Mishin D.V., Gorelits O.V. [Integrated research of the hydrological regime of the Pechora River mouth], *Ot poznaniya k mirovozzreniju. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoi konferentsii pamjati Yu.B. Vinogradova* [From cognition to worldview. Collection of reports of the international scientific conference in memory of Yu.B. Vinogradov], St. Petersburg, VVM Publ., 2020, p. 1054–1059. (In Russian)
- Estuarno-del'ovye sistemy Rossii i Kitaja: gidrologo-morfologicheskie protsessy, geomorfologija i prognoz razvitiya* [Estuarine-deltaic systems of Russia and China: hydrological and morphological processes, geomorphology and forecast of the development], Moscow, GEOS Publ., 2007, 445 p. (In Russian)
- Gidrometeorologija i gidrokhimija morej SSSR*, t. 1, Barentsevo more, vyp. 1, *Gidrometeorologicheskije uslovija* [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR, vol. 1, Barents Sea, iss. 1, Hydrometeorological conditions], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 280 p. (In Russian)
- Hoitink A.J.F., Jay D.A. Tidal river dynamics: Implication for deltas, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 240–272, DOI: 10.1002/2015RG000507.
- Keizerling A., Kruzenshtern P. Pechorskij kraj v geograficheskom i gidrograficheskom otnosheniyakh. Iz putevykh nabljudenij [Pechora region in geographical and hydrographic terms. From travel observations], *Zhurnal Ministerstva vnutrennikh del*, 1851, no. 6, p. 421–455; no. 8, p. 71–101, 235–251; no. 9, p. 361–392. (In Russian)
- Losada M.A., Diez-Minguito M., Reyes-Merlo M.A. Tidal-fluvial interaction in the Guadalquivir River Estuary: Spatial and frequency-dependent response of currents and water levels. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 122(2), p. 847–865, DOI: 10.1002/2016jc011984.
- Lu S., Tong C., Lee D.-Y., Zheng J., Shen J., Zhang W., Yan Y. Propagation of tidal waves up in Yangtze Estuary during the dry season, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2015, vol. 120, p. 6445–6473, DOI: 10.1002/2014JC010414.

- Lupachev Yu.V. [Hydrological conditions of the Pechora mouth area and their possible changes during partial withdrawal of runoff from the basin], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 1979, no. 143, p. 49–68. (In Russian)
- Lupachev Yu.V., Skriptunov N.A. [Currents and water exchange in the Pechora Bay], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 1979, vol. 143, p. 83–101. (In Russian)
- Mikhailov V.N. Principles of typification and zoning of river mouth areas (analytical review), *Water Resources*, 2004, vol. 31, p. 1–11, DOI: 10.1023/B:WARE.0000013566.36892.f0.
- Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastojashee i budushee* [Mouths of Russian rivers: past, present, future], Moscow, GEOS Publ., 1976. 413 p. (In Russian)
- Miskevich I.V., Alabyan A.M., Korobov V.B., Demidenko N.A., Popryadukhin A.A. Short-term variability of hydrological and hydrochemical characteristics of the Kyanda estuary in Onega Bay, the White Sea (July 28–August 15, 2016). *Oceanology*, 2018, vol. 58, p. 350–353, DOI: 10.1134/S000143701803013X. (In Russian)
- Miskevich I.V., Korobov V.B., Alabyan A.M. Specificity of engineering-ecological surveys in small tidal estuaries of the western sector of the Russian Arctic], *Engineering Survey*, 2018, vol. 12, no. 3–4, p. 50–61. (In Russian)
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsijam i postam* [Manual for hydrometeorological stations and gauges], Leningrad, 1968, vol. 9, no. 1, p. 271–274. (In Russian)
- Panchenko E.D., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Lebedeva S.V. [Modeling of hydrodynamic processes in the Onega and Northern Dvina estuaries under various scenarios of climate changes] *Trudy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Morskie issledovaniya i obrazovanie: MARESEDU-2020"* [Proc. of IX International conference "Marine Research and Education MARESEDU-2020"], Tver', PoliPRESS Publ., 2020, vol. 2, p. 72–75. (In Russian)
- Pechorskoe more. Sistemnye issledovaniya (gidrofizika, gidrologiya, optika, biologiya, khimija, geologiya, ekologiya, sotsioekonomicheskie problemy)* [The Pechora Sea. Systemic studies (hydrophysics, hydrology, optics, biology, chemistry, geology, ecology, socioeconomic problems)], Moscow, MORE Publ., 2003, 502 p. (In Russian)
- Polonskii V.F. [Distribution of water runoff in the mouth area of the Pechora River and the tendency of its change], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 1984, no. 172, p. 96–110. (In Russian)
- Polonskii V.F. Metod tipovykh grafikov dlya opredeleniya raskhodov vody v prilivnykh ust'yakh rek [Method of typical plots for determining water discharge in the tidal estuaries], *Vodnye resursy*, 1987, no. 4, p. 105–113. (In Russian)
- Polonskii V.F. Vliyanie prilivov na raspredelenie stoka vody v del'te Pechory [Influence of tides on the distribution of water flow in the Pechora River delta], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 2(6), p. 20–27. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, t. 3, Severnyi kraj* [Surface water resources of the USSR, vol. 3, The Northern region], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 662 p. (In Russian)
- Rollnic M., Rosario R.P. Tide propagation in tidal courses of the Para river estuary, Amazon Coast, Brazil, *J. Coastal Res.*, 2013, vol. 165(SI65), p. 1581–1586, DOI: 10.2112/SI65-267.1.
- Sepulveda H., Valle-Levinson A., Framinan M. Observations of subtidal and tidal flow in the Rio de la Plata estuary, *Cont. Shelf Res.*, 2004, vol. 24, p. 509–525, DOI: 10.1016/j.csr.2003.12.002.
- Sukhogruzov P.G. *Legendy i deistvitel'nost'. Ocherki razvitiya geograficheskikh znaniy o Severe i Komi krae s drevnejshikh vremen do nachala XX veka* [Legends and reality. Essays on the development of geographical knowledge about the North and the Komi Territory from the Ancient times to the beginning of the 20th century], Syktyvkar, Geoprint Publ., 2000, 144 p. (In Russian)
- Urnyshchev A.P. [Transformation of a tidal wave at the mouth of the Pechora River], *Seriya Preprintov "Nauchnye Dokady". AN SSSR, UrO, Komi nauchnyj Tsentr* [Series of Preprints "Scientific Reports". USSR Academy of Sciences, Ural Branch, Komi Scientific Centre], Syktyvkar, 1989, no. 30, 20 p. (In Russian)
- Vennel R. ADCP Measurements of momentum balance and dynamic topography in a constricted tidal channel. *J. Phys. Oceanography*, 2006, vol. 36, p. 177–188, DOI: 10.1175/JPO2836.1.
- Yur'ev B. N. *Ust'e reki Pechory (Otchet po izyskaniyam v ust'e reki Pechory 1926-1934 gg. i fiziko-geograficheskij ocherk)* [Mouth of the Pechora River (Report on surveys at the mouth of the Pechora River in 1926–1934 and a physical and geographical outline)], Arkhangel'sk, Northern Marine Shipping, Bureau of Northern Ports Surveys Publ., 1935, 140 p. (In Russian)

Received 02.03.2021

Revised 15.06.2021

Accepted 20.07.2021

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 504; 628.3

ЭКОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ВОДООТВЕДЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

А.М. Дрегуло¹, В.В. Петухов², Н.Г. Бобылев³

^{1,3} Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле

^{1,2} Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, лаборатория геоэкологических проблем природно-хозяйственных систем и урбанизированных территорий

¹ Введ. науч. сотр., канд. биол. наук, постдок; e-mail: a.dregulo@spbu.ru

² Ст. науч. сотр., канд. техн. наук; e-mail: vvpetukhov@yandex.ru

³ Доц., канд. техн. наук; e-mail: n.bobylev@spbu.ru

Экологическая безопасность населения и природной среды урбанизированных территорий во многом зависит от функционирования систем водоотведения. Климатические особенности Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), а именно устойчивый рост температуры воздуха при невысокой степени выпадения атмосферных осадков, указывают на перспективность использования солнечной энергии для оптимизации функционирования иловых карт. Основной спецификой данных сооружений является прямая зависимость процесса обработки отходов от совокупного влияния температуры воздуха и количества выпадения атмосферных осадков КК (μ). В работе проанализированы нормативные требования ранжирования КК (μ) для территорий АЗРФ. Динамика КК (μ) изучалась по данным метеостанций, депонированным в ЯОД-архивах Web Аисори-М ВНИИГМИ-МЦД, в соответствии с периодами действий нормативной документации: 1958–1985 и 1986–2012 гг. Установлен рост среднегодовых значений температуры воздуха между указанными периодами от 0,3 до 2,0°C. Интервал значений соответствовал нормативному шагу ранжирования КК (μ). Динамика среднегодовых значений выпадения атмосферных осадков значительно менялась, что стало доминирующим фактором, влияние которого меняло значение КК (μ) и его территориальное зонирование в 1958–1985 гг. по сравнению с 1986–2012 гг. Внутри единой зоны нормативного КК (μ), соответствующего 0,7–0,8, для территорий городов Воркута, Салехард, Нарьян-Мар и Туруханск увеличение КК (μ) варьировало от 0,7 до 0,9. В западной части АЗРФ для территорий городов Архангельск и Мурманск, расположенных в зоне нормативного КК (μ) 0,8–0,9, наблюдалось увеличение до 1,0. Эффект, вызванный изменением (снижением) количества выпадения атмосферных осадков, может быть использован коммунальными службами для увеличения напуска иловой смеси (увеличение нагрузки и минимизация эксплуатационных затрат) или для уменьшения площадей (территорий), отведенных для иловых карт.

Ключевые слова: иловые карты (площадки), Арктическая зона России изменение климата, обработка отходов водоотведения

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление стало важным фактором, влияющим на экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Современное экономическое состояние большинства регионов АЗРФ требует значительных инвестиций в модернизацию инфраструктуры коммунального хозяйства, включая природно-технические системы обработки отходов [Arctic..., 1997; Шеломенцев и др., 2018; Селин, Васильев, 2011; Павленко, 2013; Жуков и др., 2017; Хрусталева, 2002; Кашулин и др., 2018; Оценка..., 2013].

Индустриализация и урбанизация последних десятилетий показала, что для всех регионов

Российской Федерации очевидна необходимость комплексного решения проблемы утилизации отходов. Одной из причин является отсутствие эффективного правового регулирования системы обращения с отходами в основополагающем Федеральном Законе № 89 «Об отходах производства и потребления». Этот Закон принят еще в 1998 г. и, хотя за последние 20 лет в него внесено более 40 поправок, правовые отношения в сфере обращения с отходами до настоящего времени упорядочены не в полном объеме. Действующее нормативно-правовое регулирование деятельности по обращению с ТКО признано недостаточным [Морозов и др., 2020].

С 2018 г. в РФ реализуется Проект в формате двустороннего сотрудничества «Климатически нейтральное обращение с отходами в Российской Федерации» с «Немецким обществом по международному сотрудничеству (ГИЦ) ГмбХ», в рамках которого предполагается обмен опытом и технологиями обращения с отходами по снижению выбросов парниковых газов и получению вторичных продуктов [Проект..., 2018].

Однако данный проект не учитывает влияние климатических изменений, которое снижает эффективность природно-технических систем обработки отходов, в частности обработки отходов водоотведения на иловых картах (площадках), основной спецификой которых является их прямая зависимость от влияния температуры воздуха [El-Aginy, Miller, 1984] и количества атмосферных осадков, выраженная как климатический коэффициент μ (далее КК (μ)).

Проведенные ранее исследования [Дрегуло, 2019; 2020] по оценке влияния изменения климата на эксплуатацию иловых карт, расположенных в европейской части России (и в частности, в Ленинградской области), показало, что избыточное выпадение атмосферных осадков [Золина, Булыгина, 2016] могло способствовать потере эксплуатационных и природозащитных свойств иловых карт. Однако наблюдаемый рост температуры воздуха в АЗРФ [Доклад..., 2020] требует дополнительного изучения перспектив обработки отходов в естественных условиях на данной территории [Дрегуло, Кудрявцев 2018]. Данная статья является продолжением предшествующих исследований по изучению влияния изменения климата на эксплуатацию природно-технических систем обработки отходов.

Цель статьи – изучение влияния динамики температуры воздуха и выпадения атмосферных осадков для адаптации процесса обработки отходов водоотведения в АЗРФ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Динамика среднегодовых значений температуры воздуха и количества атмосферных осадков производилась за 1958–1985 и 1986–2012 гг. по данным метеостанций ВНИИГМИ-МЦД [Специализированные..., 2018]. Ранжирование КК (μ): единый шаг градации температуры воздуха $\pm 4^\circ\text{C}$; количества атмосферных осадков ± 100 мм. При невыполнении условия $\mu = 1$, что соответствует диапазону температуры от $+3$ до $+7^\circ\text{C}$ и диапазону количества атмосферных осадков 500–600 мм, КК (μ) изменялся на $\pm 0,1$ [Евилевич, 1957].

Территориальное (картографическое) зонирование КК (μ) осуществлялось по результатам комбинированной (многопараметрической) простран-

ственной интерполяции среднегодовых значений температуры воздуха и количества атмосферных осадков методом Natural neighbour interpolation (Robin Sibson). Для построения карт с наложением полученных данных и их формализаций использовался программный комплекс ArcGIS 10.4.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние климатических изменений является регулятором технологических параметров иловых карт (площадок) (1) [Евилевич, 1957]:

$$F = \frac{W_{\text{oc}}}{H\mu}, \quad (1)$$

где F – полезная площадь иловой площадки, m^2 ; W_{oc} – годовое количество отходов, поступающих на иловые карты (площадки), m^3 ; H – высота годового слоя напуска осадка, м.

Алгоритм ранжирования КК (μ) был предложен и введен в практику в конце 1950-х гг. С 1986–2012 гг. и по настоящее время ранжирование КК (μ) было изменено и осуществляется согласно нормативным требованиям, где КК (μ) соответствует градации среднегодовой температуры воздуха от $+3$ до $+6^\circ\text{C}$ и среднегодовому количеству выпадения атмосферных осадков не более 500 мм в год для всей территории страны [СП 32.13330.2012].

Историческая реконструкция (периоды, за которые менялись нормативные требования ранжирования природно-климатической нагрузки на иловые карты 1958–1985 и 1986–2012 гг.) и прогноз современных изменений климата показали, что геоэкологические критерии, используемые в проектировании и эксплуатации природно-технических систем иловых карт, не учитывают реальную динамику выпадения атмосферных осадков. Метод ранжирования КК (μ), предложенный Евилевичем А.З., позволяет более точно оценить его изменение и влияние на процесс обработки отходов водоотведения, в то время как ранжирование по нормативным требованиям [СП 32.13330.2012, 2012] возможно только для южных районов европейской части РФ.

Проведенные нами исследования (по методу Евилевича) при соблюдении шага температуры $\pm 4^\circ\text{C}$ выявили девять температурных зон (одну по СП 32.13330.2012) и семь зон (одну по СП 32.13330.2012) при соблюдении шага 100 мм по количеству атмосферных осадков (табл. 1).

Картографическая визуализация пространственно-временной динамики среднегодовых значений температуры воздуха (рис. 1) показывает, что температурные зоны более позднего периода с 1986 по 2012 гг. по отношению к 1958–1985 гг. смещаются в северо-восточном направлении.

Ранжирование КК (μ) по особенностям пространственно-временной динамики среднегодовых значений температуры воздуха и выпадения атмосферных осадков [Дрегуло, 2019]

Температура воздуха			Атмосферные осадки		
Зона	Диапазон, °С	КК (μ)	Зона	Диапазон, мм	КК (μ)
1	> -13	-0,5 (0,5)	1	< 200	0,4 (1,4)
2	-13...-9	-0,4 (0,6)	2	200–300	0,3 (1,3)
3	-9...-5	-0,3 (0,7)	3	300–400	0,2 (1,2)
4	-5...-1	-0,2 (0,8)	4	400–500	0,1 (1,1)
5	-1...+3	-0,1 (0,9)	5	500–600	1
6	+3...+7	1	6	600–700	-0,1 (0,9)
7	+7...+11	+0,1 (1,1)	7	> 700	-0,2 (0,8)
8	+11...+15	+0,2 (1,2)	–	–	–
9	> 15	–	–	–	–



Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры воздуха

Fig. 1. Dynamics of changes in the average annual air temperature

Значительно увеличивается количество атмосферных осадков. Их отличительная особенность – не фронтальное движение, как в случае с динамикой температурного фона, а зональное укрупнение характерной области практически по всему радиусу ранее имеющих меньшие среднегодовые значения в длительном хронологическом цикле наблюдений (рис. 2).

Для предварительной оценки влияния климатических изменений на величину КК (μ) мы использовали табличную форму сопоставления и ранжирования полученных данных (табл. 2).

Согласно полученным данным, рост температуры воздуха за периоды исследования с 1958–1985 по 1986–2012 гг. наблюдался в среднем на 0,92°С и варьировался от 0,3 (станция мыс Шалаурова) до

2,0°C (станция ГМО им. Э.Т. Кренкеля). При этом только в трех случаях изменение среднегодовых значений температуры воздуха (превышение или уменьшение относительно температурных зон см. табл. 1) могло оказывать влияние на изменение КК (μ) от значения КК (μ) = 0,5 в 1958–1985 гг. до КК (μ) = 0,6 в 1986–2012 гг. (станции остров Визе, Джалинда и Юбилейная).

Динамика среднегодовых значений атмосферных осадков была более выраженной. Наблюдалось как уменьшение выпадения осадков на 88 мм (максимальное значение) на станции Малые Кармакулы,

так и увеличение до 65 мм (максимальное значение) на станции Туруханск.

Из полученных данных видно, что динамика выпадения атмосферных осадков является доминирующим фактором изменения величины КК (μ) как в сторону ее увеличения (в районах расположения станций Териберка, Колгуев, Северный Янискоски, Святой Нос, Канин Нос, Ковдор, Нарьян-Мар), так и в сторону уменьшения (в районах расположения станций им. Е.К. Федорова, Болванский Нос, Волочанка, о. Врангеля).



Рис. 2. Динамика среднегодового количества атмосферных осадков

Fig. 2. Dynamics of changes in the average annual precipitation

Картографическая визуализация территориального зонирования КК (μ) по результатам исследования показывает значительные отличия от нормативной градации КК (μ) (рис. 3).

Внутри единой зоны нормативного КК (μ), соответствующего 0,7–0,8 для территорий от городов Воркута, Салехард, Нарьян-Мар и Туруханск, увеличение КК (μ) варьирует от 0,7 до 0,9. В западной части АЗРФ для территорий Архангельска и Мурманска наблюдается его увеличение до 1,0 (нормативное значение КК (μ) = 0,8–0,9). При картографическом зонировании КК (μ) может наблюдаться несовпадение с теоретическим ранжированием КК (μ) по значениям таблицы 2. Вероятно, это вызвано выбором метода интерполяции данных, смещением зон КК (μ) «от станции к станции» в случае, где динамика температуры воздуха

или атмосферных осадков выходила за пределы ранжирования (см. табл. 1). Однако, несомненно, доминирующим фактором изменения значений КК (μ) является динамика (снижение/увеличение) количества осадков.

Эффект, вызванный снижением количества атмосферных осадков при сохранении или росте температурного режима, может быть использован коммунальными службами для увеличения напуска иловой смеси (т. е. увеличения нагрузки, минимизируя эксплуатационные затраты) или снижения площадей (территорий), отведенных для иловых площадок.

Теоретически увеличение КК (μ) на 0,1 из-за снижения количества выпадения атмосферной влаги (100 мм и более) позволит интенсифицировать процесс обработки осадков сточных вод.

Ранжирование КК (μ) в АЗРФ по данным наблюдений метеостанций с 1958–1985 гг. по 1986–2012 гг.

Индекс ВМО	Наименование станции	Среднегодовая температура воздуха, °С		Разница	Среднегодовые атмосферные осадки, мм		Разница	КК (μ)*	
		1958–1985	1986–2012		1958–1985	1986–2012		1958–1985	1986–2012
22113	Мурманск	0,0	0,5	0,5	477,5	495	17,5	0,8	0,8
22550	Архангельск	–0,8	–0,1	0,7	548,5	604,3	55,8	0,9	0,9
23205	Нарьян–Мар	–3,4	–2,3	1,1	434,6	496	61,4	0,8	0,8
23330	Салехард	–6,4	–5,1	1,3	446,2	449,8	3,6	0,7	0,7
23472	Туруханск	–6,4	–5,4	1	535,2	599,2	64	0,7	0,7
20891	Хатанга	–12,9	–11,7	1,2	261,5	280,8	19,3	0,6	0,6
25563	Анадырь	–7,0	–6,4	0,6	320,8	395,5	74,7	0,6	0,6
20046	Им. Э.Т. Кренкеля, ГМО	–13,2	–11,2	2,0	259,6	242,3	–17,3	0,6	0,6
20069	Остров Визе	–13,9	–12,4	1,5	190,9	196,3	5,4	0,5	0,6
20087	Голомянный	–14,8	–13,6	1,2	178,4	153	–25,4	0,5	0,5
20107	Баренцбург	–5,4	–4,1	1,3	599,1	546,8	–52,3	0,7	0,7
20289	Русский	–14,5	–14,5	0,0	190	175,5	–14,5	0,5	0,5
20292	Им. Е.К. Федорова, ГМО	–14,9	–13,7	1,2	239,6	203,8	–35,8	0,5	0,5
20476	Стерлегова	–13,9	–13	0,9	284	221	–63	0,5	0,5
20667	Им. М.В. Попова	–10,6	–9,3	1,3	252,8	247,5	–5,3	0,6	0,6
20674	Остров Диксон	–11,6	–10,4	1,2	345,5	386	40,5	0,6	0,6
20744	Малые Кармакулы	–5,0	–3,6	1,4	410,1	322,1	–88	0,8	0,8
20891	Хатанга	–12,9	–11,7	1,2	261,5	280,8	19,3	0,6	0,6
20946	Им. Е.К. Федорова (Болванский нос)	–6,3	–5,1	1,2	296,2	219	–77,2	0,8	0,8
20982	Волочанка	–11,7	–10,7	1,0	321,4	359,9	38,5	0,5	0,5
21432	Остров Котельный	–14,6	–13,6	1,0	170,4	155,3	–15,1	0,5	0,5
21611	Терпий–Тумса	–14,9	–14,9	0,0	162,5	149,5	–13	0,5	0,5
21647	мыс Шалаурова	–14,6	–14,3	0,3	164,2	156,5	–7,7	0,5	0,5
21802	Саскылах	–14,1	–13,4	0,7	214,7	185,2	–29,5	0,5	0,5
21824	Тикси	–13,0	–12,1	0,9	329,7	322,3	–7,4	0,5	0,5
21908	Джалинда	–13,6	–12,4	1,2	261,3	269,5	8,2	0,5	0,6
21921	Кюсюр	–13,4	–12,4	1,0	341,3	383,2	41,9	0,5	0,5
21931	Юбилейная	–13,5	–12,4	1,1	245,3	242,5	–2,8	0,5	0,6
21946	Чокурдах	–13,7	–12,7	1,0	232,5	214	–18,5	0,5	0,6
21982	Остров Врангеля	–10,7	–9,3	1,4	174,1	142,1	–32	0,7	0,7
22003	Вайда–Губа	0,8	1,4	0,6	509,1	518,9	9,8	1	1
22019	Полярное	0,4	0,8	0,4	518	535,7	17,7	0,9	0,9
22028	Териберка	0,3	0,8	0,5	464	471,3	7,3	1	1
22095	Колгуев Северный	–2,7	–1,7	1,0	341,4	346,6	5,2	1	1
22101	Янискоски	–0,7	–0,3	0,4	498,1	526,1	28	1	1
22140	Святой Нос	0,0	0,6	0,6	426	378,2	–47,8	1	1
22165	Канин Нос	–0,9	–0,3	0,6	427,8	431,6	3,8	1	1
22204	Ковдор	–0,8	0	0,8	602,6	589,7	–12,9	0,9	1

Примечание: * – среднегодовые величины температуры воздуха и атмосферных осадков, влияние которых меняло значение КК (μ), выделены жирным шрифтом.

Следовательно, для существующих иловых карт (площадок) становится возможным оптимизировать параметры, например увеличив W_{oc} или H , и тем самым сократить эксплуатационные затраты (электроэнергия, человеко-часы и т. д.). С другой стороны, увеличение количества осадков при со-

хранении или снижении среднегодовых значений температуры воздуха потребует увеличения параметра F или снижения W_{oc} и H , что может быть причиной нарушения эксплуатационного режима иловых карт и их захламления отходами [Dregulo, Vitkovskaya, 2020].

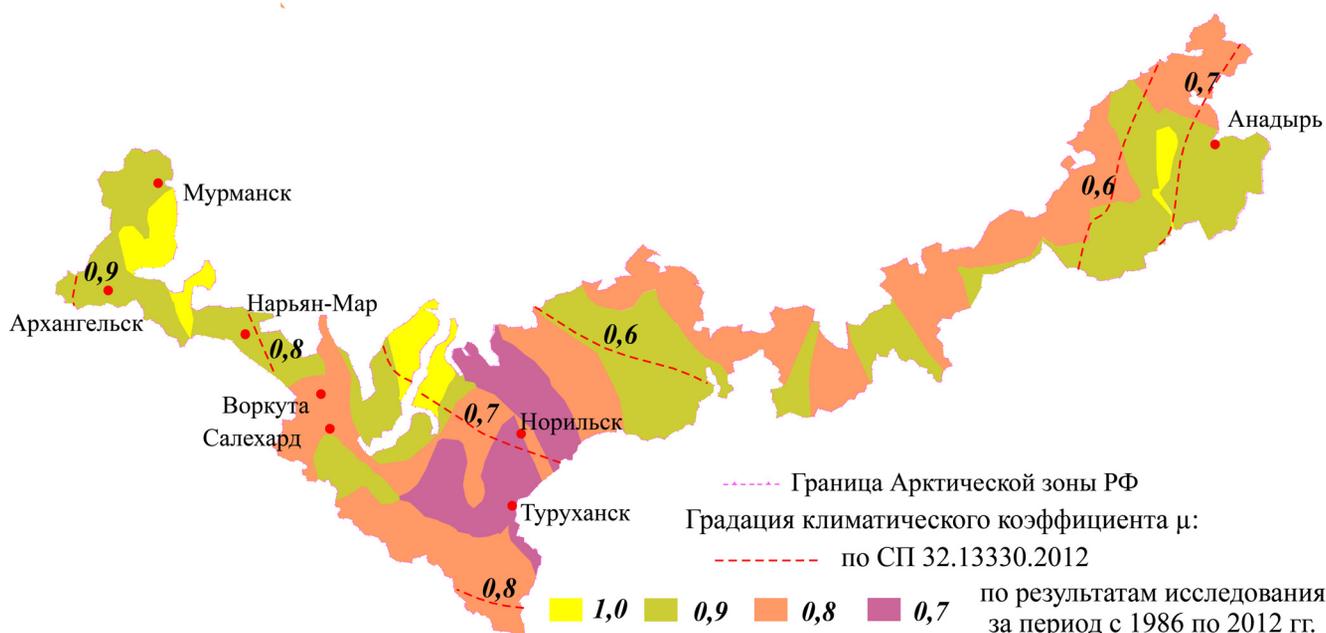


Рис. 3. Картографическая визуализация зонирования КК (μ) и его сравнение с нормативными требованиями [СП 32.13330.2012]

Fig. 3. Cartographic visualization of the territorial zoning of the CC (μ) in comparison with the regulatory requirements [SP 32.13330.2012]

ВЫВОДЫ

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что регламентируемые в нормативной документации требования ранжирования КК (μ), начиная с 1986 г. по настоящее время, только частично отражают реальные геоэкологические особенности обработки отходов водоотведения на иловых картах в АЗРФ.

Эффект, вызванный изменением количества выпадения атмосферных осадков и как следствие изменение КК (μ), может быть использован коммунальными службами для увеличения напуска иловой смеси (т. е. увеличением нагрузки, мини-

мизируя эксплуатационные затраты) или снижения площадей (территорий), отведенных для иловых карт (площадок). При наблюдаемом росте температуры воздуха и снижения атмосферных осадков в ряде регионов АЗРФ возможно адаптировать процесс обработки отходов водоотведения на иловых картах, снижая эксплуатационные затраты и оптимизируя основные технологические параметры эксплуатации иловых карт – F , W_{oc} или H . Для более точного определения эффекта от адаптации режима эксплуатации иловых карт необходимы комплексные мероприятия по проведению натурных наблюдений.

Благодарности. Часть исследований выполнялась при поддержке проекта Российского фонда фундаментальных исследований номер 20-514-22001 ФДНЧ «Разработка оптимальной модели системы безопасности человека в Арктической зоне Российской Федерации». Исследование выполнено в рамках НИР FFZF-2022-0014 «Исследование закономерностей трансформации кумулятивного техногенного фона природно-хозяйственных систем бассейна Финского залива».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дрегуло А.М. Влияние климатических факторов на эксплуатацию природно-технических систем обработки отходов водоотведения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 32–40.
- Дрегуло А.М. Идентификация и прогнозирование климатической нагрузки для проектирования и эксплуатации иловых карт (площадок) // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 1(77). С. 35–43. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.35-43.
- Дрегуло А.М., Кудрявцев А.В. Трансформация техноприродных систем водоотведения в объекты прошлого экологического ущерба: проблемы нормативно-законодательной базы // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 3(75). С. 54–62.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2020. 97 с.
- Евилевич А.З. К расчету иловых карт // Водоснабжение и санитарная техника. 1957. № 10. С. 30–32.
- Жуков М.А., Крайнов В.Н., Телеснина В.Н. Концептуальные основы государственной экологической политики в Арктике и других регионах нового хозяйственного освоения // Вестник КРАГСИУ. Серия «Теория и практика управления». 2017. № 18. С. 153–159.
- Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103.
- Кашулин Н.А., Скуфьина Т.П., Даувальтер В.А., Котельников В.А. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения // Арктика: экология и экономика. 2018. № 4(32). С. 15–29. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29.
- Морозов В.В., Курбатова, З.И., Курбатова Е.П. Проблемы обращения с твердыми бытовыми отходами и зоны экологического бедствия // Естественные науки. 2020. № 1. С. 9–13.
- Павленко В.И. Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // Арктика: экология и экономика. 2013. № 4(12). С. 16–25.
- Селин В.С., Васильев В.В. Тенденции и риски хозяйственной деятельности в Арктике в условиях долговременных климатических изменений // Арктика и Север. 2011. № 1. С. 125–133.
- СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Свод правил. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012. 85 с.
- Хрусталева Л.Н., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. Прогноз среднегодовой температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия) по результатам ретроспективного анализа // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 2. С. 66–74.
- Dregulo A.M., Vitkovskaya R.F. Analysis of foreign and domestic practice of operating sludge platforms to minimize negative environmental impact, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 613, 012026, DOI: 10.1088/1755-1315/613/1/012026.
- El-Ariny A.S., Miller H.I. Utilization of Solar Energy for Sludge Drying Beds, *Journal of Solar Energy Engineering*, 1984, vol. 106(3), p. 351–357, DOI: 10.1115/1.3267607.
- Электронные ресурсы
- Шеломенцев А.Г., Уханова А.В., Смиреникова Е.В., Воронина Л.В. Оценка пространственного развития регионов Арктической зоны Российской Федерации // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. 2018. № 4(56). URL: <https://eee-region.ru/article/5613/> (дата обращения 20.12.2019).
- Оценка доклада по «горячим точкам» Баренцева региона. Описание состояния 42 исходных экологических «горячих точек». Отчет Акваллан-нива. НЕФКО/БФГТ, 2013. 133 с. URL: https://www.barentsinfo.fi/beac/docs/Environment_Ministers_Meeting_4_5_Nov_2013_Inari_HotSpots_Assessment_Report_RUS.pdf (дата обращения 07.11.2019).
- Специализированные массивы для климатических исследований // ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 10.02.2018).
- Проект в формате двустороннего сотрудничества «Климатически нейтральное обращение с отходами в Российской Федерации». URL: <http://www.otxod.com/info.php?lang=ru> (дата обращения 11.09.2019).
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report. AMAP Secretariat, Oslo; Norway. 1997. URL: <https://oarchive.arctic-council.org/handle/11374/923?show=full> (дата обращения 15.04.2020).

Поступила в редакцию 05.06.2020
После доработки 15.04.2021
Принята к публикации 20.07.2021

ECOLOGICAL AND CLIMATIC FEATURES OF RECYCLING IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

A.M. Dregulo¹, V.V. Petukhov², N.G. Bobylev³

^{1,3} Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences

^{1,2} St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Scientific Research Center for Environmental Safety of the RAS, Laboratory of Geoecological Problems of Natural and Economic Systems and Urbanized Territories

¹ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: a.dregulo@spbu.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Engineering Sciences; e-mail: vvpetukhov@yandex.ru

³ Associate Professor, Ph.D. in Engineering Sciences; e-mail: n.bobylev@spbu.ru

The ecological safety of the population and the natural environment of urbanization territories largely depends on the functioning of water disposal systems. The climatic features of the Arctic zone of the Russian Federation, namely a steady increase in air temperature with a low degree of precipitation, indicate the prospects of using solar energy to optimize the functioning of drying beds. The main specificity of these structures is a direct dependence of the waste treatment process on the cumulative effect of air temperature and precipitation (climate coefficient CC (μ)). The paper analyzes the regulatory requirements for the CC (μ) ranking for the territories of the Russian Arctic. The dynamics of CC (μ) was studied according to the data of weather stations deposited in the YOD archives Web Aisori-M VNIIGMI-WDC for the periods of action of regulatory documentation, i.e. 1958–1985 and 1986–2012. An increase in the mean annual air temperature between these periods was 0,3 to 2,0 °C. The range of values corresponded to the standard step of the CC (μ) ranking. The dynamics of the average annual precipitation changed significantly, which became a dominant factor, the influence of which changed the CC (μ) value and its territorial zoning in 1958–1985 compared to 1986–2012. Within the single zone of the normative CC (μ) corresponding to 0,7–0,8, the increase in CC (μ) for the territories of Vorkuta, Salekhard, Naryan-Mar and Turukhansk varied from 0,7 to 0,9. An increase up to 1,0 was recorded for the territories of Arkhangelsk and Murmansk located in the western part of the Russian Arctic within the zone of 0,8–0,9 standard CC (μ). The effect caused by decreasing amount of precipitation can be used by community services to increase the input of sludge mixture (higher load and lower operating costs) or to reduce the area of drying beds.

Keywords: drying beds, Arctic zone of Russia, climate change, sludge treatment

Acknowledgements. Part of the study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-514-22001 “Development of an optimal model of the human security system in the Arctic zone of the Russian Federation”). The study was carried out as part of the research work FFZF-2022-0014 “Investigation of the patterns of transformation of the cumulative technogenic background of the natural and economic systems of the Gulf of Finland basin.”

REFERENCES

- Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 god* [Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2019], Moscow, Rosgidromet Publ., 2020, 97 p. (In Russian)
- Dregulo A.M. Identifikaciya i prognozirovanie klimaticheskoy nagruzki dlya proektirovaniya i ekspluatatsii ilovyh kart (ploshchadok) [Identification and prediction of climatic loads for design and operation of drying beds], *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2019, no. 1(77), p. 35–43. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.35-43. (In Russian)
- Dregulo A.M. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na ekspluatatsiyu prirodno-tekhnicheskikh sistem obrabotki othodov vodootvedeniya. [Influence of climatic factors on the operation of natural-technical systems for the sewage sludge treatment], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 32–40. (In Russian)
- Dregulo A.M., Kudryavcev A.V. Transformaciya tekhnoprirodnih sistem vodootvedeniya v obekty proshlogo ekologicheskogo ushcherba: problemy normativno-zakonodatel'noj bazy [Transformation of techno-natural systems of water treatment into the objects of past environmental damage: peculiarities of the legal and regulatory framework], *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2018, no. 3(75), p. 54–62. (In Russian)
- Dregulo A.M., Vitkovskaya R.F. Analysis of foreign and domestic practice of operating sludge platforms to minimize negative environmental impact, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 613, 012026, DOI: 10.1088/1755-1315/613/1/012026.
- El-Ariny A.S., Miller H.I. Utilization of Solar Energy for Sludge Drying Beds, *Journal of Solar Energy Engineering*, 1984, no. 106(3), p. 351–357, DOI: 10.1115/1.3267607.
- Evilevich A.Z. K raschetu ilovyh kart [To calculate drying beds], *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika*, 1957, no. 10, p. 30–32. (In Russian)
- Hrustalev L.N., Garagulja L.S. Gordeeva G.I. Prognoz srednegodovoj temperatury vozduha na territorii Respubliki

- Saha (Jakutija) po rezul'tatam retrospektivnogo analiza [Forecast of average annual air temperature on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) based on the results of a retrospective analysis], *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 2, p. 66–74. (In Russian)
- Kashulin N.A., Skuf'ina T.P., Dauval'ter V.A., Kotel'nikov V.A. Ustojchivoe vodopol'zovanie v Arktike. Novye podhody i reshenija [Sustainable water use in the Arctic. New approaches and solutions], *Arktika: ekologija i ekonomika*, 2018, no. 4(32), p. 15–29, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29. (In Russian)
- Morozov V.V., Kurbatova Z.I., Kurbatova E.P. Problemy obrashcheniya s tverdymi bytovymi othodami i zony ekologicheskogo bedstviya [Problems of handling solid household waste and environmental disaster zones], *Estestvennye nauki*, 2020, no. 1, p. 9–13. (In Russian)
- Pavlenko V.I. Arkticheskaja zona Rossijskoj Federacii v sisteme obespechenija nacional'nyh interesov strany [The Arctic zone of the Russian Federation in the system of ensuring national interests of the country], *Arktika: ekologija i ekonomika*, 2013, no. 4(12), p. 16–25. (In Russian)
- Selin V.S., Vasil'ev V.V. Tendencii i riski hozjajstvennoj dejatel'nosti v Arktike v uslovijah dolgovremennyh klimaticeskikh izmenenij [Trends and risks of economic activity in the Arctic under the long-term climate change], *Arktika i Sever*, 2011, no. 1, p. 125–133. (In Russian)
- SP 32.13330.2012. Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. Svod pravil [SP 32.13330.2012. Sewerage. Outdoor networks and structures. Set of rules], Moscow, Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2012, 85 p. (In Russian)
- Zhukov M.A., Krajnov V.N., Telesina V.N. Konceptual'nye osnovy gosudarstvennoj jekologicheskoj politiki v Arktike i drugih regionah novogo hozjajstvennogo osvoenija [Conceptual bases of the state environmental policy in the Arctic and other regions of new economic development], *Vestnik KRAGSiU. Serija "Teorija i praktika upravlenija"*, 2017, no. 18, p. 153–159. (In Russian)
- Zolina O.G., Bulygina O.N. Sovremennaja klimaticeskaja izmenchivost' karakteristik jekstremal'nyh osadkov v Rossii [Current climatic variability of extreme precipitation in Russia], *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, 2016, vol. 1, p. 84–103, DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103. (In Russian)
- Web sources*
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report. AMAP Secretariat, Oslo; Norway, URL: <https://oaarchive.arctic-council.org/handle/11374/923?show=full> (access date 15.04.2020).
- Ocenka doklada po "gorjachim tochkam" Barenceva regiona. Opisanie sostojanija 42 ishodnyh jekologicheskikh "gorjachih tochek" [Assessment of the report on the "hot spots" of the Barents region. The description of the state of 42 original environmental hot spots], *Otchet Akvaplan-niva, NEFKO/BFGT*, 2013, 133 p. (In Russian), URL: https://www.barentsinfo.fi/beac/docs/Environment_Ministers_Meeting_4_5_Nov_2013_Inari_HotSpots_Assessment_Report_RUS.pdf (access date 07.11.2019).
- Proekt v formate dvustoronnego sotrudnichestva "Klimaticheski nejtral'noe obrashchenie s othodami v Rossijskoj Federacii" [The project in the format of bilateral cooperation "Climate-neutral waste management in the Russian Federation"]. (In Russian), URL: <http://www.otxod.com/info.php?lang=ru> (access date 11.09.2019).
- Shelomencev A.G., Uhanova A.V., Smirennikova E.V., Voronina L.V. Ocenka prostranstvennogo razvitija regionov Arkticheskoi zony Rossijskoj Federacii [Assessment of spatial development in the regions of the arctic zone of the Russian Federation], *Regional'naja jekonomika i upravlenie: elektronnyj nauchnyj zhurnal*, 2018, no. 4(56), (In Russian), URL: <https://eee-region.ru/article/5613/> (access date 20.12.2019).
- Specializirovannye massivy dlya klimaticeskikh issledovanij [Specialized arrays for climate research], VNIIGMI-MCD, (In Russian), URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (access date 10.02.2018).

Received 05.06.2020

Revised 15.04.2021

Accepted 20.07.2021

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к публикации материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуется **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подписи к рисункам;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9, 11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прилагаются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а нерусскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

У Ч Р Е Д И Т Е Л И :

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD:

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNY, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии

С.И. БОЛЫСОВ, В.С. ТИКУНОВ

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л. 24
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.