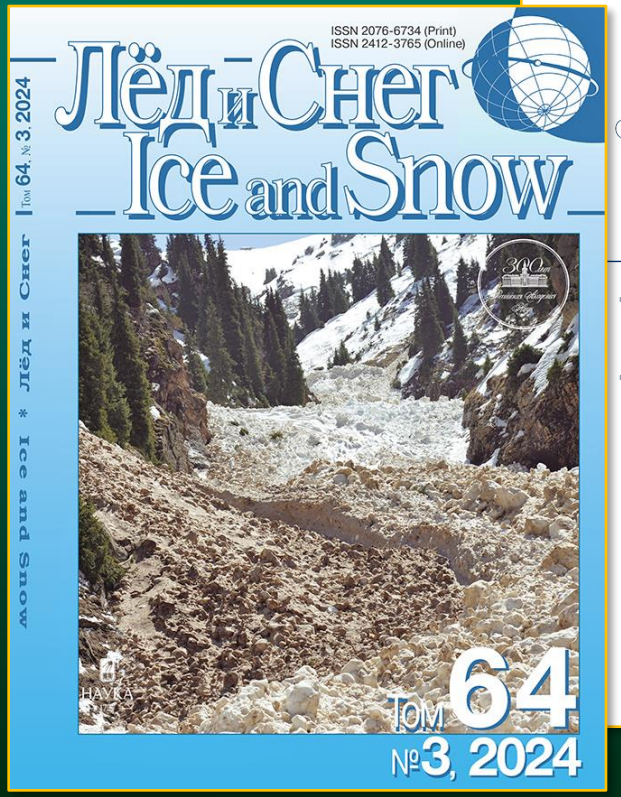
Презентация к отчёту по договору № 15/2024-И

Публикация журнала «Лёд и Снег»
и сборников «Вопросы географии».



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF GEOGRAPHY
RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

Лёд и Снег
Ice and Snow

Том 64, № 3, 2024

2024

СОДЕРЖАНИЕ

Том 64, номер 3, 2024

Ледники и ледниковые покровы

Математическое моделирование ледников Эльбруса в XXI в.
Часть 1. Гляциологическая модель и постановка численных экспериментов
Т. Н. Постникова, О. О. Рыбак, А. С. Губанов, Х. Зеколлари, М. Хусс 303

Математическое моделирование ледников Эльбруса в XXI в.
Часть 2. Прогноз эволюции ледников и формирования озёр при разных сценариях SSP
Т. Н. Постникова, О. О. Рыбак, А. С. Губанов, Х. Зеколлари, М. Хусс 326

Малые формы оледенения и климатические особенности Таймыра: новые оценки
М. Д. Ананичева, И. А. Корнева 345

Измерение и моделирование абляции на Сыгыктинском леднике (хребет Кодар)
Э. Ю. Осипов, О. П. Осипова 358

Изотопный состав ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) ледникового льда Камчатки:
связь с современными климатическими изменениями в Тихоокеанском регионе
Ю. Н. Чижова, В. Н. Михаленко, И. А. Корнева, Я. Д. Муравьев, А. Г. Хайрединова, М. А. Воробьев 373

Новые данные о строении и движении ледника в районе посадочной площадки станции Новолазаревская (Восточная Антарктида)
А. С. Боронина, М. П. Кашкевич, С. В. Попов, Е. М. Михайлов, А. Е. Дружин 387

Снежный покров и лавины

Альбедо снежного покрова и его параметризация для целей моделирования природных систем и климата
Д. В. Турков, Е. Д. Дроздов, А. А. Ломакин 403

Оценка термического сопротивления снежного покрова в условиях Западного Шпицбергена
Н. И. Осокин, А. В. Сосновский 420

Гидрохимическая характеристика снеговых и озёрных вод оазисов Антарктиды в районах размещения научных станций
С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик, С. Ю. Тарасенко, К. О. Рябчин, Ю. Г. Кокош, П. В. Курман 431

Подземные льды и наледи

Метан в пластовых льдах Восточной Чукотки как индикатор их генезиса
Л. П. Кузякин, А. А. Маслаков, П. Б. Семёнов, Н. Г. Белова, Ю. К. Васильчук, А. О. Киль 447

Прикладные проблемы

Влияние «отжига» на удельную энергию разрушения послойно намороженного льда
В. А. Джуманджи, А. В. Шавлов, И. В. Соколов, Е. С. Яковенко 464

ЛЁД И СНЕГ, 2024, № 3, с. 303–325

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.321.84

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДНИКОВ ЭЛЬБРУСА В XXI В. ЧАСТЬ 1. ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2024 г. Т. Н. Постникова[1,4*], О. О. Рыбак[1,2,3], А. С. Губанов[4], Х. Зеколлари[5], М. Хусс[6,7,8]

[1]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия
[2]Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия
[3]Earth System Science and Departement Geografie, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium
[4]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[5]Department of Water and Climate, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium
[6]Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich, Zürich, Switzerland
[7]Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Switzerland
[8]Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland
*e-mail: tasinidze@gmail.com

Поступила 14.01.2024 г.
После доработки 14.06.2024 г.
Принята к печати 08.07.2024 г.

Выполнен прогноз изменения параметров ледников Эльбруса до 2100 г. В модели расчёт поверхностного баланса массы производится с учётом влияния трансформирующегося моренного покрова; движение льда и морены рассчитывается с помощью уравнения неразрывности. Адаптация модели к ледникам Эльбруса включает в себя задание экзарационного источника моренного покрова, что соответствует геологическим особенностям региона.

Ключевые слова: горные ледники, математическая модель, гляциологическое моделирование, численные эксперименты, изменение климата, климатические проекции, CMIP6, Эльбрус, прогляциальные озёра

DOI: 10.31857/S2076673424030015, EDN: IOSHOQ

ВВЕДЕНИЕ

Исследования оледенения Эльбруса и климатических условий в регионе имеют длительную, более чем столетнюю, историю (Золотарев, Харьковец, 2012). Накопленные к настоящему времени данные позволяют детально восстановить фактическую сторону современного состояния трёх десятков ледников Эльбруса, климатических условий на них, а также оценить масштабы и параметры изменения оледенения Эльбруса на протяжении десятилетий (Золотарев, 2009; Золотарев, Харьковец, 2012; Торопов и др., 2016; Kutuzov et al., 2019). Особо стоит отметить две фундаментальные монографии, опубликованные с интервалом в половину столетия (Оледенение Эльбруса, 1968; Ледники и климат Эльбруса, 2020), в которых собраны и обобщены сведения об этом уникальном природном объекте.

Объём оледенения Эльбруса составлял в 2017 г. 5.03±0.85 км^3, 68% которого находилось ниже 4000 м над ур. моря со средней толщиной снежно-ледовой толщи 44.6±7.3 м (Kutuzov et al., 2019). Его площадь по состоянию на тот же год оценивалась в 112.20±0.58 км^2, что составляло немногим менее 10% площади оледенения всего Большого Кавказа (1132±0.58 км^2 по состоянию на 2014 г. (Tielidze, Wheat, 2018)).

Реки, берущие начало на склонах Эльбруса, относятся к бассейнам Чёрного и Каспийского морей. Учитывая, что доля ледникового стока в общем стоке рек северного склона Большого Кавказа оценивается в 1–9%, однако в тёплый период года на отдельных реках может достигать 40–45% (Лурье, Панов, 2013), можно предположить, что значительный по региональным меркам масштаб оледенения Эльбруса должен оказывать определённое влияние на формирование режима речного стока в регионе и косвенным образом на экосистемы.

В одном ледниковом массиве наблюдаются существенные региональные различия: ледники

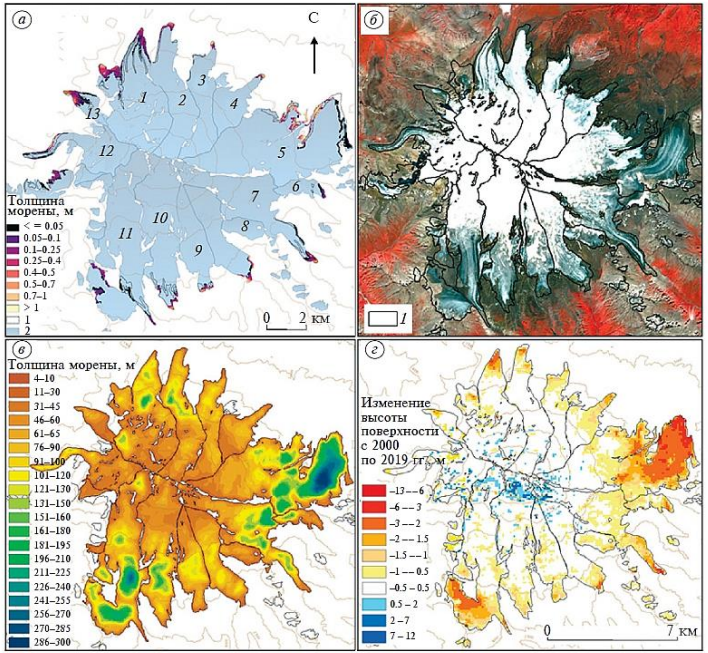


Рис. 1. Эльбрус. (*а*) Ледники Эльбруса (*1* – Уллучиран, *2* – Карачаул, *3* – Уллукол, *4* – Микелчиран, *5* – Джикаугенкёз, *6* – Ирикчат, *7* – Ирик, *8* – Теркол, *9* – Гарабаши, *10* – Малый Азау, *11* – Большой Азау, *12* – Кюкюртлю, *13* – Битюгтюбе); *1* – области, покрытые моренным чехлом по состоянию на 2000 г., *2* – очертания ледников в 2000 г. согласно RGI6.0. (*б*) Снимок со спутника Sentinel-2 (дата съёмки 01.09.2023). *1* – очертания ледников в 2000 г. согласно RGI6.0. (*в*) Толщина ледников на 2000 год (м) (данные Huss, Farinotti et al., 2012, обновлены в 2019 авторами); (*г*) Изменение высоты поверхности ледников с 2000 по 2019 г. (м) (данные Hugonnet et al., 2021)

Fig. 1. Elbrus. (*a*) Elbrus glaciers (*1* – Ulluchiran, *2* – Karachaul, *3* – Ullukol, *4* – Mikelchiran, *5* – Dzhikiugankoz, *6* – Irikchat, *7* – Irik, *8* – Terkol, *9* – Garabashi, *10* – Maliy Azau, *11* – Bolshoy Azau, *12* – Kyukyurtlyu, *13* – Bityugtyube); *1* – areas covered by debris cover as of 2000, *2* – outlines of glaciers in 2000 according to RGI6.0. (*b*) Sentinel-2 satellite image (imaging date 01.09.2023). *1* – outlines of glaciers in 2000 according to RGI6.0. (*в*) Glacier thickness as of 2000 (data from Huss, Farinotti et al., 2012, updated in 2019 by the authors); (*г*) Change in glacier surface elevation from 2000 to 2019 (m) (data from Hugonnet et al., 2021)

прогностические количественные оценки его к настоящему времени отсутствуют. Были проведены исследования более глобального масштаба, относящиеся, в частности, к оледенению всего северного склона Большого Кавказа в целом (Лурье, Панов, 2014), но прогноз эволюции самих ледников Эльбруса до настоящего времени не выполнялся. Оценки составляющих баланса массы ледников Эльбруса в конце XIX столетия были получены в работе (Рыбак и др., 2019). Однако в ней не учитывались потенциальные изменения конфигурации ледников. Полноценных же количественных

ЛЁД И СНЕГ, 2024, № 3, с. 403–419

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛАВИНЫ

УДК 551.321.82

АЛЬБЕДО СНЕЖНОГО ПОКРОВА И ЕГО ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И КЛИМАТА

© 2024 г. Д. В. Турков[1], Е. Д. Дроздов[1,2]*, А. А. Ломакин[3,4]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
[4]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
*e-mail: drozdov.jeka@yandex.ru

Поступила 17.05.2024 г.
После доработки 07.06.2024 г.
Принята к печати 08.07.2024 г.

Предложена новая схема параметризации альбедо снежного покрова, учитывающая большинство факторов, важных для метаморфизма снега. Проведено тестирование новой схемы параметризации альбедо снега в составе модели LSM SPONSOR по данным многолетних наблюдений. Показано, что новая схема позволяет получать несмещённые оценки альбедо со статистическими характеристиками, близкими к тем, что получены для данных наблюдений.

Ключевые слова: снежный покров, альбедо, моделирование, параметризация, модель SPONSOR

DOI: 10.31857/S2076673424030079, EDN: INVIGY

ВВЕДЕНИЕ

Для прогноза изменений климатической системы и для моделирования климата большое значение имеет адекватное описание свойств и структуры снежно-ледового покрова Земли, а также их сезонной и многолетней динамики (Vavrus, 2007; Snow and Climate, 2008; Котляков, 2010). Благодаря экстремальным теплофизическим характеристикам и продолжительности залегания на обширных площадях суши, высокой естественной пространственно-временнóй изменчивости и чувствительности к изменениям климата снежный покров оказывает значительное влияние практически на все процессы взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью. Большое влияние на потоки энергии на границе снег/атмосфера оказывают радиационные свойства снежного покрова, прежде всего его отражающая способность, характеризующаяся коэффициентом отражения – альбедо. Снежно-ледяной покров имеет максимальное альбедо для естественных поверхностей на Земле, которое по данным наблюдений превышает в среднем 80% и может достигать в отдельные периоды 90–95% (Кузьмин, 1957; Снег, справочник, 1986; Красс, Мерзликин, 1990).

Лучистая энергия Солнца, приходящая на поверхность Земли, перекрывает спектральный диапазон от 0.3 до 4 мкм, включающий ультрафиолетовую (УФ, до 0.4 мкм), видимую (0.4–0.8 мкм) и ближнюю инфракрасную (БИК, 0.8–4 мкм) области (Матвеев, 1984). Высокая отражательная способность снежного покрова обусловлена сочетанием его микроструктуры с оптическими свойствами льда. В видимой и ультрафиолетовой частях спектра чистый лёд почти прозрачен (коэффициент поглощения составляет от 0.02 до 0.05 см$^{-1}$), в то время как в ближнем инфракрасном спектре (БИК) поглощение увеличивается до тех пор, пока лёд не прекратит быть квазипрозрачным для длин волн больше 1.5 мкм (Красс, Мерзликин, 1990). Показатель преломления чистого льда близок к 1.30. Фотон, падающий на поверхность снега, преломляется или отражается при каждом столкновении с поверхностью раздела лёд/воздух до тех пор, пока он либо не будет поглощён, либо покинет слой снега. В видимом диапазоне длин волн и при низком содержании примесей в снегу фотон может проходить большие расстояния сквозь лёд, не поглощаясь, и, следовательно, может многократно преломляться и отражаться внутри снежного покрова, так что очень велика вероятность, что фотон покинет слой снега. Это объясняет высокую отражательную способность чистого снега в видимом и УФ диапазоне длин волн (Wiscombe, Warren, 1980). Если снег содержит много примесей, вероятность того,

что фотоны будут поглощены внутри снежной толщи, намного выше, и, следовательно, альбедо такого снега меньше. Естественно, для высокой отражательной способности требуется достаточно глубокий слой снега, чтобы фотоны могли свободно рассеиваться по его глубине. На практике это предположение справедливо для снега глубиной более 10 см.

В видимом и УФ диапазоне отражательная способность снега сравнительно мало зависит от размера и формы зёрен. Поглощение солнечного излучения льдом увеличивается в БИК-диапазоне, что уменьшает вероятность выхода фотонов за пределы снежной толщи и, следовательно, уменьшает отражательную способность снега. Эта вероятность в первую очередь зависит от расстояния, пройдённого фотоном внутри ледяных зёрен во время многократных преломлений и отражений. Если кристаллы в снежной толще крупные и объёмные, а не мелкие и плоские, то это расстояние больше, поэтому альбедо снега в БИК-диапазоне обычно сильно уменьшается с увеличением размера зёрен (рис. 1). Изменчивость альбедо в БИК-диапазоне солнечного спектра вносит основной вклад в изменчивость интегрального альбедо чистого снежного покрова. Доля солнечного излучения на уровне земной поверхности, приходящаяся на БИК-диапазон, весьма изменчива и зависит от толщины слоя атмосферы, проходимого солнечным излучением, высоты Солнца, облачности, влажности атмосферы и наличия примесей. По данным измерений, эта доля у поверхности Земли может составлять от 45–50 до 75% всей энергии солнечного излучения и сильно меняться даже в течение суток (Кондратьев, 1965; Матвеев, 1984). Такая высокая изменчивость спектрального состава солнечного излучения дополнительно влияет на высокую изменчивость альбедо снежного покрова и вносит значительную неопределённость при прогнозировании и модельных расчётах его точных величин.

Благодаря различным механизмам метаморфизма, размер снежных зёрен и кристаллов, а также содержание примесей обычно увеличиваются с возрастом, поэтому альбедо снежного покрова, как правило, уменьшается со временем, пока поверхность не покрывается свежим снегом. В период

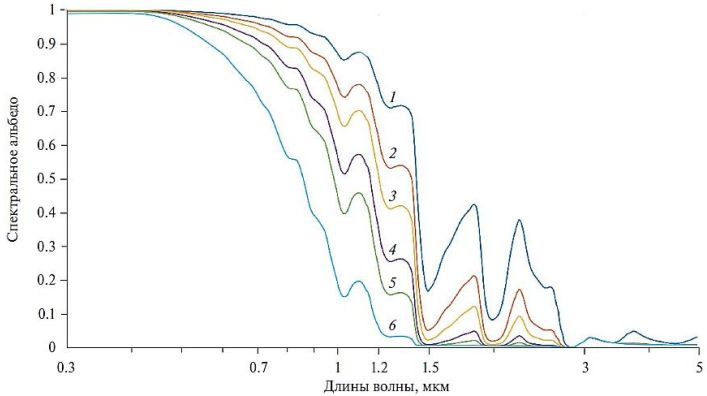


Рис 1. Пример расчёта зависимости спектрального альбедо толстого (>10м) чистого слоя снега от размера частиц. Форма частиц – сферическая, зенитный угол Солнца – 60 градусов, солнечное излучение – прямое, плотность снега 200 кг/м^3. Расчёт произведён с помощью SNICAR-AD v4 с оптическими константами по (Warren, Brandt, 2008). Размер частиц: *1* – 30 мкм, *2* – 100 мкм, *3* – 200 мкм, *4* – 500 мкм, *5* – 1000 мкм, *6* – 5000 мкм

Fig. 1. An example of calculating the dependence of the spectral albedo of a thick (>10 m) pure snow layer on particle size. The shape of the particles is spherical, solar-zenith angle is 60 degrees, solar radiation is direct, snow density is 200 kg/m^3. The calculation was performed using SNICAR-AD v4 with optical constants according to (Warren, Brandt, 2008). Particle size: *1* – 30 microns, *2* – 100 microns, *3* – 200 microns, *4* – 500 microns, *5* – 1000 microns, *6* – 5000 microns

ЛЁД И СНЕГ, 2024, № 3, с. 447–463

ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 551.345

МЕТАН В ПЛАСТОВЫХ ЛЬДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ КАК ИНДИКАТОР ИХ ГЕНЕЗИСА

© 2024 г. Л.П. Кузякин[1]*, А.А. Маслаков[1], П.Б. Семёнов[2], Н.Г. Белова[1], Ю.К. Васильчук[1], А.О. Киль[2]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[2]*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия*

**e-mail: kuzlakin@geogr.msu.ru*

Поступила 16.04.2024 г.
После доработки 30.05.2024 г.
Принята к печати 08.07.2024 г.

Содержание метана в газовых включениях пластовых льдов Восточной Чукотки варьирует от 1 до 1582 ppmv. Подтверждены ранее выдвинутые предположения о погребённом (2 ppmv) и внутригрунтовом (432 ppmv) генезисе для двух залежей. Вопрос о генезисе третьей залежи остался открытым, а в четвёртой залежи полученные результаты (2 ppmv) поставили под сомнение ранее выдвинутую гипотезу об её внутригрунтовом происхождении.

Ключевые слова: пластовый лёд, метан, криостратиграфия, Восточная Чукотка, многолетнемёрзлые породы

DOI: 10.31857/S2076673424030106, **EDN:** INGZDK

ВВЕДЕНИЕ

Пластовые льды – это выделенные по форме залегания (горизонтально или наклонно) ледяные скопления мощностью от 0.3–0.5 м до 30–50 м и протяжённостью от нескольких десятков метров до 1 км и более. Глубина залегания варьирует от 3–5 м до первых сотен метров (Втюрин, 1975).

Пластовые льды активно исследуются с 1960-х годов. Первые залежи были обнаружены в Западной Сибири и на Чукотке. Впоследствии география пластовых льдов расширилась и к настоящему времени они обнаружены в Большеземельской тундре, на Полярном Урале, Таймыре, Арктических островах, северо-западе Канады, Канадском Арктическом архипелаге и на Аляске. Актуальность их исследования связана с двумя основными проблемами. Первая относится к палеогеографии: понимание механизмов образования конкретных ледяных залежей, а также корректная интерпретация их структуры, химического и изотопного состава позволяют восстановить историю формирования и промерзания вмещающих отложений. Вторая проблема связана с рельефообразующей деятельностью приповерхностных ледяных залежей, которые при определённых условиях способствуют процессу криогенного оползания, проявляющемуся в виде движения переувлажнённых оттаявших пород слоя сезонного оттаивания по кровле ледяной залежи с формированием особых форм рельефа – термокаров и термоцирков. При этом индикация пластовых льдов затруднена из-за их слабой связи с рельефом и растительностью. Дополнительные трудности вносит большое разнообразие генетических типов пластовых льдов, каждый из которых формируется благодаря сложному сочетанию локальных экзогенных, криогенных и, реже, эндогенных процессов (например, Васильчук, 2012).

Определение генезиса пластовых льдов остаётся ключевым вопросом при их исследовании. На сегодняшний день существует несколько десятков гипотез, объясняющих механизм формирования пластовых льдов, которые можно разделить на две группы. Первая подразумевает аллохтонное (погребённое) происхождение пластовых льдов. Погребённым может оказаться ледниковый, наледный, морской, речной, озёрный лёд, или даже снежник. Сторонниками гипотезы первично-поверхностного (синоним погребённого) происхождения является ряд крупных исследователей: Ф.А. Каплянская, С.Ю. Королёв, Л.Н. Крицук, И.А. Некрасов, В.И. Соломатин, В.Д. Тарноградский, Н.В. Тумель и др.

Определение концентраций метана. Газохроматографический (далее – ГХ) анализ углеводородных газов (далее – УГ) C1–C5 в газовой/паровой фазе талой воды льдов выполнен на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014, оснащённом капиллярной колонкой Restek Rt-Aluminia BOND/Na2SO4 (40 м) и пламенно-ионизационным детектором (ПИД). В качестве газа-носителя использовали гелий при скорости потока 25 мл/мин.

Для калибровки приборов использовалась сертифицированная газовая смесь (ГЭТ 154-2001) (ГОСТ 8.578-2002), включающая 11 углеводородных газов (метан, этан, этилен, пропан, пропилен, i-бутан, n-бутан, бутен-1+ i-бутилен, i-пентан, n-пентан). Погрешность измерений ГХ не превышала ±2.5%.

Так как собранные образцы пластовых льдов имели разный объём, то для удобства их сравнения полученные на хроматографе концентрации метана были пересчитаны с учётом объёма образца (из ppm в ppmv). Величина ppm (parts per million / миллионные доли) является безразмерной и может быть применена к любой концентрации вещества (по массе или по объёму), в то время как величина ppmv (parts per million by volume / объёмные миллионные доли) чётко указывает на концентрацию вещества в определённом объёме.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изученные залежи пластового льда. В результате отмеченного ранее роста приземной температуры воздуха на территории Восточной Чукотки отмечается активизация эрозионных процессов, в частности, образование криогенных оползней (англ. *retrogressive thaw slumps*), которые часто развиваются в отложениях, содержащих залежи пластового льда. Изучение пластовых льдов ведётся коллективом авторов с 2016 г. Всего было изучено шесть залежей льда на относительно локальном участке севера Мечигменского залива и южного побережья залива Лаврентия (Vasil'chuk et al., 2021). Однако в данной работе рассматриваются только те из них, для которых было выполнено исследование содержания метана в газовых включениях внутри льда.

Залежь «23-й км-Запад». Пластовая ледяная залежь на побережье Мечигменского залива (рис. 2), в 8.3 км к западу от устья р. Аккани (Чульхевеем),



Рис. 2. Залежь пластового льда «23-й км-Запад», исследованная в 2018 г. (Vasil'chuk et al., 2021)
Fig. 2. Massive ice body "23 km-West", studied in 2018 (Vasil'chuk et al., 2021)

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК. 551.467: 539.4

ВЛИЯНИЕ «ОТЖИГА» НА УДЕЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ РАЗРУШЕНИЯ ПОСЛОЙНО НАМОРОЖЕННОГО ЛЬДА

© 2024 г. В.А. Джуманджи, А.В. Шавлов*, И.В. Соколов, Е.С. Яковенко

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия
**e-mail: shavlov@ikz.ru*

Поступила 15.02.2024 г.
После доработки 14.05.2024 г.
Принята к печати 08.07.2024 г.

Методом ударного разрушения исследована удельная объёмная энергия разрушения льда, приготовленного из дистиллированной воды. Установлено влияние отжига (выдержки льда при температуре близкой к точке плавления) на данную характеристику. Показано, что пятичасовой отжиг при температуре –1.5 °С приводит к уменьшению объёма разрушения и упрочнению льда, а отжиг при температуре около 0 °С – к увеличению объёма разрушения и снижению прочности.

Ключевые слова: лёд, кристаллизация, отжиг, прочность, удельная энергия разрушения

DOI: 10.31857/S2076673424030115, EDN: INGMWT

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное освоение северных и восточных регионов страны способствует развитию и распространению технологий использования льда в качестве строительного материала (Petrov, 2019; Гриневич и др., 2020; Orlov, Orlova, 2022). Накоплен значительный опыт в использовании льда при строительстве временных дорог и переправ (Бернштейн, 1935; Умеренное намораживание..., 1982), плотин и дамб (Вдовин, Краснов, 1986; Даниэлян и др., 1986). Лёд применяют для возведения искусственных островов с целью размещения на них оборудования (Войтковский и др., 1982; Край, 1983; Савельев, Латалин, 1986), успешно используют для теплоизоляции и поддержания низких температур в хранилищах (Бернал, 1966). Лёд успешно применяют в спорте при создании горнолыжных трасс с искусственным снежным покрытием (https://welcome.mosreg.ru/stories/gornolyznye-kurorty-podmoskov-a-kuda-otpravitsa-etoj-zimoj) и конькобежных треков (Tusima et al., 1998).

В большинстве практических применений строительный лёд должен иметь хорошую несущую способность, которая может быть обеспечена его высокой прочностью. Для повышения прочности в лёд добавляют армирующие добавки, способные принимать на себя часть механической нагрузки. Такими материалами могут быть древесная стружка (Perutz, 1948), водоросли (Дунаев, 1957), целлюлоза (Рыженков, 2015; Li, 2015), полимерные волокна (https://ndn.info/novosti/29327-armirovannyj-led-dlya-strojki-mostov-izobreli-v-sibiri) и т.д. Лёд с армирующими добавками называют льдокомпозитным материалом. Прочность льдокомпозитных материалов может в несколько раз превышать прочность чистого льда. Существует также термомеханический (не композитный) путь воздействия на механические свойства. Он заключается в применении ко льду методов, используемых в металлообработке, таких как термическая обработка (например, «отжиг», подразумевающий выдержку льда при температуре близкой к точке плавления) и термомеханическая обработка («отжиг» в присутствие нагрузки). В работе (Tatibouet et al., 1975) отжиг льда использовался для изменения его дислокационной структуры, вследствие которого изменялись ультразвуковые свойства льда. В работах (Шавлов, 1996; Шавлов и др., 2007) отжиг использовался для уменьшения скорости деформации льда. Авторы отмечали также влияние отжига на прочность, упругость, коэффициент трения льда. Детальной информации по влиянию отжига на механические характеристики льда мало. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в данной области знаний для выяснения перспектив применения методов термомеханической обработки с целью увеличения прочности льда, а также упрочнения льдокомпозитных материалов.

Цель работы состоит в продолжении проведённых на ледовом стадионе в Крылатском (Москва)

деформацию среды, сопровождающую движение трещины. Энергию удара можно представить в виде

$$W = \varepsilon_S\left(3a^2\right)\left(\frac{V_D}{a^3}\right) = 3V_D\frac{\varepsilon_S}{a}, \qquad (2)$$

где $3a^2$ – площадь поверхности одного осколка со средним размером a (коэффициент 3 вместо 6 использован потому, что в поверхностную энергию трещины включены энергии её левого и правого бортов), $\frac{V_D}{a^3}$ – количество осколков в разрушенном объёме V_D.

Объём разрушения представим в виде суммы объёма лунки и объёма разрушенного, льда под дном лунки (в приближении h, $d<<2R$)

$$V_D = V + \frac{\pi d^2}{4}\cdot h = \frac{\pi d^4}{64R}\left(1+\frac{16R}{d^2}\cdot h\right), \qquad (3)$$

где Δh – толщина разрушенного льда под дном лунки. Из (3) и (2) получим

$$d^4\left(1+\frac{16R}{d^2}\cdot h\right) = 6.8WR\frac{a}{\varepsilon_S} \qquad (4)$$

Из (4) следует, что диаметр лунки пропорционален корню четвёртой либо второй степени из величины $\left(WR\frac{a}{\varepsilon_S}\right)$ в зависимости от того, совпадает объём разрушенного льда с объёмом лунки или значительно превышает его, соответственно. Ниже будет показано, что в наших опытах работает закон корня четвёртой степени, то есть объём разрушенного льда равен объёму лунки.

Согласно (2) и (1), объёмная плотность энергии разрушения связана простым соотношением с энергией образования единицы площади поверхности трещины:

$$\varepsilon_V = \frac{3\varepsilon_S}{a}. \qquad (5)$$

Найдём связь предела прочности σ с величиной ε_V. После удара шара о поверхность льда шар останавливается в тот момент, когда нагрузка шара на лёд в точности равна пределу прочности. То есть,

$$\sigma = \frac{сила}{площадь} = \frac{mb}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4m}{\pi d^2}\frac{v^2}{2h} = \frac{4W}{\pi d^2 h} = \frac{4W}{\pi}\frac{8R}{d^4} = \frac{\varepsilon_V}{2}, \qquad (6)$$

где $b = \frac{v^2}{2h}$ – ускорение торможения шара, v – скорость шара в момент соприкосновения с поверхностью льда. При выводе формулы (6) учли, что потенциальная энергия шара полностью превращается в кинетическую $W = mgH = \frac{mv^2}{2}$, а также предположили, что объём разрушения равен объёму лунки. Итак, согласно формуле (6), предел прочности льда при ударном разрушении с точностью до численного коэффициента совпадает с удельной объёмной энергией разрушения.

Воспользуемся полученной формулой (4) и покажем, что диаметр лунки пропорционален корню четвёртой степени из величины энергии удара W или высоты падения шара H. На рис. 5 изображена экспериментальная зависимость биквадратов диаметров лунок d^4 от высоты падения шара H при температуре испытаний льда –12 °С. Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются прямой линией с наклоном $\frac{d^4}{H} = 8.78\times10^{-9}$ м^3. Таким образом, можно считать экспериментально установленным то, что объём разрушенного льда в опытах практически равен объёму лунки. Этот вывод подтверждается фотографией лунки льда (см. рис. 1, *а*), на которой часть слоя разрушенного льда отслоилась от дна лунки и выпала наружу. Толщина этого слоя не превышает нескольких долей миллиметра. В соответствии с формулой (4), эта толщина Δh должна быть меньше 0.4 мм. Именно тогда будет справедлива пропорциональная зависимость d от $H^{1/4}$.

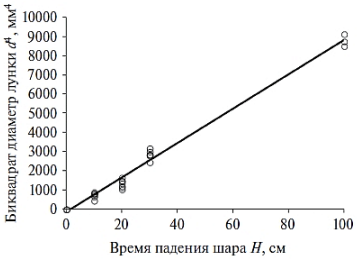
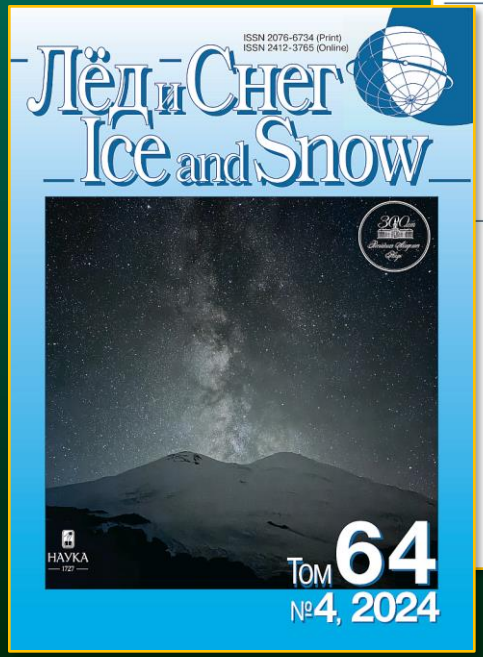


Рис. 5. Зависимость биквадратов диаметров лунок d^4 от высоты падения шара H при температуре испытаний льда –12 °С

Fig. 5. Dependence of the biquadratic diameters of the holes d^4 on the height of the fall of the ball H at an ice testing temperature of –12 °С



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF GEOGRAPHY
RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

Лёд и Снег
Ice and Snow

Том 64, № 4, 2024

2024

СОДЕРЖАНИЕ

Том 64, номер 4, 2024

Экспресс-информация

Гляциологические исследования Института географии РАН на Эльбрусе в 2024 г.
П. А. Торопов, И. И. Лаврентьев, А. Ю. Артамонов, Е. Д. Дроздов, Т. Д. Киселева, А. А. Абрамов, И. М. Сушинцев, А. И. Дестярев, А. Г. Хайрединова, Н. Э. Елагина 480

Ледники и ледниковые покровы

Роль турбулентного теплообмена в структуре теплового баланса ледников центральной части о. Западный Шпицберген, на примере ледника Альдегонда
У. В. Прохорова, К. В. Барсков, А. В. Терехов, Д. Г. Чечин, И. А. Репина, Б. В. Иванов, М. И. Варенцов, А. Ю. Артамонов 481

Сокращение ледников Южно-Чуйского хребта (Алтай) с максимума малого ледникового периода
Д. А. Ганюшкин, Д. В. Банцев, С. А. Гриц, Е. С. Даркач, О. В. Останин, Ю. А. Горбунова, В. А. Распутина, К. В. Чистяков 497

Сокращение оледенения хребта Орулган (Верхоянский хребет) в 1951–2023 гг.
А. Я. Муравьев, Т. Е. Хромова 513

Моделирование селевого потока при прорыве оз. Башкара в 2017 г.
А. С. Солодова, Д. А. Петраков, К. А. Пуганов 527

Особенности сточных приледниковых озёр Шпицбергена
К. В. Ромашова, Р. А. Чернов 543

Исследование структуры и химического состава неглубокого ледяного керна вулкана Ушковский
М. А. Воробьёв, С. С. Кутузов, М. М. Виноградова, А. Г. Хайрединова, Ю. Н. Чижова, В. Н. Михаленко 550

Баланс массы ледника ИГАН (Полярный Урал) в 2018–2023 гг.
Г. А. Носенко, А. Я. Муравьев, А. Н. Шеин, М. Н. Иванов, И. И. Лаврентьев, Я. К. Леопольд, А. И. Сицицкий, В. В. Токмаков 567

Снежный покров и лавины

Результаты экспедиционных исследований снежных лавин на о. Кунашир
Д. А. Баброва 580

Состав взвеси в снежном покрове западного сектора Российской Арктики
Е. И. Котова, Д. П. Стародымова, А. С. Лохов, О. П. Нецветаева 591

Морские, речные и озёрные льды

Состояние ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей в условиях современных изменений климата
Е. У. Миронов, Е. С. Егорова, Н. А. Лис 602

Подземные льды и наледи

Пещера на ледниковом куполе Лунный, остров Земля Александры, Земля Франца-Иосифа
Б. Р. Мавлюдов 620

Палеогляциология

Позднеголоценовая история ледника Шхельда, Северный Кавказ, по данным дистанционного зондирования, дендрохронологии и космогенного (^{10}Be) датирования морен
О. Н. Соломина, И.С. Бушуева, В. Джомелли 628

Изменения размеров ледникового купола Беллинсгаузена (остров Кинг-Джордж, Антарктика) в позднем голоцене
Б. Р. Мавлюдов 643

Обзоры и хроника

История создания второй российской полярной станции “Сагастырь” в лицах и обстоятельствах
Е. В. Александров 658

Содержание журнала за 2024 год [№ 1–4, том 64] 671

Алфавитный указатель [к тому 64 журнала «Лёд и Снег» за 2024 год] 673

ЛЁД И СНЕГ, 2024, № 4, с. 567–579

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.32

БАЛАНС МАССЫ ЛЕДНИКА ИГАН (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ) В 2018–2023 гг.

© 2024 г. Г. А. Носенко[1,*], А. Я. Муравьев[1], А. Н. Шеин[2], М. Н. Иванов[3], И. И. Лаврентьев[1], Я. К. Леопольд[2], А. И. Синицкий[2], В. В. Токмаков[4]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия
[2]Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия
[3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[4]ООО Техстройпроект, Чебоксары, Россия
*e-mail: nosenko@igras.ru

Поступила 18.09.2024 г.
После доработки 25.09.2024 г.
Принята к печати 07.10.2024 г.

В период 2018–2023 гг. на леднике ИГАН проводились наблюдения за состоянием баланса массы геодезическим методом. Сравнение полученных результатов с данными наблюдений предыдущих лет позволяет сделать вывод о сокращении массы ледника за исследуемый период, хотя это и не исключает возможность формирования на этом фоне положительного баланса массы в отдельные годы.

Ключевые слова: сокращение ледников, геодезический баланс массы, космические снимки, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S2076673424040074, **EDN**: HTIDLX

ВВЕДЕНИЕ

В условиях изменений климата, происходящих в последние десятилетия, особую актуальность приобретают наблюдения за состоянием баланса массы ледников на нашей планете, которые, с одной стороны, служат естественными индикаторами современных климатических трендов, а с другой – важным компонентом криосферы, имеющим, к сожалению, ограниченный ресурс (IPCC, 2023). Поэтому Международная служба мониторинга ледников (WGMS – World Glacier Monitoring Service, https://wgms.ch/) проявляет в последние годы повышенную активность, привлекая внимание общественности к результатам таких наблюдений, выполняемых по единой методике в разных ледниковых районах Земли. Эти результаты свидетельствуют об отрицательном балансе массы и увеличении скорости сокращения ледников. Особую ценность в этом отношении представляют ледники с длинными рядами наблюдений. Ледник ИГАН, расположенный на Полярном Урале, относится к числу таких ледников, поскольку имеет один из самых длинных рядов инструментальных наблюдений за балансом массы на Полярном Урале, который был начат в 1958 г. в рамках программы Международного геофизического года (Троицкий и др., 1966). Несмотря на то, что этот ряд прерывался, он достаточно информативен, чтобы судить о реакции ледников на изменения климата в данном районе (Shahgedanova et al., 2012; Носенко и др., 2020). Важным обстоятельством является то, что гляциологические наблюдения на леднике были возобновлены в 2000-х годах и продолжаются до сих пор (Шеин и др., 2024). Поэтому мы имеем возможность количественной оценки изменений состояния ледника в настоящее время и сравнений с результатами прошлых лет.

В работе представлены результаты наблюдений за балансом массы ледника ИГАН геодезическим методом с использованием DGPS-съёмок и построенных разновременных цифровых моделей поверхности ледника (ЦМР) за период 2018–2023 гг. На основе сравнения полученных результатов и данных исследований предыдущих лет (1963, 2008 и 2018 гг.) показана общая тенденция изменения массы ледника и ее особенности на коротком временно́м интервале.

РАЙОН И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ледник ИГАН (66.01°в.д., 67.58°с.ш.) расположен на Полярном Урале на водоразделе между Европой и Азией (рис. 1). В Каталоге ледников СССР (Каталог..., 1966) он отнесён к ледникам

карово-долинного типа, хотя фактически состоит из двух различных по морфологии и режиму питания частей. Южная часть располагается на восточном подветренном склоне горы Харнаурды-Кеу (1246 м) на высоте порядка 1000 м и является типичным склоновым ледником. По ней проходит главный водораздел Уральских гор и часть стока поступает в бассейн Баренцева моря. Северная часть начинается в просторном крутостенном каре восточной экспозиции и поэтому относится к карово-долинному типу ледников. Сток с нее поступает в бассейн Карского моря. Южная часть существует благодаря повышенной концентрации осадков, создаваемой метелевым переносом, а у северной, кроме метелей, дополнительное питание создают лавины в тыловой части кара и вдоль высокого и крутого северного борта.

В середине прошлого века обе эти части соединяла широкая перемычка, благодаря которой они и были объединены в Каталоге под одним названием. Через эту перемычку часть льда склонового ледника поступала в карово-долинную и участвовала в формировании ее баланса массы. К началу XXI века площадь южной части сократилась почти вдвое и в последние годы остается практически неизменной – 0.17±0.03 км^2 (Носенко и др., 2020). Связь с северной частью в настоящее время практически утрачена (Шеин и др., 2024). Поэтому в данной работе основное внимание уделено исследованию изменений северной карово-долинной части ледника ИГАН (рис. 1), которая все еще остается самым большим ледником на Полярном Урале и представляет интерес для изучения взаимосвязей баланса массы и климата. Его площадь в 2018 г. составляла 0.51 км^2 (Носенко и др., 2020). Толщина льда по результатам радиолокационного зондирования достигает 114 м (Лаврентьев и др., 2023). Бурение в области границы питания ледника, выполненное в апреле 2023 г., подтвердило значительную толщину льда – был получен керн с глубины 90.8 м.

Из-за особенностей своего расположения и режима питания ледник ИГАН находится в более благоприятных условиях, по сравнению со многими ледниками Полярного Урала. Высотный диапазон расположения ледника (от 830 м на языке до 1100 м



Рис. 1. Ледник ИГАН 28.08.2022. Фото А.Н. Шеина
1– место расположения ледника ИГАН
Fig. 1. IGAN Glacier 28.08.2022. Photo by A.N. Shein
1 – location of the IGAN Glacier

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛАВИНЫ

УДК 550.42

СОСТАВ ВЗВЕСИ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2024 г. Е. И. Котова*, Д. П. Стародымова, А. С. Лохов, О. П. Нецветаева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
**e-mail: ecopp@yandex.ru*

Поступила 08.08.2024 г.
После доработки 11.09.2024 г.
Принята к печати 07.10.2024 г.

Исследован состав взвешенного вещества снежного покрова западного сектора Российской Арктики. Среднее содержание нерастворимого вещества в снеге района исследования составило 3.4 мг/л. Выявлены региональные особенности содержания элементов в нерастворимом веществе снега Кольского полуострова, севера Архангельской области и Ненецкого автономного округа. Определено влияние как природных, так и антропогенных факторов.

Ключевые слова: снежный покров, взвешенное вещество, металлы, Арктика

DOI: 10.31857/S2076673424040097, **EDN:** HTBZGJ

ВВЕДЕНИЕ

Арктика – зона накопления примесей, переносимых на большие расстояния (Lee et al., 2023). Районы за ее пределами могут вносить свой вклад в химический состав атмосферы и осадков, регистрируемых в этой зоне. Расположенные в Арктике антропогенные источники вносят дополнительный вклад в региональный уровень загрязнения. Воздушный перенос нередко самый быстрый путь поставки загрязняющих веществ, в том числе на удаленные от источников выбросов территории (Duce et al., 1991; Шевченко, 2006; Лисицын, 2011). Попадая в атмосферу, загрязняющие вещества переносятся воздушными потоками на разные расстояния и выпадают на подстилающую поверхность в результате «сухого» осаждения или вымываются атмосферными осадками, а как следствие увеличивают антропогенную нагрузку на наземные экосистемы (Голубева и др., 2010; Суркова и др., 2010; Stanek et al., 2011). Исследования процессов осадконакопления в Арктике и роли воздушного (эолового) переноса вещества (Шевченко, 2006; Система ..., 2012; Котова, Шевченко, 2014), в том числе изучение снежного покрова, являющегося природным архивом, показали значимую роль эолового материала в формировании осадочного материала в Арктике. Несмотря на актуальность данных исследований, недостаточно работ, охватывающих большие территории, а сравнение данных, полученных разными группами ученых затруднительно. Данная работа охватывает материковую часть западного сектора Российской Арктики: Кольский полуостров, север Архангельской области, Ненецкий автономный округ, что позволяет оценить региональные особенности состава взвеси в снежном покрове.

В настоящее время важно понять, насколько арктические экосистемы подвержены воздействию антропогенной деятельности и каковы особенности такого воздействия в разных районах. Возможное изменение характера атмосферной циркуляции и интенсивности осадков вследствие происходящего потепления климата может усилить перенос и потоки поллютантов из атмосферы (Schiedek et al., 2007; Pouch, Zaborska, 2015; Souza-Kasprzyk et al., 2024).

Цель работы – исследование особенностей состава взвешенного вещества снежного покрова западного сектора Российской Арктики зимой 2022/23 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы снежного покрова были отобраны на побережье Двинского, Онежского, Мезенского, Кандалакшского заливов Белого моря, территории Кольского полуострова, Ненецкого автономного округа, Беломорско-Кулойского плато, территории Сийского государственного природного биологического заказника регионального значения (Архангельская область), Пинежского государственного природного заповедника (Архангельская область)

(рис. 1). Точки отбора проб выбирали на ключевых участках, с учетом характерных ландшафтов. В качестве фоновых участков рассматривались удаленные от промышленных источников территории Сийского заказника (т. 18), Пинежского заповедника (т. 19), побережье Коровинской губы Печорского моря (Ненецкий заповедник) (т. 26).

Сбор взвешенного вещества, накопившегося в снежном покрове, проводился по методикам, принятым в практике изучения аэрозолей Арктики (Шевченко, 2000). Пробы отбирали из шурфа в период максимального снегонакопления (конец февраля – март) в 2023 г. в пластиковые герметично закрывающиеся ведра объемом 20 л с помощью пластикового пробоотборника на всю глубину залегания (исключая самый нижний слой), с замером сторон и глубины шурфа. На каждой площадке отбора определяли высоту снежного покрова, влагозапас, плотность снега.

После отбора пробы снега доставляли в лабораторию Северо-Западного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова в неизменном виде (таяние проб исключалось). Предварительно пробы обрабатывали на территории Ненецкого автономного округа непосредственно в районах работ. Поступившие пробы растапливали при комнатной температуре, проводили замеры уровня pH и минерализации талой фазы снежного покрова с

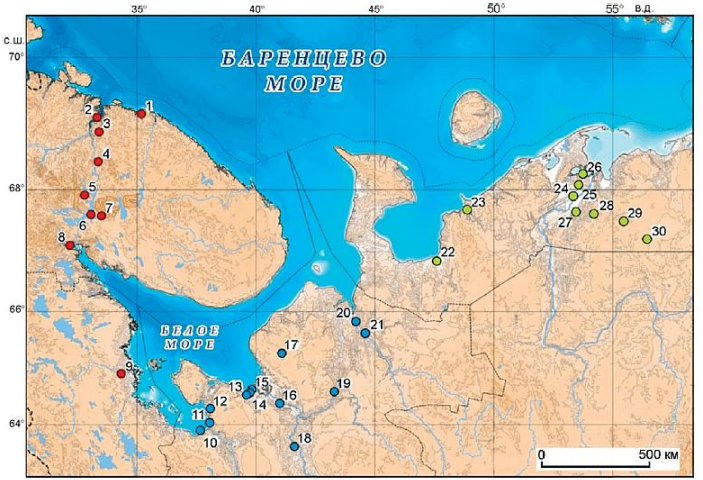


Рис. 1. Схема расположения площадок отбора проб снега

1 – побережье Баренцева моря (район села Териберка), *2* – Ретинское, *3* – Лисья гора, *4* – Мончегорск, *5* – Тайбола, *6*–*7* – Апатиты, *8* – Кандалакшский залив, *9* – Кемь, *10* – Ворзогоры, *11* – Онежский залив, *12* – Кянда, *13* – Солза, *14* – Северодвинск, *15* – о. Ягры, *16* – устье Северной Двины, *17* – Беломорско-Кулойского плато, *18* – Сийский госу. природный биологический заказник регионального значения, *19* – Пинежский гос. природный заповедник, *20* – устье р. Мезень, *21* – устье р. Пеза, *22* – устье р. Пеша, *23* – устье р. Индига, *24*–*26* – устье р. Печора, *27*–*30* – большеземельская тундра по маршруту Нарьян-Мар – пос. Харьягинский

Fig. 1. Scheme of positions of the sampling sites of snow

1 – Barents Sea coast (Teriberka village area), *2* – Retinskoe, *3* – Lisya Gora, *4* – Monchegorsk, *5* – Taibola, *6* – *7* – Apatity, *8* – Kandalaksha Bay, *9* – Kem, *10* – Vorzogory, *11* – Onega Bay, *12* – Kyanda, *13* – Solza, *14* – Severodvinsk, *15* – Yagry Island, *16* – estuary of the Northern Dvina River, *17* – Belomorsko-Kuloisky Plateau, 18 – Siisky State Natural Biological Reserve of regional importance, *19* – Pinezhsky State Natural Reserve, *20* – estuary of the Mezen River, *21* – estuary of the Peza River, *22* – estuary of the Pyosha River, *23* – estuary of the Indiga River, *24*–*26* – estuary of the Pechora River, *27*–*30* – Bolshezemelskaya tundra along the route Naryan-Mar – Kharyaginsky

МОРСКИЕ, РЕЧНЫЕ И ОЗЁРНЫЕ ЛЬДЫ

УДК 551.326

СОСТОЯНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

© 2024 г. Е. У. Миронов*, Е. С. Егорова, Н. А. Лис

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
**e-mail: mir@aari.ru*

Поступила 15.08.2024 г.
После доработки 05.09.2024 г.
Принята к печати 07.10.2024 г.

Рассмотрены многолетние изменения ледовитости Гренландского и Баренцева морей и выявлены отрицательные линейные тренды характеристики. Определен период преобладания отрицательных аномалий ледовитости. Показано, что в XXI в. происходит замещение толстых льдов более тонкими. Определены основные факторы, определяющие формирование ледовых условий и разработаны статистические модели межгодовых колебаний ледовитости.

Ключевые слова: ледовитость, возраст льда, многолетние изменения, Гренландское море, Баренцево море

DOI: 10.31857/S2076673424040105, **EDN**: HTBWKA

ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения климата в наибольшей степени проявляются в Арктике, где по разным оценкам (IPCC Report..., 2019) наблюдается ускоренный рост средней температуры приземного слоя атмосферы по сравнению с ростом глобальной температуры (примерно в 2.5 раза). Данное явление в литературе получило название Арктического усиления. Отличительной особенностью Северного Ледовитого океана (далее – СЛО) является постоянное наличие на его акватории ледяного покрова, который оказывает существенное влияние на природные процессы в Северном полушарии. Морские льды – значимый индикатор климатических изменений, поскольку современные средства дистанционного зондирования Земли из космоса позволяют оперативно получать сведения о ледовых условиях всего океана. В исследовании (Mironov et al., 2007) показано, что в зимний период изменчивость площади льдов Северо-Европейского бассейна имеет определяющее значение в общей дисперсии колебаний площади морских льдов СЛО.

Гренландское и Баренцево моря занимают особое место в климатической системе СЛО – это прежде всего обусловливается их географическим положением. Гидрометеорологический и ледовый режим формируется в данном регионе за счёт соседства с теплым Норвежским морем и холодным Арктическим бассейном. Так, сочетание крупномасштабных факторов циркуляции холодных и теплых течений, а также воздушных переносов определяет климат умеренных широт (*условное название зон, расположенных на поверхности земного шара между 40° и 65° с. ш.)*. Положение кромки дрейфующих льдов и площадь льдов достаточно быстро реагируют на внешние факторы. Толщина ледяного покрова (его возрастная структура) отражает их долгопериодные изменения и в большей степени влияет на хозяйственную деятельность в высоких широтах (судоходство, рыболовство, геологоразведка, освоение континентального шельфа и др.). Поэтому сезонные и многолетние изменения состояния ледяного покрова в регионе Северо-Европейского бассейна определяют актуальность работы.

Многочисленные исследования (Фролов и др., 2007; Алексеев и др., 2009) показывают, что за последние 100 лет в Арктике происходило чередование холодных и теплых периодов. Современное состояние арктического ледяного покрова – объект пристального внимания со стороны ученых и исследователей полярных регионов во всем мире. Известно, что с начала 2000-х годов изменение ледового режима морей СЛО характеризуется, с одной стороны, заметным сокращением площади льдов в летний период года (Юлин и др., 2019; Cai et al., 2021) и, с другой стороны, замещением старых льдов более тонкими однолетними (Егоров,

Таблица 1. Параметры ледовитости (выраженные в %), осредненной за ледовый сезон, в Гренландском и Баренцевом морях на выделенных этапах климатических изменений

Гренландское море			
Параметр, %	Этап увеличения (1949/1950–1981/1982)	Этап стационарности (1982/1983–1998/1999)	Этап уменьшения (1999/2000–2021/2022)
Ледовитость	47	41	33
Сезонный размах	33	21	16
СКО	±7	±6	±4
Баренцево море			
Параметр, %	Этап увеличения (1949/1950–1987/1988)	Этап стационарности (1988/1989–2003/2004)	Этап уменьшения (2004/2005–2021/2022)
Ледовитость	32	28	19
Сезонный размах	27	16	16
СКО	±6	±4	±3

Сезонным размахом здесь называется разница между максимальным и минимальным значением ледовитости в рамках одного этапа (увеличения, стационарности или уменьшения ледовитости). СКО – это среднеквадратическое отклонение.

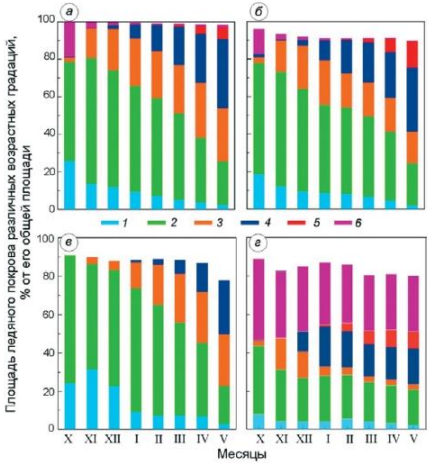


Рис. 3. Соотношение площадей льдов различных возрастных градаций в ледяном покрове западной (*а*), северо-восточной (*б*) и юго-восточной (*в*) частей Баренцева моря, а также Гренландского моря (*г*) в зимний период (выражены в % от общей площади льдов): *1* – начальные виды и нилас, *2* – молодые, *3* – однолетние тонкие, *4* – однолетние средние, *5* – однолетние толстые, *6* – старые

Fig. 3. Areal fractions of the ice of different age gradations for western (*a*), north-eastern (*б*) and south-eastern (*в*) sub-areas of the Barents Sea, as well as for the Greenland Sea (*г*) during the winter period (expressed % of the total ice area): *1* – initial types and nilas, *2* – young, *3* – first-year thin, *4* – first-year medium, *5* – first-year thick, *6* – old

ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 551.89; 551.32

ПЕЩЕРА НА ЛЕДНИКОВОМ КУПОЛЕ ЛУННЫЙ, ОСТРОВ ЗЕМЛЯ АЛЕКСАНДРЫ, ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА

© 2024 г. Б. Р. Мавлюдов*

Институт географии РАН, Москва, Россия
**e-mail: bulatrm@bk.ru*

Поступила 08.07.2024 г.
После доработки 26.08.2024 г.
Принята к печати 07.10.2024 г.

Приведены результаты обследования пещеры, расположенной в краевой части ледникового купола Лунного на острове Земля Александры, Земля Франца-Иосифа. Пещера была пройдена зимой и картирована. Длина сквозного канала пещеры равна 250 м, длина ходов – 380 м, перепад высот – 20 м. Пещера, вероятно, возникла в результате подледного перемещения канала под отепляющим действием водного потока при уклоне ложа ледника от края льда.

Ключевые слова: ледниковый купол, динамика оледенения, край ледника

DOI: 10.31857/S2076673424040119, EDN: HTBATQ

ВВЕДЕНИЕ

В условиях изменяющегося климата многие ледники стали быстро деградировать. В первую очередь этому способствует повышение температур воздуха. В основном это проявляется в усилении поверхностного таяния ледников. Однако ледники стали деградировать и изнутри благодаря развитию систем внутреннего дренажа.

Внутренние дренажные системы чаще всего встречаются в теплых и политермических ледниках (Мавлюдов, 2006; Gulley et al., 2009; Irvine-Fynn et al., 2011). Однако внутренний дренаж также встречается и в холодных ледниках полярных районов и в высокогорьях (Мавлюдов, 2006). Элементы внутреннего дренажа были обнаружены в очень холодном льду на ледниковом куполе Кропоткина на острове Земля Александры в архипелаге Земля Франца-Иосифа (Мавлюдов, 2019). Но этой информации недостаточно, чтобы понять морфологию пещеры и причины ее образования.

В августе–сентябре 2023 г. и в апреле 2024 г. автору удалось посетить остров Земля Александры в рамках экспедиции Русского географического общества и провести обследование ледниковой пещеры на соседнем ледниковом куполе Лунном. Именно результатам этих исследований и посвящена данная статья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для посещения пещеры не потребовалось специальное оборудование и снаряжение, кроме источников освещения. Для отбора проб льда внутри пещеры применялся ледоруб. Лёд упаковывался в полиэтиленовые пакеты, и после его таяния вода переливалась в пробирки для проведения в дальнейшем изотопного анализа.

Возникли трудности с картированием ледниковой пещеры. Летом 2023 г. при посещении пещеры не было приборов для проведения полуинструментальной топографической съёмки. В апреле 2024 г. оказалось, что использование компаса невозможно из-за сильной намагниченности горных пород. Выяснилось, что для съёмки можно использовать навигатор, так как в полости записывается GPS трек. Это дало возможность привязать к полученной нитке хода в отдельных точках ширину и высоту канала до свода. Все это позволило построить план и разрез пещерного канала.

Район работ

Земля Франца-Иосифа – архипелаг, расположенный в западном секторе Российской Арктики, самая северная суша России и Евразии. Архипелаг лежит на северной окраине арктического материкового шельфа Европы, часто называемого Баренцевым, между 81°52′ и 79°46′ северной широты и 44°45′ и 65°25′ восточной долготы. Вся земля

архипелага входит в территорию национального парка «Русская Арктика».

Остров Земля Александры расположен в самой западной части архипелага Земля Франца-Иосифа. Площадь острова составляет 1708.4 км^2, из которых ледниками покрыто около 1214.7 км^2, то есть 74.3% территории острова (Гросвальд и др., 1973). Остров имеет асимметричную дугообразную форму с выпуклой частью, ориентированной на север. По краям дуги расположены ледниковые шапки, а в средней части находится территория, свободная ото льда (рис. 1).

На западной части дуги острова расположен ледниковый купол Лунный, а на восточной – купол Кропоткина. Высота купола Лунного достигает 400 м, а купола Кропоткина – 314 м. Купол Лунный представлен двумя сомкнутыми ледниковыми шапками и вытянут почти субширотно. Купол Кропоткина также сложен двумя сомкнутыми ледяными шапками меньшего размера и вытянут субмеридионально. Купол Лунный почти всем периметром заканчивается в море, и только его восточная часть оканчивается на суше. Купол Кропоткина кроме северной части заканчивается в море. На морских участках обоих куполов имеются выводные ледники, которые сбрасывают айсберги в окружающее море. Участки обоих куполов, заканчивающиеся на суше, скорее пассивные с медленным или отсутствующим движением льда. Это подтверждается отсутствием моренных отложений перед фронтами ледников и других следов движения льда.

Климат архипелага типично арктический. Средняя годовая температура воздуха около −12 °С, средние температуры воздуха в июле до +2 °С, а в январе около −24 °С (минимальные температуры зимой до −52 °С), ветер временами достигает 40 м/с. Осадков выпадает от 200–300 до 500–550 мм в год.

Описание ледниковой пещеры

Ледниковая пещера расположена в самой восточной части ледникового купола Лунный. Из-за опасности обрушений кровли полости в сентябре 2023 г. удалось посетить только отдельные фрагменты ледниковой пещеры. В апреле 2024 г. прошли пещеру насквозь, так как она была полностью проморожена и не было опасности обрушений.

Вход в пещеру находится в южной части большой котловины с ледяными стенками, у юго-восточного края купола Лунный, который заканчивается на суше, у северной части морского залива – бухты Курникова. Вход в начальный грот зимой был наполовину заполнен снегом (рис. 2, *а*). От входа в грот вел спуск длиной около 15 м по снегу в зал шириной 20–25 м, высотой 6 м. Из зала имелось два выхода: один на юг, а второй – на юго-запад.

Над выходом к юго-западу на своде висели «занавеси» изморози до 0.5–0.7 м длиной, что говорило о выходе из этого хода более теплого воздуха под сводом (см. рис. 2, *б*). Вход в эту ветвь имел ширину около 11 м и высоту около 0.9 м, но сразу после входа высота поднималась до 2 м. От входа шла галерея на юго-запад шириной около 14 м и высотой около 2 м, на дне которой располагалось озеро глубиной около 4–5 м, находившееся подо льдом толщиной более 1 м (см. рис. 2, *в*). Озерный лед был прозрачен и разбит трещинами. По краям озера на высоте около 0.5 м над озерным льдом имелись массивные ледяные забереги, что говорит

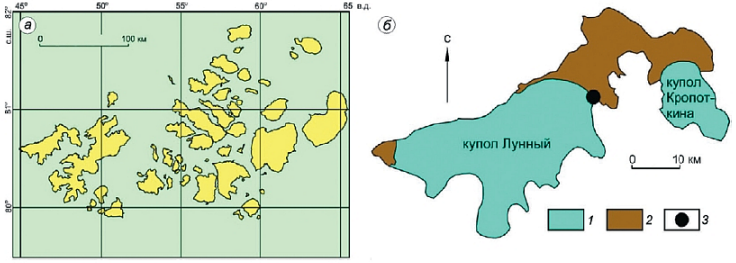


Рис. 1. Архипелаг Земля Франца Иосифа (*а*), о. Земля Александры (*б*). *1* – ледниковые купола, *2* – суша, свободная ото льда, *3* – положение ледниковой пещеры

Fig. 1. Franz Josef Land archipelago (*а*), Alexandra Land Island (*б*). *1* – glacial caps, *2* – ice–free land, *3* – locvation of the glacier cave

ПАЛЕОГЛЯЦИОЛОГИЯ

УДК 551.324.63

ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВАЯ ИСТОРИЯ ЛЕДНИКА ШХЕЛЬДА, СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ, ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ДЕНДРОХРОНОЛОГИИ И КОСМОГЕННОГО (^{10}Be) ДАТИРОВАНИЯ МОРЕН

© 2024 г. О. Н. Соломина[1,2], И. С. Бушуева[1,*], В. Джомелли[3]

[1]Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия
[3]Университет Экс-Марсель, Марсель, Франция
*e-mail: irinasbushueva@gmail.com

Поступила 03.09.2024 г.
После доработки 13.09.2024 г.
Принята к печати 07.10.2024 г.

По данным дистанционного зондирования, картографии, дендрохронологии и анализа космогенных изотопов (^{10}Be) установлены границы ледника Шхельда в 1880-х–2022 годах, во время наступаний в XIX в., а также около 0.5, 0.89 и 1.4–1.6 тыс. л.н.

Ключевые слова: колебания ледников, морены, космогенные изотопы, дендрохронология, малый ледниковый период, позднеантичный малый ледниковый период

DOI: 10.31857/S2076673424040123, **EDN:** HSWZYO

ВВЕДЕНИЕ

Ледник Шхельда (43.18 N, 42.64 E) – он же ледник Адыл или Шхильды, многократно был описан исследователями, посещавшими его начиная со второй половины XIX в. (Динник, 1884; Мушкетов, 1899; Ренгартен, 1895; Буш, 1914; Альтберг, 1928; Демченко, 1952; Ковалев, 1961; Никулин, Трошкина, 1974; Baume, Marcinek, 1998; Сейнова, Золотарев, 2001).

Одна из его главных отличительных особенностей – мощный чехол поверхностной морены, покрывающий язык. Предполагается (Сейнова, Золотарев, 2001), что из-за этой его особенности динамика ледника существенно отличается от остальных ледников региона. Так, для него, например, не зафиксировано улучшения состояния в 1960–70-е годы, когда климат на Кавказе стал несколько более благоприятным для ледников. С другой стороны, он продолжал наступать в 1880–1910-е годы, когда большинство ледников региона постепенно уменьшались в размерах после достижения своего максимума в малом ледниковом периоде ранее XIX в.

В работе приводится реконструкция положения фронта ледника по данным дешифрирования аэрофото-, космических снимков, старых карт и первые определения возраста морен ледника по космогенным изотопам; рассмотрены также результаты наших дендрохронологических и лихенометрических исследований.

Главная цель исследования – определение возраста позднеголоценовых морен ледника Шхельда. Это позволит в какой-то мере ответить на вопрос о том, насколько своеобразна динамика ледника, язык которого забронирован поверхностной мореной, и отличается ли она от других ледников региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод датирования с помощью космогенных изотопов в последние десятилетия широко применяется для определения возраста ледниковых отложений во всем мире. На Кавказе пока имеются лишь первые, немногочисленные датировки голоценовых морен (Solomina et al., 2016, Solomina et al., 2024).

Основу метода составляет измерение содержания изотопов некоторых элементов (например, ^{10}Be, ^{36}Cl), которые накапливаются в поверхностных слоях горных пород, например, в кварце (Balco, 2011). Поток космических лучей, проникая вглубь экспонированной поверхности, быстро

Таблица 2. Минимальный возраст морен ледника Шхельда

Точки	Даты
Береговые морены	
L1	1918 (**1916**) 1892 (1890) 1924 (1922) 1925 (1924)
L2	1916 (**1914**) 1926 (1924) 1925 (1922) 1930 (1929) 1930 (1928)
L3	1881 (**1880**) 1883 (1881) 1934 (1931) 1894 (1893)
L4	1888 (1887) 1895 (1895) 1892 (1891) 1918 (1918) 1881 (1880) 1881 (**1880**)
L5	1904 (1900) 1888 (1887) 1889 (1887) 1822 (**1820**) 1893 (1890) 1823 (1823) 1865 (1865) 1955 (1954)
Склон выше L5	1851 (**1850**) 1870 (1869) 1887 (1887) 1892 (1892)
Конечные морены	
M1 (1920-е гг.)	1977 (1976) 1973 (1972) 1968 (**1966**) 1980 (1976) 1982 (1981)
M2	1955 (1954) 1934 (1933) 1953 (1951) 1916 (1914) 1941 (1936) 1979 (1975) 1958 (1956) 1967 (1964) 1919 (**1916**) 1926 (1924)
M3	1960 (1959) 1918 (1917) 1920 (1919) 1945 (1940) 1891 (**1890**) 1909 (1904) 1921 (1917) 1981 (1979) 1963 (1961)
M4	1937 (1936) 1897 (1892) 1891 (1889) 1935 (1932) 1894 1943 (1941) 1876 (**1874**)

Номера морен соответствуют рис. 1. Годы – возраст первого годичного кольца, в скобках – с поправкой на недостающие кольца из-за неточности попадания в сердцевину при бурении. Жирным шрифтом выделен возраст самых старых деревьев. Для определения минимального возраста собственно морены от возраста самого старого дерева необходимо вычесть 20–30 лет (см. пояснения в тексте).

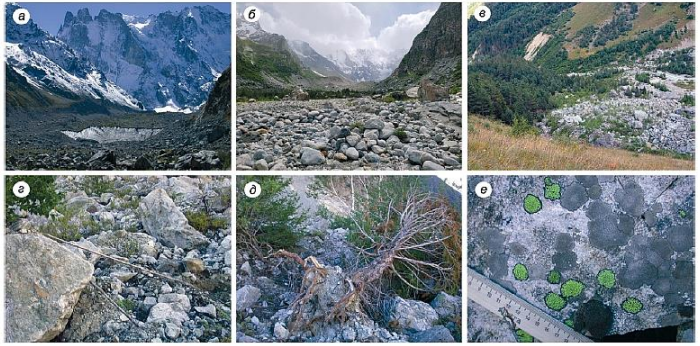
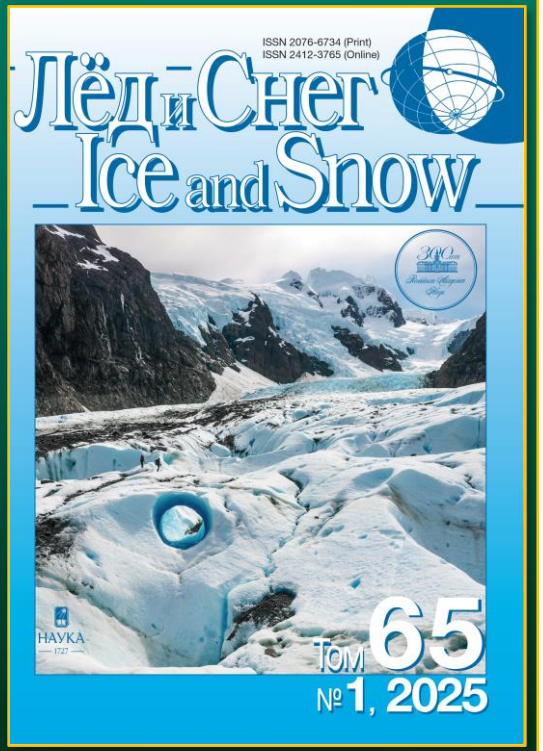


Рис. 1. Фотографии долины ледника Шхельда: *а* –общий вид долины Шхельда с обрывом мертвого льда, 14 сентября 2004 (фотография В. Джомелли); *б* – фотография В.Н. Михаленко, 12 июля 2023 г.; *в* – морена M1, 30 августа 2009 г. (фотография В. Джомелли); *г* – береза с удлиненными корнями на нестабильной поверхности мертвого льда; *д* – погибшая сосна на языке мертвого льда; *е* – лишайники на той же поверхности

Fig. 1. Photos of Shkhelda Glacier valley.

а – General view of the Shkhelda valley with dead ice cliff, September 14, 2004 (photo by V. Jomelli); *б* – photo by V. Mikhalenko, July 12, 2023; *в* – M1 moraine, August 30, 2009 (photo by V. Jomelli); *г* – birch with elongated roots on unstable surface of dead ice; *д* – dead pine on dead ice tongue; *е* – lichens on the same surface



Содержание

Информация

Гляциологические исследования ледника Бернал в Чилийской Патагонии в 2024 г.
Т. Д. Киселева 6

Ледники и ледниковые покровы

Согласованность орбитальных датировок ледяных кернов Востока и EPICA DC, основанных на зависимости газосодержания льда от местной инсоляции
В. А. Хомякова, Н. А. Тебенькова, В. Я. Липенков, Д. Рэйно 7-20

Моделирование снежного покрова на ледниках Кавказа и Камчатки
И. М. Сушинцев, Е. Д. Дроздов, П. А. Торопов, В. Н. Михаленко, М. А. Воробьев, А. Г. Хайреди нова 21-36

Динамика озёр на леднике Федченко за 2016–2021 гг.
С. В. Косковецкая 37-49

Снежный покров и лавины

Климатические характеристики влагозапасов снега на территории Пермского края
Н. А. Калинин, А. Д. Крючков, И. А. Сидоров, Р. К. Абдуллин, А. Н. Шихов 50-68

Возможности оценки дальности выброса лавин на Красной Поляне при отсутствии данных прямых наблюдений
Е. Д. Жукова, А. С. Турчанинова, Н. В. Коваленко, Д. А. Петраков 69-80

Эксперименты по применению инфразвукового метода дистанционного мониторинга снежных лавин в Хибинах
А. В. Федоров, И. С. Федоров, В. Э. Асминг, А. Ю. Моторин 81-92

Методика оценки температуры поверхности грунта под снежным покровом по данным измерений на Шпицбергене
А. В. Сосновский, Н. И. Осокин 93-102

Метеорологический режим и лавиноопасность зим на Кавказе в конце XXI века на основе результатов моделей CMIP6
И. А. Корнева, А. Д. Олейников, П. А. Торопов, Н. Е. Варенцова, Н. В. Коваленко 103-119

Морские, речные и озёрные льды

Пространственно-временная стационарность полыней моря Лаптевых
А. Б. Тимофеева, А. В. Рубченя, Р. И. Май 120-134

Подземные льды и наледи

Георадиолокационное зондирование наледей и аллювия наледных полян в долине р. Кюбюме, Оймяконское нагорье
Д. Е. Едемский, В. Е. Тумской, И. В. Прокопович 135-147

Модельные оценки изменений континентальной криолитозоны Северного полушария в XXI в.
М. М. Аржанов, И. И. Мохов 148-163

Палеогляциология

Характеристика минеральных частиц в ледниковом керне вулкана Ушковский
А. Г. Хайреди нова, М. М. Виноградова, М. А. Воробьёв, С. С. Кутузов, Ю. Н. Чижова, С. В. Закусин, В. Н. Михаленко 164-178

Экспресс-информация

Комплексные научно-исследовательские работы Горного университета на станциях Восток и Прогресс в сезон 70-й Российской Антарктической экспедиции
А. В. Большунов, С. А. Игнатьев, Д. В. Сербин, Г. Д. Горелик, Н. С. Крикун, Д. Е. Ушаков, И. А. Бабенко, А. В. Запрудский 179-184

ЛЁД И СНЕГ, 2025, том 65, № 1, с. 7–20

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324

СОГЛАСОВАННОСТЬ ОРБИТАЛЬНЫХ ДАТИРОВОК ЛЕДЯНЫХ КЕРНОВ ВОСТОКА И EPICA DC, ОСНОВАННЫХ НА ЗАВИСИМОСТИ ГАЗОСОДЕРЖАНИЯ ЛЬДА ОТ МЕСТНОЙ ИНСОЛЯЦИИ

© 2025 г. В. А. Хомякова[1], Н. А. Тебенькова[1,2], В. Я. Липенков[1,*], Д. Рэйно[3]

[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[3]Институт наук об окружающей среде, Гренобль, Франция
**e-mail: lipenkov@aari.ru*

Поступила 02.12.2024 г.
После доработки 09.12.2024 г.
Принята к печати 25.12.2024 г.

Представлены взаимно согласованные орбитальные шкалы возраста ледяных кернов станции Восток и проекта EPICA DC, построенные путем совмещения экспериментальных рядов газосодержания льда с расчётными кривыми местной летней инсоляции. Показано, что точность полученных датировок сопоставима с точностью оптимизированной многопараметрической временной шкалы AICC2023, которая считается наиболее совершенной на сегодняшний день для этих кернов.

Ключевые слова: газосодержание, местная летняя инсоляция, орбитальная настройка, временная шкала ледяного керна

DOI: 10.31857/S2076734250100017, **EDN:** GZQKLC

ВВЕДЕНИЕ

Керны древнего атмосферного льда, добываемые при колонковом бурении глубоких скважин в современных ледниковых покровах, содержат наиболее полную информацию о прошлых изменениях климата и газового состава атмосферы Земли в масштабах времени от десятков лет до сотен тысяч и миллионов лет. Полученные при их изучении данные используются для исследования причин и механизмов эволюции климата и для проверки способности климатических моделей воспроизводить прошлые (а, значит, предсказывать будущие) изменения климата нашей планеты. Одной из центральных проблем палеоклиматической интерпретации керновых данных остается определение возраста ледяных отложений и возраста захваченного ими атмосферного воздуха. От точности датировок зависят наши возможности правильно определять последовательность и продолжительность климатических событий и изучать фазовые соотношения между астрономическим форсингом (длиннопериодные вариации инсоляции, обусловленные периодическими изменениями параметров орбиты Земли) и различными климатическими реакциями (изменения температуры воздуха и концентрации парниковых газов в атмосфере, колебания уровня моря и т.д.).

На протяжении многих лет для датирования колонок ледяных кернов, полученных в областях с низкой аккумуляцией снега, использовался комбинированный метод, включающий моделирование ледникового покрова на основе заданных временных изменений характеристик климата на поверхности ледника и условий на его ложе и последующее согласование реконструированных палеоклиматических рядов с другими климатическими сигналами, независимо датированными, в том числе с помощью методов орбитальной настройки (Kawamura et al., 2007; Parrenin et al., 2007; Salamatin et al., 2009). Преимущество такого подхода состоит в системном использовании всего комплекса палеоклиматической информации, заключенной в датируемом керне льда. Вследствие этого установленная хроностратиграфическая шкала оказывается неразрывно связанной с палеоклиматическими рядами, восстановленными по керновым данным, что позволяет взаимно согласовывать результаты исследований, выполненных различными методами.

В последнее время получил развитие байесовский подход к согласованию и синхронизации максимального числа независимых датировок, полученных различными методами для кернов, добытых в разных пунктах бурения антарктического

для анализа климатических рядов (Melice, Servain, 2003), описан в работе (Скакун, Липенков, 2016).

На рис. 1 показаны отфильтрованные и нормированные ряды *V* и ISI для кернов Востока (см. рис. 1, *а*) и EDC (см. рис. 1, *б*), а также результаты расчёта мгновенного временного запаздывания предварительно датированных рядов *V* относительно расчетных рядов ISI для этих кернов (см. рис 1, *в*). Корректируя предварительную датировку рядов газосодержания на величину запаздывания, получаем орбитальную (абсолютную) временную шкалу керна, обеспечивающую наилучшее совмещение экспериментальных рядов газосодержания льда с расчётными рядами инсоляции.

Отметим, что установленные таким образом индивидуальные орбитальные шкалы для кернов

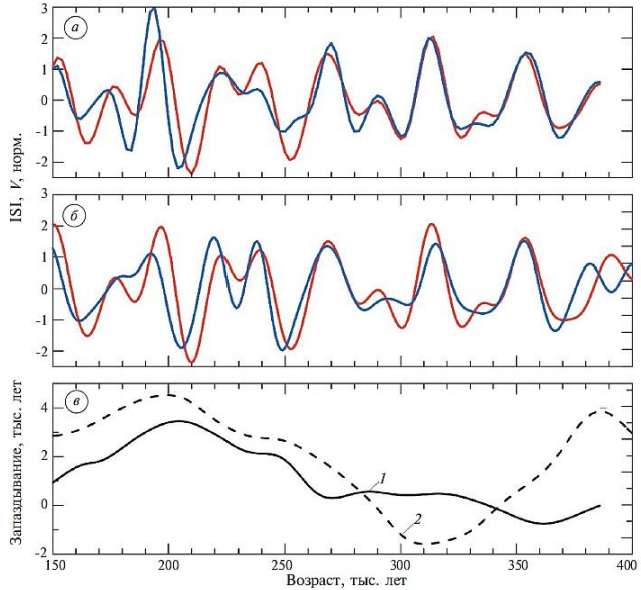


Рис. 1. Результаты CWT анализа временных рядов газосодержания (*V*) ледяных кернов со станций Восток и Конкордия (EDC) и местной инсоляции (ISI) по данным работ (Raynaud et al., 2007; Lipenkov et al., 2011): *а* – отфильтрованные в полосе пропускания 15–46 тыс. лет и нормированные ряды *V* (синяя кривая) и ISI390 (красная кривая, ряд перевернут) для керна Востока. Для ряда *V* использована предварительная датировка по $\delta^{18}O_{atm}$ (Petit et al., 1999); *б* – то же для керна EDC и ISI380. Для ряда *V* использована датировка EDC2 (EPICA community members, 2004); *в* – временное запаздывание отфильтрованных рядов *V* относительно рядов ISI для кернов Востока (*1*) и EDC (*2*), рассчитанное методом CWT

Fig. 1. Results of the CWT analysis of the air content (*V*) and local insolation (ISI) time series for Vostok and EDC ice cores adapted from (Raynaud et al., 2007 Lipenkov et al., 2011): *a* – filtered in 15–46 ka band and normalized time series of *V* (blue) and ISI390 (red, inverted) for Vostok. The *V* time series is plotted using $\delta^{18}O_{atm}$ timescale (Petit et al., 1999); *б* – same as above for the EDC ice core and ISI380. The *V* time series is plotted using EDC2 timescale (EPICA community members, 2004); *в* – time delays between *V* and ISI filtered time series for Vostok (*1*) and EDC (*2*) ice cores, obtained with CWT method

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛАВИНЫ

УДК 551.5

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ЛАВИНООПАСНОСТЬ ЗИМ НА КАВКАЗЕ В КОНЦЕ XXI ВЕКА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЕЙ CMIP6

© 2025 г. И. А. Корнева[1], А. Д. Олейников[2], П. А. Торопов[1,2,*], Н. Е. Варенцова[2], Н. В. Коваленко[2]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия

[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: tormet@inbox.ru

Поступила 20.09.2024 г.
После доработки 18.12.2024 г.
Принята к печати 25.12.2024 г.

По прогностическим оценкам лучших для Кавказа моделей земной системы CMIP6 при существенном повышении средней зимней температуры на 4–6 °С (согласно сценарию SSP-5.8.5) частота возникновения экстремальной лавинной опасности практически не меняется (из-за увеличения зимних осадков на 25%). При этом максимум зимних осадков в конце XXI в. смещается на март. По расчётам модели SNOWPACK наиболее типичной ситуацией к концу XXI в. будет формирование однородной снежной толщи с низкой плотностью, либо обводнённого снежного покрова. Эти ситуации не являются лавиноопасными, поэтому в 2071–2100 гг. ожидается существенное снижение повторяемости разрушительных крупных лавин из сухого снега и тенденция к увеличению числа менее опасных лавин из рыхлого и мокрого снега.

Ключевые слова: модели CMIP6, климатический прогноз, лавинная опасность, метеорологические условия формирования лавин, модель Snowpack

DOI: 10.31857/S2076673425010082, **EDN:** GYSDBK

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных приложений результатов моделей земной системы (далее МЗС) являются оценки изменения повторяемости опасных природных явлений – в том числе гляциологических (лавин, ледниковых селей, водо-снежных потоков и др.). На первый взгляд эта задача нерешаема, поскольку пространственное разрешение современных МЗС в самом лучшем случае составляет 50 км. Это означает, что более или менее достоверные результаты численного моделирования климата можно получить при их осреднении по площади как минимум 500×500 км (Торопов, 2005; Taylor et al., 2012). При этом пространственный масштаб большинства опасных гляциологических явлений лежит в диапазоне «сотни метров – первые километры». Если добавить к этому высокую чувствительность этих явлений к микроклиматическим особенностям и индивидуальным характеристикам рельефа каждого лавиносбора, то станет очевидным, что прогнозировать отдельно взятое опасное гляциологическое явление с использованием данных МЗС невозможно. Тем не менее оценки изменения повторяемости опасных явлений в горах на фоне меняющегося климата делаются достаточно активно. Ещё в конце XX в. были обобщены результаты расчётов показателей лавинной опасности, основанные на фоновых климатических прогнозах (Глазовская, Трошкина, 1998; Glazovskaya, 1998). При этом имелись в виду не конкретные события, а сопутствующий им метеорологический и климатический фон по всей территории соответствующего горного района.

Фоновый прогноз лавинной опасности можно реализовать двумя способами: статистическим и «регрессионным». Статистический метод основан на анализе функций распределения основных метеорологических параметров (осадков, высоты снежного покрова, температуры) и сводится к установлению статистически значимой зависимости объёма и дальности выброса лавин от соответствующих значений обеспеченности осадков и температуры (Благовещенский, 1991). Таким образом, можно оценивать лавинную опасность как

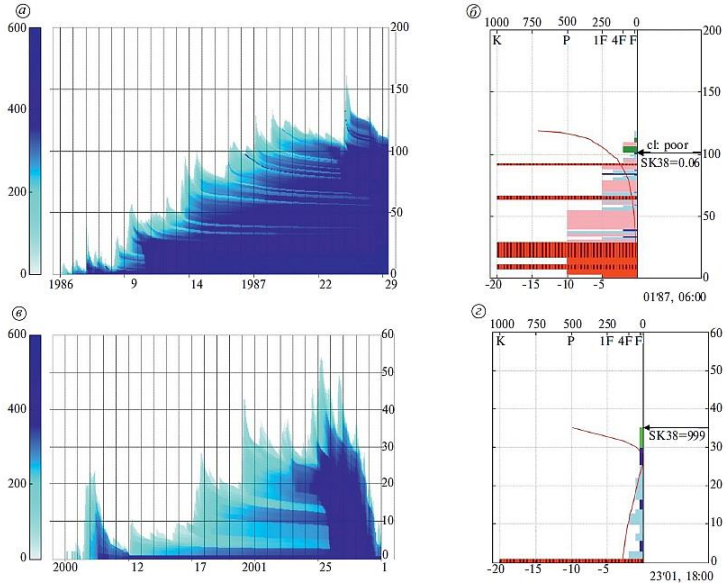


Рис. 4. Основные физические характеристики снежного покрова на типичной горизонтальной поверхности в Приэльбрусье по результатам расчёта модели SNOWPACK в течение холодного периода 1986/87 г., который характеризуется экстремальной лавинной опасностью, и холодного периода 2000/01 г., который характеризуется низкой лавинной опасностью: (*а*, *в*) плотность снежного покрова в течение холодного периода; стратиграфия снежного покрова 1.02.1987 (*б*) и 23.01.2001 (*г*). Тонкая красная линия показывает температуру в снежной толще, цвет прямоугольников показывает форму снежного зерна, а их длина описывает индекс твердости (устойчивости) снега

Fig. 4. The main physical characteristics of the snow cover on a typical horizontal surface in the Elbrus region based on the results of the SNOWPACK model during the cold period 1986/87, characterized by extreme avalanche danger, and the cold period 2000/01, characterized by low avalanche danger: (*a*, *в*) density of snow cover during the cold period; stratigraphy of the snow cover on February 1, 1987 (*б*) and on January 23, 2001 (*г*). A thin red line shows the temperature in the snow column, the color of the rectangles shows the shape of the snow grain, and their length describes the hardness index (stability) of the snow

которые более характерны для Западного Кавказа. На рис. 4, *г* показан пример стратиграфии снежного покрова для 23 января 2001 г. Хорошо видно, что прочный слой соответствует подошве снежного покрова. Остальная стратиграфия представлена слоями различной степени слабости, но в любом случае характеризуемыми плотностью, существенно ниже средней сезонной (в основном не более 200 кг/м^3). Такая стратиграфия снежного покрова соответствует крайне низкой лавинной опасности. Также важно отметить существенно более высокую температуру снежной толщи по сравнению с 1986/87 г.

Важным результатом этой части работы служит тот факт, что использование даже грубых данных реанализа позволяет достаточно точно и физически обоснованно воспроизводить стратиграфию снежного покрова с помощью SNOWPACK и давать оценку лавиноопасности снега на горном

МОРСКИЕ, РЕЧНЫЕ И ОЗЁРНЫЕ ЛЬДЫ

УДК 551.326.1: 551.383. (268.52)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТАЦИОНАРНОСТЬ ПОЛЫНЕЙ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2025 г. А. Б. Тимофеева[1,*], А. В. Рубченя[3], Р. И. Май[1,2]

[1]Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[2]Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия
[3]Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия
*e-mail: tianna@aari

Поступила 04.09.2024 г.
После доработки 06.11.2024 г.
Принята к печати 25.12.2024 г.

Выполнена оценка пространственно-временно́й повторяемости, изменчивости положения и площадей заприпайных полыней в море Лаптевых с использованием метода расчёта вероятности пересечений полигонов, по данным электронного архива региональных ледовых карт ААНИИ. Получено пространственное распределение зон с 50%-й повторяемостью полыней, выявлен положительный тренд площади полыней, смена локализации полыней в сезонном ходе, угнетение отрезка Западно-Новосибирской полыньи.

Ключевые слова: полынья, Море Лаптевых, полигоны, морской лёд, припай

DOI: 10.31857/S2076673425010092, EDN: GYRSMP

ВВЕДЕНИЕ

Полыньи представляют собой особый природный феномен, формирующийся в холодный сезон в полярных морях. К заприпайным полыньям относят пространства чистой воды, начальных и молодых льдов толщиной до 30 см, образующиеся между кромкой припая и дрейфующими льдами (Бородачев и др., 1994).

Полыньи формируются во всех морях Сибирского шельфа, в том числе в море Лаптевых, и обладают высокой повторяемостью. Основным фактором формирования заприпайных полыней являются отжимные ветры, могут оказывать влияние также тёплые воды стока рек в море Лаптевых, это в первую очередь сток реки Лены (Купецкий, 1959; Захаров, 1966). Существуют также предположения о том, что на формирование полыней могут влиять и внутренние волны (Морозов, Писарев, 2004). Полыньи играют важную роль в теплообмене между океаном и атмосферой (Макштас, 1984; Fiedler et al., 2010). В результате активного энерго- и массообмена происходят процессы ледообразования, конвекции в толще вод, образование плотных вод, перенос тепла от океана в атмосферу (Kassens, Thiede, 1994; Cavalieri, Martin, 1994). Вследствие градиента температур морской воды и воздуха и возникающего в результате этого потока тепла в заприпайных полыньях идёт непрерывное ледообразование, что, благодаря постоянному выносу вновь образовавшихся молодых льдов отжимными ветрами, превращает полыньи в значимый источник новых льдов в море (Макштас, 1984). В весенне-летний период заприпайные полыньи становятся очагами освобождения поверхности моря от морского льда (Опасные..., 2010). В районе развитых заприпайных полыней формируются специфичные арктические экосистемы, в которых планктон, бентос и нектон привлекают птиц и морских млекопитающих (Гуков, 1999). Предпринимаются попытки реконструкции расположения полыней по геохимическим данным (Астахов и др., 2023). Немаловажен также и факт использования акватории полыней в хозяйственной деятельности. С точки зрения навигации заприпайные полыньи служат одним из возможных путей следования судов в осенний и зимний периоды, что стало особенно важным в последнее время, в связи с возрастанием грузооборота по трассе Северного морского пути. Всё вышеперечисленное делает полыньи значимым объектом исследования.

Одна из характеристик заприпайных полыней – их повторяемость, определяющая временну́ю устойчивость полыньи. По принятой классификации выделяют стационарные (повторяемость более 75%), устойчивые (повторяемость более 50%) и эпизодические (повторяемость менее 50%) (Карелин, Карклин, 2012). В море Лаптевых выделяются пять полыней (рис. 1): Восточная Североземельская (далее ВСЗ), Северо-Восточная Таймырская (далее СВТ), Восточная Таймырская (далее ВТ), Анабаро-Ленская (далее АЛ) и Западная Новосибирская (далее ЗН) полыньи (Карелин, Карклин, 2012). К морфометрическим характеристикам, подробно описанным и рассчитанным в предыдущих исследованиях, относят длину, ширину и площадь (наиболее используемым для характеристики полыней параметром является площадь). При определении положения заприпайных полыней использовалась система створов, сформированная на основе экспертного анализа ледовой информации за длительный период (с 30-х годов XX века) (Карелин, Карклин, 2012). Створы разделяют

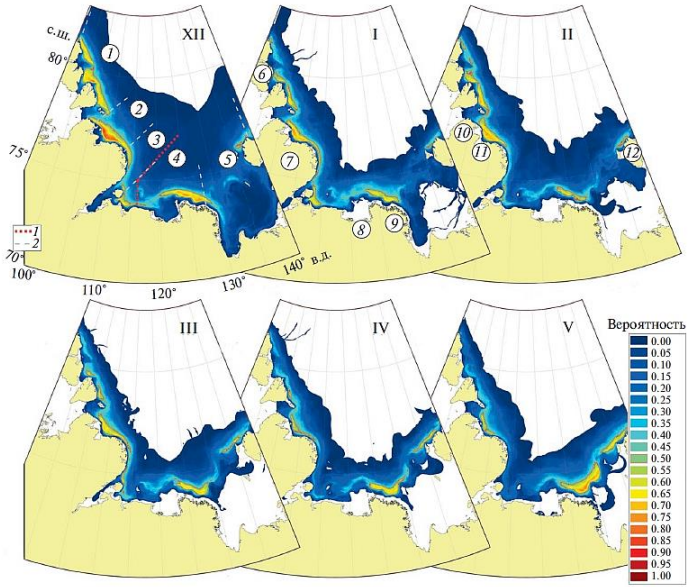


Рис. 1. Сезонный ход с декабря (XII) по май (V) пространственного распределения вероятности появления полыней в море Лаптевых. Границы и названия полыней, географические объекты: *1* – Восточная Североземельская (ВСЗ), *2* – Северо-Восточная Таймырская (СВТ), *3* – Восточная Таймырская (ВТ), *4* – Анабаро-Ленская (АН), *5* – Западная Новосибирская (ЗН), *6* – архипелаг Северная Земля, *7* – полуостров Таймыр, *8* – Оленёкский залив, *9* – дельта р. Лена, *10* – залив Терезы Клавенес, *11* – залив Фаддея, *12* – о. Котельный архипелага Новосибирские острова

Fig. 1. The seasonal variations from December (XII) to May (V) of the spatial distribution polynyas occurrence frequency in the Laptev Sea. Borders and names of polynyas, geographical objects: *1* – Eastern Severozemelskaya (ESZ), *2* – Northeastern Taymyrskaya (NET), *3* – Eastern Taymyrskaya (ET), *4* – Anabar-Lena (AL), *5* – Western Novosibirsk (WN), *6* – Severnaya Zemlya Archipelago, 7 –Taymyr peninsula, *8* – Olenek Bay, *9* – Lena River delta, *10* – Teresa Klavenes Bay, *11* – Faddey Bay, *12* – Kotelny Island of the Novosibirsk Islands archipelago

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

УДК 55.33

КОМПЛЕКСНЫЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА НА СТАНЦИЯХ ВОСТОК И ПРОГРЕСС В СЕЗОН 70-Й РОССИЙСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ

© 2025 г. А. В. Большунов*, С. А. Игнатьев, Д. В. Сербин, Г. Д. Горелик, Н. С. Крикун, Д. Е. Ушаков, И. А. Бабенко, А. В. Запрудский

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия
**e-mail: Bolshunov_AV@pers.spmi.ru*

Поступила 24.12.2024 г.
После доработки 09.01.2025 г.
Принята к печати 25.12.2024 г.

Статья посвящена комплексным научно-исследовательским работам на станциях Восток и Прогресс сотрудников Санкт-Петербургского горного университета в сезоне 70-й Российской антарктической экспедиции. Работы направлены на получение новых знаний о ледниковом покрове Восточной Антарктиды и структурно-геологических особенностях её прибрежных районов, а также на совершенствование методик, технологий и техники геолого-геофизических и буровых работ.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, геолого-геофизические и буровые работы, кристаллический фундамент, фирн, лёд, физико-механические свойства, гамма-спектрометрия, магниторазведка, радиометрия, аэрофотосъёмка

DOI: 10.31857/S2076673425010134, **EDN:** GXTLOF

Сезон 70-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) для сотрудников Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (далее Горный университет) уникальный – впервые научно-исследовательские работы проводятся на двух стациях Восток и Прогресс. Существует ряд представлений, согласно которым рифт Ламберта, расположенный недалеко от станции Прогресс, и озеро Восток могут быть если не сегментами одной глобальной геологической структуры (Filina et al., 2008; Isanina et al., 2009), то частью одной рифтовой системы (Голынский, 2009; Ferraccioli et al., 2011; Baranov, Morelli, 2023) (рис. 1).

В таком случае доказательство сингенетичности этих объектов позволит установить особенности их формирования и эволюции, а также взглянуть по-новому на историю геологического развития и термодинамических процессов не только Восточной Антарктиды, но и планеты в целом. С учётом того что территория рифта Ламберта является одной из наиболее обнажённых в пределах Восточной Антарктиды и позволяет проводить наблюдения *in situ*, не затрачивая огромные ресурсы на проведение буровых работ, данное утверждение приобретает особую актуальность.

На момент написания статьи одна группа в составе трёх сотрудников уже находилась на станции Восток, куда прибыла 2 декабря 2024 г., а вторая группа в составе пяти сотрудников находилась на НЭС “Академик Федоров” и следовала на станцию Прогресс.

Программа работ **на станции Восток** включает не только традиционные прикладные исследования, направленные на разработку новых и совершенствование существующих технологий бурения ледников, но и фундаментальные – изучение физико-механических свойств фирна, атмосферного и озёрного льда.

Программа традиционных работ включает исследования следующих процессов: бурения колонковым электромеханическим снарядом КЭМС-135 скважины 5Г-5 с использованием кремнийорганической жидкости (ПМС-3); расширения скважины 5Г-5 механическим способом; разрушения фирна и льда резанием по керновому материалу; циклонного шламоулавливания. Из перечисленных исследований остановимся подробнее на бурении колонковым электромеханическим снарядом КЭМС-135 скважины 5Г-5 с использованием кремнийорганической жидкости (ПМС-3).

На сегодняшний день при бурении глубоких скважин в ледниках в качестве заливочной жидкости наиболее распространена смесь керосина и фреона; последний используется в качестве утяжелителя. В частности, при бурении скважины 5Г на станции Восток используется авиационный керосин Jet A-1 и фреон HCFC-141b. Эта смесь, по мнению экспертов, экологически не безопасна и поэтому её применение при бурении скважин доступа к подледниковым средам не рекомендуется (Zhou et al., 2024); в то же время использование кремнийорганических жидкостей в качестве заливочных допускается (Triest, Alemany, 2014).

Любая заливочная жидкость, являющиеся основой эффективности очистки забоя от ледяного шлама, меняет свои плотностные и реологические свойства при изменении температуры и давления. Ни в одном из современных экспериментальных

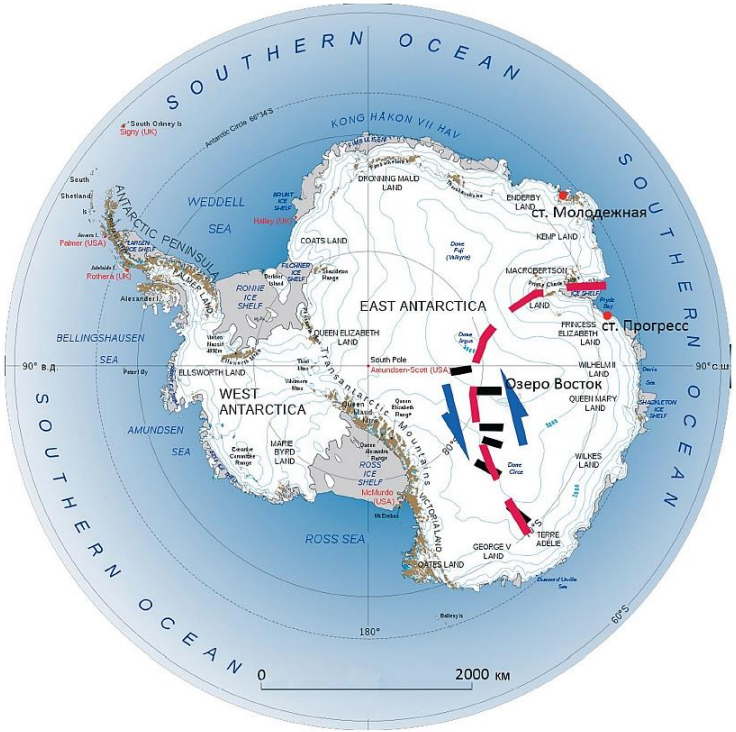


Рис. 1. Предполагаемая транстенсионная модель деформирования Восточно-Антарктического кратона и схема расположения станций проведения работ (модифицировано из Cianfarra, Salvini, 2013)

Fig. 1. The proposed transtensional deformation model of the East Antarctic craton and the layout of the work stations (modified from Cianfarra, Salvini, 2013)

СОДЕРЖАНИЕ

Том 65, номер 2, 2025

Ледники и ледниковые покровы

Архив изображений ледников России
Т. Е. Хромова, С. А. Никитин, А. Я. Муравьев, Г. А. Носенко, А. Ф. Глазовский 191

О возможном влиянии ложа ледника Колка на его динамическую нестабильность
Р. А. Чернов, А. Я. Муравьев 210

Изотопные параметры стока р. Мижирги (Кавказ): четырёхкомпонентное расчленение гидрографа
Ю. Н. Чижова, А. Д. Крекова, С. С. Кутузов, В. Н. Михаленко, И. И. Лаврентьев, М. А. Воробьев, М. В. Виноградова 218

Снежный покров и лавины

Фракционирование приземного аэрозоля от ИК-излучения снежной поверхности: наблюдения в Томском регионе
М. П. Тентюков, Д. А. Тимушев, Д. В. Симоненков, Б. Д. Белан, К. А. Шукуров, А. В. Козлов, Е. Г. Язиков, В. С. Бучельников, А. А. Яковлев 234

О фоновых наблюдениях содержания микроэлементов в твёрдой фазе снежного покрова городских земель
А. В. Захарченко, А. А. Тигеев, О. А. Пасько 255

Межгодовая изменчивость дат наибольшей интенсивности снеготаяния и максимального расхода воды половодья в бассейне р. Иньва (Пермский край)
А. А. Шайдулина, Д. А. Гырдымов, М. М. Козлова 268

Влияние поверхностных покровов на тепловые потоки в грунт на Западном Шпицбергене
А. В. Сосновский, Н. И. Осокин 282

Морские, речные и озёрные льды

Северная окраина Баренцевоморского шельфа после малого ледникового периода: изменчивость кромки дрейфующих льдов и динамика осадконакопления
Г. В. Ильин, Н. И. Мещеряков, И. С. Усягина, О. В. Кокин 295

Палеогляциология

Будущий ледниковый цикл и его отражение в ледниковых циклах позднего плейстоцена
Н. В. Вакуленко, Д. М. Сонечкин 315

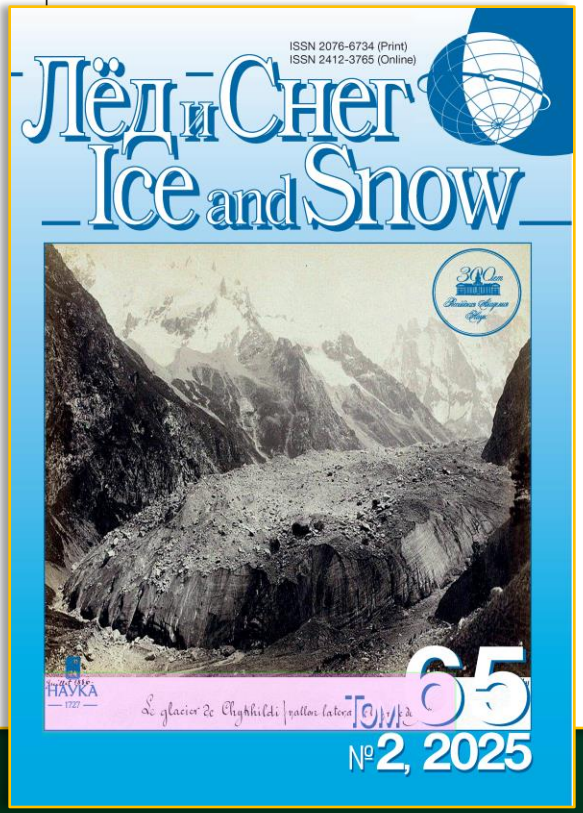
Озеро Спартаковское – исчезающий приледниковый водоём малого ледникового периода на архипелаге Северная Земля
Д. Ю. Большиянов, А. С. Парамзин, И. С. Ёжиков, И. Д. Коблашов, А. О. Аксенов, В. А. Меркулов, С. В. Хотченков, В. Т. Соколов, А. А. Нюбом, Н. Л. Секисов, Д. В. Бердинских 327

Подземные льды и наледи

Многолетняя изменчивость площади наледей в бассейне р. Селенги и её основные гидрометеорологические факторы
Е. Ж. Гармаев, В. Н. Черных, С. В. Пьянков, А. Н. Шихов, А. А. Аюржанаев, Д. А. Богатырев 342

Прикладные исследования

Analysis of ice cuttings collected during drilling of the snow-firn layer at Vostok station
D. A. Vasilev, I. V. Rakitin, S. A. Ignatev, A. V. Bolshunov, A. Yu. Ozhigin 357



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF GEOGRAPHY
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

Лёд и Снег

Том 65, № 2, 2025

Ice and Snow

2025

ЛЁД И СНЕГ, 2025, том 65, № 2, с. 210–217

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324.6

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ЛОЖА ЛЕДНИКА КОЛКА НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКУЮ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

© 2025 г. Р.А. Чернов*, А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: chernov@igras.ru*

Поступила в редакцию 28.12.2024 г.
После доработки 23.02.2025 г.
Принята к публикации 18.04.2025 г.

По данным дистанционных методов исследований отмечены высокие темпы продвижения фронта ледника Колка – около 380 м за 2018–2024 гг. В результате полевых работ 2024 г. в предполье ледника Колка выявлено несколько термокарстовых воронок, указывающих на наличие пласта льда толщиной до 20 м. Предположительно, фронт ледника надвинулся на массив мёртвых льдов, который сохранился после схода ледника в 2002 г., и продвигается по нему.

Ключевые слова: Кавказ, фронт ледника, термокарстовые процессы, мертвые льды, плоскость скольжения

DOI: 10.31857/S2076673425020029, **EDN**: FPVKCY

ВВЕДЕНИЕ

Карово-долинный ледник Колка расположен в верховье левого притока р. Геналдон, в глубоком скалистом цирке, образованном горными массивами Джимара-Хох и Шау-Хох. Ледник получает питание за счёт притока льда от висячих ледников, лавинных и ледово-каменных обвалов. Нестабильность ледника Колка неоднократно проявлялась в прошлом на примере его подвижки 1969–1970 гг. или катастрофических обрушениях 1902 и 2002 гг. Катастрофа 2002 г. характеризовалась непредсказуемостью и высокой скоростью движения ледово-каменного потока. Несмотря на усилия многих научных групп, причины выброса ледника Колка и преобразование его в высокоскоростной поток до конца не ясны.

В начале 2000-х годов в научных кругах преобладала обвальная гипотеза причин катастрофы (Васьков, 2004; Познанин, 2009), связанная с проявлением сейсмичности района и разрушением мёрзлых пород в цирке. Также была выдвинута гипотеза о мощном газодинамическом взрыве под ледником (Муравьев, 2005; Бергер, 2007). Вероятно, влияние вулканогенного фактора было значимым, на что указывают исследования данных тепловой космической съёмки и наземных датчиков, выявившие активизацию глубинных процессов в недрах «спящего» вулкана Казбек (Гурбанов и др., 2014). Высказано мнение о внеочередной пульсации ледника, хотя характер катастрофы резко отличался от пульсации ледника в 1969–1970 гг. (Десинов, 2004). В то же время, ряд гляциологов отмечали, что основными факторами, спровоцировавшими катастрофическое обрушение ледника 2002 г., были проявление поствулканических процессов под ледником и накопление в теле ледника значительных объёмов воды (Котляков и др., 2014). Оба фактора непосредственно связаны с условиями на ложе ледника. Предположение о возможном изменении условий скольжения ледника Колка по ложу, приводящих к динамической нестабильности, было приведено ещё в результатах исследований его пульсации (Рототаев и др., 1983).

В 2003–2023 гг. гляциологи Институт географии РАН и географического факультета МГУ проводили регулярные наземные наблюдения в цирке ледника Колка. Фотосъёмки цирка с опорных точек и с воздуха при помощи БПЛА, повторные GPS съёмки поверхности ледника и его фронта, анализ спутниковых снимков позволяли наблюдать динамику возрождения ледника с 2002 г. (Чернов, Рототаева, 2010; Носенко

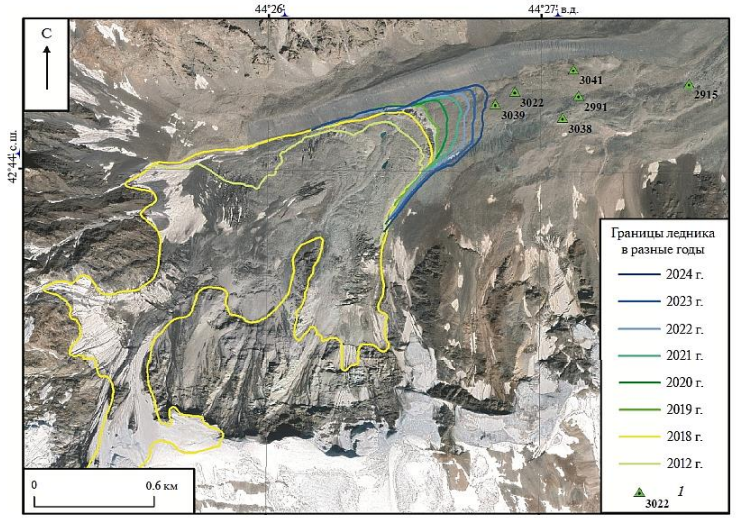


Рис. 2. Границы ледника Колка и положение его фронта с 2012 по 2024 г., *1* – абсолютные высоты поверхности мёртвого льда в августе 2024 г. В подложке спутниковый снимок WorldView-2 от 19.08.2019

Fig. 2. Boundaries of the Kolka Glacier and the position of its front from 2012 to 2024, *1* – absolute heights of the dead ice surface, August 2024. In the background is a satellite image WorldView-2 from 08/19/2019

в 1969–1970 гг. (Рототаев и др., 1983). Поверхность скольжения генерализует подлёдный рельеф, поэтому её сопротивление движению ледника много меньше, чем движение по неровностям ложа. Следует отметить, что моренный чехол в предполье ледника исключается из плоскости контакта ледника и мёртвого льда, так как он сдвигается фронтом. По периметру фронта ледника образовался напорный вал из рыхлого материала высотой более 10 м (см. рис. 1, *а*).

Анализ материалов, описывающих катастрофы ледника Колка в 1902 и 2002 гг. и подвижки 1969–1970 гг. (Рототаев и др., 1983; Чернов, Рототаева, 2010; Котляков и др., 2014), указывает на перемещения льда из цирка ледника двумя различными сценариями, отличающимися скоростями движения ледовых масс. Возможность преобразовываться в высокоскоростной поток ледово-каменных масс, по-видимому, обусловлена значительным накоплением воды в теле ледника и срывом ледника по плоскости скольжения.

Полевые исследования на пространстве перед фронтом ледника подтвердили наличие пологой поверхности, сложенной льдом. Её уклон составляет 6°, ширина – около 200 м, а протяжённость – 300–350 м. В нашем представлении эта поверхность является фрагментом плоскости скольжения, по которой происходило обрушение ледника. Ниже уровня 2990 м поверхность перекрывается грядой мёртвых льдов. Эта гряда высотой до 50 м и протяжённостью около 500 м окажется значительной преградой продвижению ледника через несколько лет. Приблизительный расчёт объёма мёртвого льда в массиве даёт величину 6–8 млн м^3. Смыкание тела ледника и сооружения мёртвых льдов значительно увели-

ЛЁД И СНЕГ, 2025, том 65, № 2, с. 218–233

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324

ИЗОТОПНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТОКА Р. МИЖИРГИ (КАВКАЗ): ЧЕТЫРЁХКОМПОНЕНТНОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА

© 2025 г. Ю. Н. Чижова[1,2,*], А. Д. Крекова[3], С. С. Кутузов[4], В. Н. Михаленко[2], И. И. Лаврентьев[2], М. А. Воробьев[2], М. В. Виноградова[2]

[1]Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия
[2]Институт географии РАН, Москва, Россия
[3]Высшая школа экономики, Москва, Россия
[4]Школа наук о Земле, Университет штата Огайо, Колумбус, США
*e-mail: eacentr@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2024 г.
После доработки 01.03.2025 г.
Принята к публикации 18.04.2025 г.

Изучены изотопные параметры стока в бассейне ледника Мижирги в середине периода абляции, установлены изотопные и гидрохимические характеристики компонент стока – тающего льда на языке ледника, снега лавинных снежников, ледникового льда и снежного покрова в области питания. Выполненное четырёхкомпонентное расчленение стока по двум изотопным ($\delta^{18}O$, d-exc) маркерам и величине минерализации показало возможность изучения структуры таяния в высокогорном ледниковом бассейне. Эта возможность обусловлена отличием величин дейтериевого эксцесса снежного покрова, формирующегося в зимний и летний сезоны в области аккумуляции ледников Безенгийского узла оледенения.

Ключевые слова: изотопный состав кислорода, дейтериевый эксцесс, речной сток, ледники, Кавказ

DOI: 10.31857/S2076673425020037, **EDN**: FPRMPO

ВВЕДЕНИЕ

Талый ледниковый сток – основной компонент питания многих горных рек, изменяющийся в характерные фазы водного режима в сезонном и межгодовом масштабах. Наблюдения за изменениями вклада талого ледникового стока приобретают особую важность, поскольку позволяют судить о реакции ледников на климатические изменения. Задача установления вклада основных компонент питания реки в гидрологии чаще всего решается методом расчленения гидрографа. Графическое разделение гидрографа применяется в гидрологической практике более 60 лет и базируется на разделении быстрых и медленных компонент, часто приравниваемых соответственно к поверхностному стоку и грунтовым водам. Использование стабильных изотопов в качестве инструмента для разделения гидрографа стока на компоненты в конце 1960-х годов стало прорывом в гидрологии рек. В отличие от графических методов, метод изотопного расчленения является измеримым, объективным и основывается на компонентах самой воды (Klaus, McDonnell, 2013). Впервые этот метод был применён в работе (Hubert et al., 1969), где расчленение гидрографа выполнялось с помощью трития. Впоследствии, с 1970-х годов метод стал применяться с использованием стабильных изотопов кислорода и водорода (Behrens et al., 1978; Sklash, Farvolden, 1979). Изотопные трассеры в сочетании с гидрохимическими (электропроводность воды, растворённый углерод и др.) применяют для выявления особенностей гидрологических процессов в пределах небольших водосборов, особенно в периоды выпадения дождей и таяния снега. Изотопное расчленение стока горных рек с ледниковым питанием позволяет исследовать гидрологические особенности ледниковых бассейнов и, более того, оценивать структуру таяния. Эти оценки возможны ввиду того, что

составлял около 18.5 м^3/с, а в последующие дни 9.4 м^3/с. Слой стока с 6 по 12 июля составлял около 37 мм в сутки, в последующие дни – около 18 мм. Суточные колебания расходов составляли порядка 4–5 м^3/с, максимальные отмечались в дневное и вечернее время, что связано с активным таянием на леднике и поступлением талых вод в сток, минимальные – в ночное и утреннее время. За период с 6 по 16 июля 2022 г. значения $\delta^{18}O$ воды в р. Мижирги варьировали от −12.68 до −13.83‰, значения δD – от −82.6 до −92.35‰ (табл. 1). На протяжении периода наблюдений в бассейне р. Мижирги (с 6 по 16 июля) прослеживается незначительное общее увеличение значений $\delta^{18}O$ речной воды (см. рис. 2). После каждого события выпадения дождя отмечалось повышение значений $\delta^{18}O$ стока.

Кора таяния на языке ледника Мижирги характеризовалась значением $\delta^{18}O = -17.22‰$ (см. табл. 1). В области аккумуляции ледника Мижирги не удалось выполнить отбор образцов, однако в области питания соседнего ледника Безенги были получены значения $\delta^{18}O$ фирна и льда, которые могут быть использованы в качестве референтных для данной работы.

Изотопный и химический состав льда в области аккумуляции леднка Безенги. В верхних 14 м ледникового керна, соответствующих 6 м водного эквивалента, были определены значения $\delta^{18}O$, δD, концентрации основных ионов. По глубине

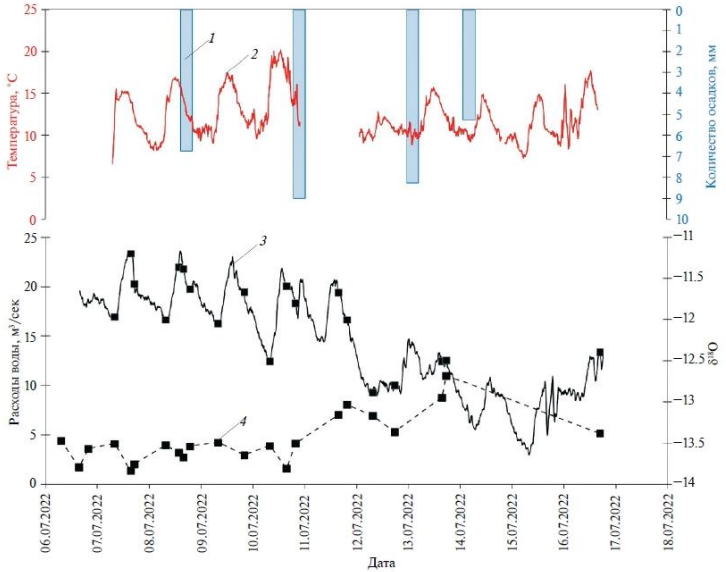


Рис. 2. Количество осадков (*1*), среднесуточная температура (*2*), расходы воды р. Мижирги (*3*) и значения $\delta^{18}O$ воды (*4*) 6–16 июля 2022 г.

Fig. 2. Precipitation amount (*1*), mean daily temperature (*2*), discharge of the Mizhirgi River (*3*) and $\delta^{18}O$ values of water (*4*) on July 6–16, 2022

ЛЁД И СНЕГ, 2025, том 65, № 2, с. 327–341

ПАЛЕОГЛЯЦИОЛОГИЯ

УДК 551.332.26+551.332.56 (98)

ОЗЕРО СПАРТАКОВСКОЕ – ИСЧЕЗАЮЩИЙ ПРИЛЕДНИКОВЫЙ ВОДОЁМ МАЛОГО ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА НА АРХИПЕЛАГЕ СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ

© 2025 г. Д. Ю. Большиянов[1,*], А. С. Парамзин[1], И. С. Ёжиков[1], И. Д. Коблашов[1], А. О. Аксенов[1], В. А. Меркулов[1], С. В. Хотченков[1], В. Т. Соколов[1], А. А. Нюбом[1], Н. Л. Секисов[1], Д. В. Бердинских[2]

[1]*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
**e-mail: bolshiyanov@aari.ru*

Поступила в редакцию 25.06.2024 г.
После доработки 26.12.2024 г.
Принята к публикации 18.04.2025 г.

Приледниковое озеро Спартаковское на о. Большевик архипелага Северная Земля периодически (раз в 5–10 лет) сбрасывает воду по внутриледниковым каналам через плотину перегораживающего фиорд выводного ледника. Вследствие отступания ледника и окончания малого ледникового периода эпизоды быстрого опорожнения озёрной ванны будут происходить чаще. Слежение за жизнью озера важно для гляциологических и климатических исследований.

Ключевые слова: приледниковое озеро, спуски озёрных вод, донные отложения, деградация ледников малого ледникового периода, Северная Земля

DOI: 10.31857/S2076673425020102, **EDN**: FOHIYR

ВВЕДЕНИЕ

Приледниковые озёра архипелага Северная Земля разнообразны по своему положению относительно ледников. Все они определены строением рельефа и заполняют его понижения. В одних случаях озёра располагаются на некотором удалении от ледников. Таково наиболее изученное озеро Изменчивое в юго-западной части о. Октябрьской Революции. Оно располагается в древней карстовой депрессии на высоте 6 м над ур. моря в 4 км к югу от ледника Вавилова, который и является основным питающим озеро источником воды. Его донные отложения служат хорошим показателем колебаний климата последних тысячелетий, и в него около 2000 лет назад проникали воды морской трансгрессии (Большиянов, 1985, 2006; Палеоклимат..., 2019). Несколько озёр архипелага подпружены ледниковыми краями. Таковы озёра Географов и Угловое, подпёртые лопастью выводного ледника, выдающегося в бухту на юго-западе ледника Академии Наук (о. Комсомолец). Такие же озёра, запруженные выводными ледниками, располагаются в центре о. Октябрьской Революции. Это озёра Острое и Фиордовое, отгороженные от фиорда Марата выводными ледниками, стекающими к югу с ледникового купола Карпинского. Озеро Фиордовое имеет площадь 39.5 км^2, измеренные глубины до 97 м (Большиянов, Макеев, 1995). Геоморфологическое картирование, проведённое в конце XX столетия (Большиянов, Макеев, 1995), выявило перехваты рек в результате подпруживания приледниковых водоёмов и изменения направления их стока. Так, озеро Фиордовое, образовавшееся перед ледниковой преградой в эрозионных долинах и фиорде Марата, дало начало стоку воды в р. Озёрную. Судя по разработанности долин, сток неоднократно изменял направление – то в сторону пролива Шокальского, то на юг о. Октябрьской Революции. Основной причиной изменений направления стока рек были и сейчас остаются этапы запруживания долин и фиордов выводными ледниками. Последнее событие появления многочисленных приледниковых озёр на Северной

температуры воздуха значительно ниже (Большиянов, Макеев, 1995), то и накопление воды в озёрной ванне происходит не равномерно, а в зависимости от температур летних сезонов. Высокий уровень воды в озере служит необходимым фактором приведения в действие механизма прорыва вод сквозь ледник во фиорд Спартак. В предыдущие десятилетия он достигался примерно за 10 лет. После достижения максимального уровня воды часть выводного ледника, который обращён к озеру Спартаковскому и перегораживает путь воды к морю, всплывала под действием выталкивающей силы воды, которая пересиливала связи сцепления льда со льдом у дна озёрной котловины. Всплывшие части ледника разрушались на множество айсбергов, при этом открывались внутрилёдные каналы, начинался спуск озёрных вод в море. Всплывшие и разрушенные айсберги в виде колец и каналов свидетельствуют о том, что в теле ледника есть туннели, по которым и происходит сток воды из озера (рис. 4).

При падении уровня воды многие каналы снова закрывались, имевшаяся в каналах вода снова замерзала, и озеро во время летних сезонов заполнялось талой водой. Во время опорожнения озёрной ванны большое количество айсбергов оседало на её дно и склоны, являя удивительную картину ледяного хаоса из невесть откуда взявшихся ледяных глыб в узких долинах притоков озера и на его крутых склонах при отсутствии воды в озере или при низких её уровнях (см. рис. 2, *б*).

После спуска озера в 2016 г. за ним начались более тщательные наблюдения: измерения уровня водоёма, промеры глубин, отбор донных озёрных отложений. Эти наблюдения дали возможность предвидеть следующий спуск воды, когда уровень достигал уже критических значений. Весенние наблюдения 2021 г. показали, что уровень воды в конце 2020 г., достигнув величины 105 м, немного (первые метры) упал в октябре–ноябре 2020 г. и в апреле 2021 г. оказался на высоте 100 м над ур. моря. Поставленная летом 2021 г. на бровке озёрной ванны фотокамера позволила зафиксировать событие практически полного спуска воды из озера 22–27 августа 2021 г. Ежечасная фиксация фотокамерой этого события выявила то, что озеро было спущено за 117 часов: 46 часов продолжалось слабо заметное падение уровня (сантиметры в час), но при этом наблюдалось движение айсбергов в сторону ледника; 14 часов – заметное падение уровня (дециметры в час); 57 часов – быстрое падение уровня (метры в час). Приблизительная оценка объёма воды в озере по результатам его весенних промеров (см. табл. 1) и знание продолжительности активного спуска воды из озера (57 часов) позволила путём деления объёма воды на продолжительность активного спуска оценить расход воды при сбросе вод озера. Он достигал величины порядка 1590 м^3/с. Несмотря на стремительный спуск воды сквозь ледник, на поверхности катастрофические изменения наблюдались только в виде разрушения края ледника, откалывания множества айсбергов, их движения в озере и оседания на его дно и склоны. Западная часть выводного ледника, которая лежит на морском

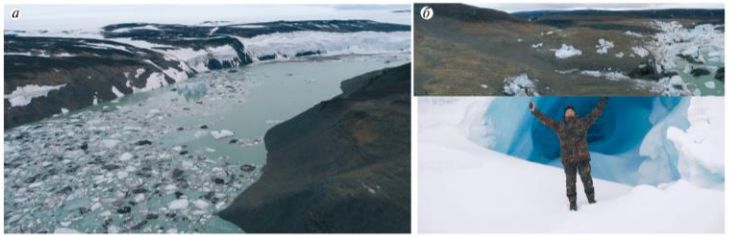


Рис. 4. Айсберг с овальными в сечении фрагментами каналов стока вод в 2023 г. (*а*); замёрзший канал в стенке обрыва ледника в апреле 2016 г. (*б*). Фото А.С. Парамзина, 2023 г., Д.Ю. Большиянова, 2016 г.

Fig. 4. Iceberg with oval cross-sectional fragments of water flow channels in 2023 (*a*); a refrozen tunnel in the glacier cliff wall in April 2016 (*б*). Photo by A.S. Paramzin, 2023, D.Yu. Bolshiyanov, 2016

PROBLEMS OF GEOGRAPHY

ISSN 0372-5758

159

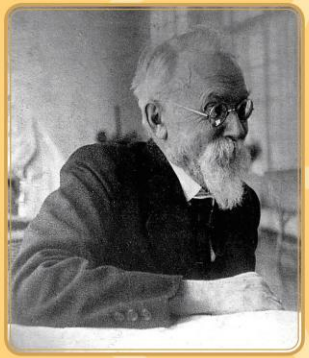
V.I. VERNADSKY'S NOOSPHERIC CONCEPT AFTER GLOBALISM

ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ

ISSN 0372-5758

159

НООСФЕРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ В.И. ВЕРНАДСКОГО ПОСЛЕ ГЛОБАЛИЗМА



ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ

Сборник 159

НООСФЕРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ В.И. ВЕРНАДСКОГО ПОСЛЕ ГЛОБАЛИЗМА

Ответственные редакторы:
академик В.М. Котляков
доктор географических наук В.А. Шупер

МОСКВА
Медиа-ПРЕСС
2024

УДК 140.8; 910
ББК 26.8
В74

ISSN 0372-5758

Рекомендовано Учёным советом Русского географического общества

Рецензенты
доктор географических наук, профессор В.Л. Бабурин
доктор географических наук Р.В. Дмитриев

Вопросы географии / Русское географическое общество. – Москва. Издаётся с 1946 года.

В74 **Сб. 159. Ноосферная концепция В.И. Вернадского после глобализма** / Отв. ред. В.М. Котляков, В.А. Шупер. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2024, 320 с.

Сборник посвящён переосмыслению ноосферной концепции В.И. Вернадского в условиях тектонических сдвигов в мироустройстве, которое потребует глубокой ревизии всего научного мировоззрения, как в области общественных, так и в области естественных наук. Авторы сборника не отождествляют глобализацию как объективный процесс мирохозяйственного развития, подверженный цикличности, как и мировая экономика в целом (в настоящее время приближается апогей второго глобального дезинтеграционного цикла), и глобализм как воплощение либеральной идеологии. Их усилия направлены на разработку альтернативных, рационалистических представлений как в области социального развития, так и в области природно-общественного взаимодействия. Ноосферная концепция В.И. Вернадского – мощнейший интеллектуальный ресурс для решения этой задачи, поскольку для видения великого учёного характерны не только поистине космический масштаб, но и глубочайшая укоренённость в традициях и идеалах науки, от которых всё больше отступает современный Запад. Сборник адресован широким кругам читателей, стремящихся осмыслить процессы, переформатирующие современный мир.

ISBN 978-5-901003-78-7

Problems of Geography / Russian Geographical Society. – Moscow. Published since 1946.
Vol. 159. V.I. Vernadsky's Noospheric concept after globalism / Eds. V.M. Kotlyakov, V.A. Shuper. – M.: Media-PRESS, 2024, 320 p.

The collection is devoted to the reinterpretation of Vladimir Vernadsky's noospheric concept in the context of tectonic shifts in the world order, which will require a deep revision of the entire scientific worldview, both in the field of social and natural sciences. The authors of the collection do not identify globalization as an objective process of world economic development, subject to cycles, as well as the world economy as a whole (currently the apogee of the second global disintegration cycle is approaching), and globalism as the embodiment of liberal ideology. Their efforts are aimed at developing alternative, rationalistic ideas both in the field of social development and in the field of interaction between the society and its natural environment. Vernadsky's noospheric concept is a powerful intellectual resource for solving this problem, since the vision of the great scientist is characterized not only by a truly cosmic scale, but also by the deepest rootedness in the traditions and ideals of science, from which the modern West is increasingly retreating. The collection is addressed to a wide range of readers who seek to understand the processes that reformat the modern world.

ISBN 978-5-901003-78-7

© Авторы статей, 2024
© Authors of papers, 2024
© Русское географическое общество, 2024
© Russian Geographical Society, 2024

Содержание

В.М. Котляков, В.А. Шупер. Фрагментация ноосферы (Введение к книге) 9
С.А. Караганов. В Евразию с интеллектуальной свободой 28
А.В. Фененко. Феномен и парадоксы «информационных войн» 51
А.Г. Бакланов. Академик Лаврентьев: проект планетарного формата в эпоху перемен 71
Н.И. Кузнецова. Концепт ноосферы в потоке контекстов и интерпретаций 97
А.А. Тишков. Опередивший время: идеи В.И. Вернадского и география как наука будущего 124
А.Г. Дружинин. Ноосферная концепция В.И. Вернадского и евразийство: актуальные грани сопряжения 157
А.Б. Савченко, Т.Л. Бородина. Русский Космизм как инструмент развития концепции Ноосферы 181
А.Б. Лихачева. Карательная экономика и недоверие как основа взаимодействия? 209
И.Н. Тимофеев. Политика санкций и наследие Золотой орды 218
В.А. Шупер. Пространство и время во внутренней геополитике 225
Б.Е. Бураков. Радиоактивные отходы и кризис мышления 243
Я.Д. Лисоволик, О.А. Подберезкина. Цивилизационные и цифровые коридоры в Евразии 254
А.Н. Пилясов. Инновационные факторы современного страногенеза 294

Сведения об авторах 318

УДК: 327.2; 332.12

В Евразию с интеллектуальной свободой

© 2024 г. С.А. Караганов

Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

To Eurasia with intellectual freedom

S.A. Karaganov

HSE Faculty of World Economy and International Affairs

skaraganov@hse.ru

Summary. In the world, due largely to the actions of Russia, which have undermined the foundations of centuries-old Western dominance - military underpinning - a geopolitical and geoeconomic earthquake is in the making. New countries are rising, previously suppressed civilizations are recovering. These welcome developments come with the risks of conflict and even a world war. The main cause is the West's desperate counterattack, seeking to reverse history. The goal is to ensure a peaceful transition to a new global order by strengthening nuclear deterrence and establishing new institutions for global governance. At the same time, the West must accept a more modest role in this new system. Greater Eurasia will continue to play a key role, and the most significant challenge will be the decolonization of minds, overcoming the inherited habit of viewing the world through the lens of Western theories and perspectives.

Keywords: ***Greater Eurasia, Siberia, the West, the World majority, national strategy, "idea-dream", "Fortress Russia", state ideology, nuclear deterrence, world system***

Резюме. В мире, во многом благодаря действиям России, подорвавшей фундамент многовекового господства Запада – военное превосходство, идёт по нарастающей геополитическое и геоэкономическое землетрясение. Поднимаются новые страны, восстанавливаются раньше подавлявшиеся цивилизации. Эти отрадные перемены сопровождаются рисками возникновения конфликтов и даже мировой войны. Главная причина – отчаянная контратака Запада, стремящегося повернуть историю вспять. Задача – с помощью укрепления ядерного сдерживания, строительства новых институтов мирового управления обеспечить относительно мирный переход к новой миросистеме, обеспечить уход Запада на более скромное место в ней. Ключевое место впредь будет занимать Большая Евразия. Связанная важнейшая задача – деколонизация сознания, преодоление доставшейся от прошлого привычки смотреть на мир через западные очки, через систему односторонних и устаревших западных теорий.

Ключевые слова: ***Большая Евразия, Сибирь, Запад, Мировое большинство, национальная стратегия, идея-мечта, «крепость-Россия», государственная идеология, ядерное сдерживание, миросистема***

в семьях, дружеских компаниях, школах, университетах. И так творчески внедрять. Дам свой короткий набросок этой идеи-мечты.

- Мы верим в то, что мы, русские русские, русские татары, русские буряты, русские дагестанцы и т.д., граждане России – народ, избранный Всевышним для спасения своей страны и человечества в этот переломный момент истории.
- Мы – народ-освободитель от любого ига, всей своей историей доказавший это своё предназначение и исполняющий его ныне, освободивший мир от всех Наполеонов, Гитлеров и помогающий освободиться от очередного – неоколониального западно-либерального.
- Самое важное – это наш человек, его духовное, физическое, интеллектуальное развитие. Мы – за новый гуманизм, против уничтожения Человека в человеке и, наоборот, за развитие высшего в нём, Бога, для тех, кто в него верит.
- Смысл жизни человека не в гедонизме, эгоизме и индивидуализме, а в служении семье, обществу, родному государству, миру, Богу, если он в него верит. Мы – за коллективизм, взаимопомощь, которую называют соборностью. Человек может состояться и быть свободным только в служении общему делу, своей стране, государству.
- Мы – народ воинов и победителей. Народ-освободитель от всех, кто пытается стать гегемоном, доминировать, подавлять другие народы. Но служение своему Отечеству и государству – наш первый долг.
- Мы – защитники своего суверенитета, но и свободы всех народов выбирать свой духовный, религиозный, экономический, культурный, политический путь.
- Мы – народ-интернационалист, нам чужд расизм. Мы за культурное, духовное многообразие и многоцветие. Мы – уникально культурно, религиозно открытая страна-цивилизация, призванная объединять все цивилизации Большой Евразии и мира.
- Мы – исторический народ, чтим и знаем свою историю, но и народ, устремлённый вперёд в будущее, к созданию новой истории своей страны и свободного от гегемоний многокрасочного, многокультурного мира.
- Мы не просто за консервативные (консервативные – неудачный термин – С.К.), за нормальные человеческие ценности, за любовь женщин и мужчин, их к детям, за уважение стариков, за любовь к своей земле.

- Мы – народ женственных и очень сильных женщин, не раз спасавших Родину в лихую годину. И мы – народ сильных и отважных мужчин, готовых защищать слабых.
- Мы – за справедливость и между народами, и внутри страны. Каждый должен получать сообразно своему таланту, труду, вкладу в общее дело. Но слабые, одинокие, старые должны быть защищены.
- Мы – не стяжатели, но стремимся к заслуженному личному благополучию. Излишнее, показное потребление аморально и антипатриотично. Для нас бизнес – это образ жизни для того, чтобы сделать жизнь лучше.
- Мы – народ, не потерявший связь с родной природой. Россия – главный экологический ресурс человечества. Сохранить в себе единство человека с природой – это общечеловеческая ценность. Мы любим, в первую очередь, землю нашей Родины, будем беречь её, развивать. Прошлое, как и будущее – в единстве человека и природы. Будем взращивать, как теперь говорят, экологическое самосознание в себе, детях с детского сада.
- Наши герои – солдат, инженер, учёный, врач, учитель, беззаветно служащий народу чиновник, бизнесмен-благотворитель, крестьянин и рабочий, создающие своими руками достаток страны.
- Мы цивилизация-цивилизаций, призванная объединять цивилизации Большой Евразии и мира.

Повторю – без большой идеи-мечты общество не будет народом в полном смысле этого слова, чиновники не получат стимула для работы, кроме выполнения функций и обеспечения личного благосостояния.

И войны без понимания – ради чего (ныне это – сохранение и возрождение человека в человеке, свободы и суверенитета страны и всех стран, и народов) – не выигрываются. Или результаты побед растрачиваются.

Ещё одна грандиозная задача, стоящая перед нами, но и всем миром на нынешнем переломном этапе истории – искать и находить новую экономическую модель, нацеленную не только и не сколько на максимизацию прибыли, но на улучшение жизни человека, его окружающей среды, его самого. Знаю, что в стране есть уже немало корпораций, строящих свою работу именно на таких принципах и при этом весьма успешных. Их пример нужно множить. Бизнес-ассоциации должны заниматься не только продвижением и защитой интересов

УДК 325; 910

Пространство и время во внутренней геополитике

© 2024 г. В.А. Шупер

Институт географии РАН, Москва, Россия

Space and time in domestic geopolitics

V.A. Shuper

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

vshuper@yandex.ru

Резюме. Концепции ноосферы В.И. Вернадского и этногенеза Л.Н. Гумилёва позволяют объединить пространство и время в развитии страны. Осваивая Сибирь, страна сможет ещё долго сохранять динамизм в перешедшем к стационарности мире. Наша «большая идея» – сбережение пассионарной энергии народа с использованием её для перехода к новому мирохозяйственному укладу. Именно освоение новых территорий создаёт наиболее благоприятные условия для социально-экономической трансформации.

Ключевые слова: ***Вернадский В.И., Гумилёв Л.Н., пассионарность, освоение Сибири, новый мирохозяйственный уклад, национальная идея***

Summary. Vladimir Vernadsky's conception of the noosphere and Lev Gumilyov's ethnogenesis conception allow us to combine space and time in the development of the country. By developing Siberia, the country will be able to maintain dynamism for a long time in a world that has transitioned to stationarity. Our "big idea" is to conserve the passionate energy of the people and use it for the transition to a new world economic system. It is the development of new territories that creates the most favorable conditions for socio-economic transformation.

Key words: ***Vernadsky Vladimir, Gumilyov Lev, passionarity, development of Siberia, new world economic structure, national idea***

Два отечественных учёных-провидца, чьи юбилеи поставлены судьбой совсем рядом, «дивно близки нам» в переживаемое драматическое переломное время: Владимир Иванович Вернадский (1863–1945) и Лев Николаевич Гумилёв (1912–1992). Наиболее важные для нас в контексте наступившей эпохи черты мировоззрения Вернадского – это космизм, историческая глубина и фундаментальный патриотизм. Космизм предполагает взгляд на жизнь и сознание как на явления, возникающие в ходе эволюции Вселенной и подчиняющиеся всем выявленным для неё закономерностям, включая принцип Кюри (симметрия следствия не может отличаться от симметрии причины). Историческая глубина определяется распространением естественнонаучного эволюционизма на область социальных явлений, стремлением установить возможно бо-

К наступающей осени западные элиты стали готовиться загодя, начиная с первых докладов Римскому клубу с совершенно не оправдавшимися прогнозами, что, впрочем, нисколько не смутило их адресатов. Нынешнее «устойчивое развитие» – очередной шаг в том же направлении. Понятно, что в «конце истории» заинтересованы те, кто хотел бы зафиксировать прибыль, остановив игру. Россия, Китай, Индия и другие развивающиеся страны явно не из их числа. При этом Китай за 30 лет достиг изумительного искусства в игре с Западом по его же правилам, выигрывая всё чаще, чем побудил Запад к радикальному пересмотру самих этих правил. Для России, наоборот, все эти игры были и остаются сугубо проигрышными, а в случае перехода к стационарности ей будет засчитано окончательное поражение без права на матч-реванш. Развивающиеся страны, кроме Индии, пока не имеют достаточных ресурсов (экономических, военных, интеллектуальных) для противостояния Западу и вынуждены ждать лучших времён.

Борьба за будущее

Борьба за достойное место в переходящем к стационарности мире станет своего рода «битвой за плато». Это будет игра по совершенно другим правилам, в которой для нашей страны откроются новые возможности, хотя и возникнут новые риски, ведь наш привычный мир в несравненно большей степени сформирован высокими темпами экономического роста, нежели это нам представляется. Очень многие институты самого различного назначения и масштаба возникли в условиях высоких темпов экономического роста и не смогут существовать при низких, подобно растениям и животным, вымирающим при изменении климата. Возможно, СССР был одним из них.

Поскольку эффекты самоорганизации возникают именно в диссипативных системах, далёких от состояния равновесия, возрастание неравновесности не должно однозначно вести к хаосу, оно облегчает и возникновение структур, т.е. порядка. Центр тяжести потребуется перенести с экономики, где у России явно не намечается прорыв, на образование и науку, чтобы существенно улучшить позиции страны к середине XXI в., когда карты будут сдаваться заново. Необходима стратегия перехода от экстенсивного развития, основанного на погоне за количественными показателями, к интенсивному, цель которого – улучшение качественных показателей (Шупер, 2019).

PROBLEMS OF GEOGRAPHY

ISSN 0372-5758

160

COASTAL ZONE OF THE RUSSIAN SEAS IN THE 21ST CENTURY

ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ

ISSN 0372-5758

160

БЕРЕГОВАЯ ЗОНА МОРЕЙ РОССИИ В XXI ВЕКЕ



ВОПРОСЫ
ГЕОГРАФИИ

Сборник 160

БЕРЕГОВАЯ ЗОНА МОРЕЙ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Ответственные редакторы:
академик В.М. Котляков
доктор географических наук С.А. Огородов

МОСКВА
Медиа-ПРЕСС
2025

УДК 551.435.3
ББК 26.823.51
В74

ISSN 0372-5758

Рекомендовано Ученым Советом Русского географического общества

Рецензенты:
Доктор географических наук Л.А.Жиндарев
Доктор физико-математических наук С.Ю.Кузнецов

В74 **Вопросы географии** / Русское географическое общество. – Москва. Издаётся с 1946 года.
Сборник 160: Береговая зона морей России в XXI веке / Отв. ред. В.М. Котляков, С.А. Огородов – М.: Медиа-ПРЕСС, 2025. 304 с.

Сборник посвящён вопросам эволюции, оценки современного состояния и прогноза развития береговой зоны морей России, теории и практики изучения береговых процессов. В сборник вошли статьи, подготовленные по материалам избранных докладов ведущих специалистов в береговедении, сделанных на XXX (юбилейной) всероссийской конференции «Береговая зона морей России в XXI веке» рабочей группы «Морские берега» под научно-методическим руководством Секции океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле РАН, прошедшей 3–7 июня 2024 г. на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова. Книга адресована широкому кругу читателей, от студентов и аспирантов, до учёных и практиков, занимающихся изучением и освоением морских берегов.

ISBN 978-5-901003-800

Problems of Geography / Russian Geographical Society. – M. Published since 1946.
Volume 160: Coastal zone of the Russian seas in the 21st century / Eds. V.M. Kotlyakov, S.A. Ogorodov – M.: Media-Press, 2025. 304 p.

The collection is devoted to the issues of evolution, assessment of the current state and forecast of the Russian coastal areas, as well as theory and practice of coastal studies. The collection includes articles prepared based on the materials of selected reports by leading experts in coastal science, made at the XXX (anniversary) All-Russian conference "Coastal Zone of the Russia Seas in the XXI Century" led by the working group "Sea Coasts" under the scientific and methodological guidance of the Section of Oceanology, Atmospheric Physics and Geography of the Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences, held on June 3-7, 2024 at the Geography Faculty at Lomonosov Moscow State University. The book is addressed to a wide range of readers, from students and graduate students to scientists and practitioners involved in the studies and development of sea coasts.

ISBN 978-5-901003-800

© Авторы статей, 2025
© Authors of papers, 2025
© Русское географическое общество, 2025
© Russian Geographical Society, 2025

Содержание

В.М. Котляков, С.А. Огородов. Береговая зона морей России в XXI веке 11
И.О. Леонтьев. О развитии ритмических форм прибрежного рельефа 21
А.А. Ермолов, А.И. Кизяков. Методологические подходы к оценке экологической чувствительности арктических берегов к разливам нефти 37
Д.М. Богатова, Г.А. Кажукало. О достоверности оценки темпов отступания берегов криолитозоны 56
С.О. Разумов, М.Н. Григорьев. Пространственно-временные изменения темпов разрушения льдистых берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в условиях климатического потепления и вариаций мерзлотных и геоморфологических характеристик 70
А.В. Баранская, А.В. Новикова. Динамика берегов приустьевой части Енисейского залива Карского моря 83
А.В. Новикова, С.А. Огородов. Анализ морфодинамики берегов Карского моря по разновременным данным дистанционного зондирования 93
Е.И. Пижанкова, А.В. Гаврилов. О соотношении динамики берегов морей и озёр Яно-Индигирской низменности 116
П.Ф. Бровко. Геомониторинг береговой зоны Японского и Охотского морей 132
С.Л. Горин, Д.В. Корзинин. Многолетняя динамика приливной прорвы в береговом баре (Западная Камчатка, устье рек Опала и Голыгино) 145
А.А. Маслаков, И.О. Стекольщиков. Развитие криогенных процессов на побережье Восточной Чукотки на фоне климатических изменений 169
Т.Ю. Репкина, П.А. Леонтьев, Е.Д. Вяткин, А.Л. Гуринов, Ю.А. Кублицкий, А.К. Крехов, Н.Н. Луговой, А.В. Орлов, А.П. Яковлева. Прибрежные дюны Белого моря: типизация, распространение и тенденции развития в голоцене 184
Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, В.А. Жамойда, Л.М. Буданов, А.В. Амантов, О.А. Ковалева. Формирование и эволюция береговых морфолитосистем восточной части Финского залива 210

Л.А. Беспалова, В.М. Пешков, О.В. Ивлиева, А.Е. Цыганкова, Е.В. Беспалова, Д.О. Кривогуз, А.Р. Иошпа, О.А. Хорошев, С.А. Мисиров. Состояние берегов Таганрогского залива Азовского моря на современном этапе 249
В.В. Крыленко, М.В. Крыленко. Развитие курорта Анапа и охрана Анапской пересыпи – межотраслевые противоречия 284
Сведения об авторах 300

Content

V.M. Kotlyakov, S.A. Ogorodov. Coastal zone of Russian seas in the 21st century 11
I.O. Leont'yev. Development of rhythmic patterns in the nearshore morphology 21
A.A. Ermolov, A.I. Kizyakov. Methodological approaches to assessing the environmental sensitivity of the Arctic coasts to oil spills 37
D.M. Bogatova, G.A. Kazhukalo. On the reliability of the assessment of the coastal retreat rate in permafrost 56
S.O. Razumov, M.N. Grigoriev. Spatial and temporal changes of destruction rate of ice-rich coasts of the Laptev Sea and East Siberian Sea under conditions of climate warming and variations in permafrost and geomorphological characteristics 70
A.V. Baranskaya, A.V. Novikova. Dynamics of the Coasts of the Yenisei North 83
A.V. Novikova, S.A. Ogorodov. Analysis of morphodynamics of the coasts of the Kara Sea based on multi-temporal remote sensing data 93

E.I. Pizhankova, A.V. Gavrilov. The relationship between the dynamics of the coasts of the sea and lakes on the Yano-Indigirka lowland 116
P.F. Brovko. Coastal monitoring of the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk 132
S. Gorin, D. Korzinin. Long-term dynamics of tidal inlet in coastal bar (Western Kamchatka, river mouths of Opala and Golygino) 145
A.A. Maslakov, I.O. Stekolshchikov. Cryogenic processes development on the Eastern Chukotka seacoast due to climate changes 169
T.Yu. Repkina, P.A. Leontiev, E.D. Vyatkin, A.L. Gurinov, Y.A. Kublitsky, A.K. Krekhov, N.N. Lugovoi, A.V. Orlov, A.P. Yakovleva. Coastal dunes of the White Sea: a review of classification, spatial distribution and evolution patterns in the Holocene 184
D.V. Ryabchuk, A.Yu. Sergeev, V.A. Zhamoida, L.M. Budanov, A.V. Amantov, O.A. Kovaleva. Formation and evolution of the Eastern Gulf of Finland coastal morpholithosystems 210
L.A. Bespalova, V.M. Peshkov, O.V. Ivlieva, A.E. Tsygankova, E.V. Bespalova, D.O. Krivoguz, A.R. Ioshpa, O.A. Khoroshev, S.A. Misirov. The state of the shores of the Taganrog Bay of the Sea of Azov at the present stage 249
V.V. Krylenko, M.V. Krylenko. Development of the Anapa resort and the protection of the Anapa bay-bar – intersectoral contradictions 284
List of authors 300

УДК 551.435.3

О развитии ритмических форм прибрежного рельефа

И.О. Леонтьев

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

Development of rhythmic patterns in the nearshore morphology

I.O. Leont'yev

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

igor.leontiev@gmail.com

Summary. Rhythmic forms of coastal morphology (beach cusps, megacusps, alongshore sand waves and spits, as well as systems of nearshore sand bars) are considered as a consequence of self-organization of the relief as a result of the positive feedback between sediment transport and morphology. The dynamics of the contour and profile of the coast, within certain limits, are subject to the diffusion equation, with the help of which it is possible to characterize the conditions that contribute to the growth of emerging wave-like disturbances of the relief. Thus, sand waves and spits arise under the influence of waves propagating at a large angle relative to the coastal normal. However, cusps and megacusps can also form during normal shore waves under the influence of circulation cells in the surf zone. Underwater bars also develop due to the mechanism of self-organization with the dominance of sediment transport towards the shore. The results obtained help to interpret the available observational data regarding the evolution of multiple bar systems.

Keywords: ***beach cusps, megacusps, alongshore sand waves, spits, nearshore bars, multiple bar systems, sediment transport, self-organization of the relief***

Резюме. Ритмические формы прибрежного рельефа (пляжевые фестоны и мегафестоны, вдольбереговые песчаные волны и косы, а также системы подводных валов) рассматриваются как следствие самоорганизации рельефа в результате действия положительной обратной связи между транспортом наносов и морфологией. Динамика контура и профиля берега в определенных рамках подчиняется уравнению диффузии, с помощью которого удается охарактеризовать условия, способствующие росту возникающих волнообразных возмущений рельефа. Так, песчаные волны и косы возникают под действием волнений, распространяющихся под большим углом по отношению к береговой нормали. Однако фестоны и мегафестоны могут формироваться и при нормальном к берегу волнении под влиянием циркуляционных ячеек в прибойной зоне. Подводные валы также развиваются благодаря механизму самоорганизации при доминировании транспорта наносов в сторону берега. Полученные результаты помогают интерпретировать имеющиеся данные наблюдений в отношении эволюции мульти-валовых систем.

Ключевые слова: ***пляжевые фестоны, мегафестоны, песчаные волны, косы, подводные валы, мульти-валовые системы, транспорт наносов, самоорганизация рельефа***

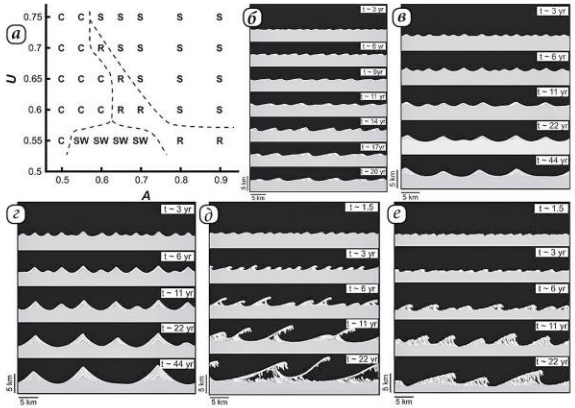


Рис. 3. (*а*) Типы ритмических структур контура берега, формирующиеся при различных сочетаниях параметров U и A: C – мега-фестоны, SW – вдольбереговые песчаные волны, S – песчаные косы, R – reconnecting spits; (*б*) – вдольбереговые песчаные волны (A=0.65, U=0.55); (*в*) – слабо выраженные мегафестоны (A=0.5, U=0.6); (*г*) – рельефные мегафестоны (A=0.5, U=0.7); (*д*) – песчаные косы (A=0.7, U=0.65); (*е*) – reconnecting spits (A=0.7, U=0.6). По (Ashton, Murray, 2006)

сколько меньших U и A формируются так называемы ***reconnecting spits*** (рис. 3*е*) – косы, головная часть которых под действием волн противоположного направления стремится соединиться с берегом. Как видно, модель «волнений больших углов» адекватно воспроизводит наблюдаемые свойства ритмических форм контура берега. Их длина λ, согласно полученным результатам, растёт со временем приблизительно как $\sqrt{t}$.

В проведённых численных экспериментах ритмические структуры формировались в течение сравнительно короткого (по геологическим меркам) периода времени и достигли длины порядка 10 км. Однако шаг подобных форм, развивавшихся на протяжении всего позднего голоцена (5 тыс. лет), может, по расчётам, приблизиться к нескольким десяткам километров (Ashton, Murray, 2006a). Как видно на рис. 4, структуры с таким шагом действительно существуют в природе.

УДК 551.4.038:551.435.3(985)

Анализ морфодинамики берегов Карского моря по разновременным данным дистанционного зондирования

А.В. Новикова, С.А. Огородов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет

Analysis of morphodynamics of the coasts of the Kara Sea based on multi-temporal remote sensing data

A.V. Novikova, S.A. Ogorodov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

anna.novikova@geogr.msu.ru

Summary. Based on the analysis of multi-temporal remote sensing data, morphogenetic and dynamic types of the coasts of the Karst Sea (inland part) have been studied. Among the morphogenetic types, low-laidas (30%), thermoabrasion (26%) and abrasion-thermodenudanation (20%) are predominant. During the last ~50 years, most of the coasts (60%) did not show any significant dynamics and are classified as a stable. 3% of the coasts experienced advance, while 37% - retreated, with about 4% with rates exceeding 2 m/year. Meanwhile, it was found that the current dynamics of the coast along a significant length (about 35% of the coastline) does not correspond to its morphogenetic type.

Keywords: ***Kara sea, coastal dynamics, coastal morphology, thermoabrasion, remote sensing data***

Резюме. На основе анализа разновременных данных дистанционного зондирования выделены морфогенетические и динамические типы берегов Карского моря (материковое побережье). Среди морфогенетических типов преобладают низменные лайдовые (30%), термоабразионные (26%) и абразионно-термоденудационные (20%) берега. За последние 50 лет до 60% берегов не проявили существенной динамики и отнесены к стабильному динамическому типу. 3% берегов испытывали выдвижение береговой линии, около 37% берегов отступали, при этом около 4% со скоростями более 2 м/год. Установлено, что современная динамика берега на значительном протяжении (около 35% береговой линии) не соответствует его морфогенетическому типу.

Ключевые слова: ***Карское море, морфодинамика берегов, термоабразия, данные дистанционного зондирования***

Введение

Арктические берега, будучи в большинстве своём сложены многолетнемёрзлыми породами (ММП), крайне динамичны, и в среднем для них характерно отступание со средней скоростью 0,5 м/год (Lantuit et al., 2012). В последние десятилетия на многих участках отмечается ускоре-

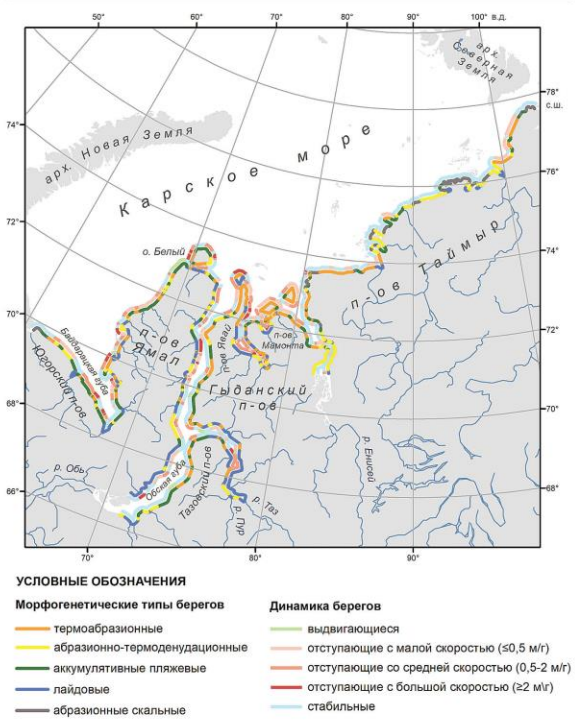


Рис. 2. Карта морфодинамики берегов Карского моря

термоденудационные берега. Если для термоабразионных берегов характерно интенсивное волновое воздействие, то на абразионно-термоденудационных преобладают процессы термоденудации.

Для многих участков Карского моря, где характерна низкая льдистость отложений и отсутствие включённых ледяных тел, характе-

УДК: 551.435.7

Прибрежные дюны Белого моря: типизация, распространение и тенденции развития в голоцене

Т.Ю. Репкина[1], П.А. Леонтьев[2], Е.Д. Вяткин[3,2], А.Л. Гуринов[1,4], Ю.А. Кублицкий[2], А.К. Крехов[5], Н.Н. Луговой[3,1], А.В. Орлов[2], А.П. Яковлева[1]

[1]Институт географии РАН, Москва, Россия; [2]РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия; [3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; [4]НИУ ВШЭ, факультет географии и геоинформационных технологий, Москва, Россия; [5] СПБГУ, Физический факультет, Санкт-Петербург, Россия

Coastal dunes of the White Sea: a review of classification, spatial distribution and evolution patterns in the Holocene

T.Yu. Repkina[1], P.A. Leontiev[2], E.D. Vyatkin[3,2], A.L. Gurinov[1,4], Y.A. Kublitsky[2], A.K. Krekhov[5], N.N. Lugovoi[3,1], A.V. Orlov[2], A.P. Yakovleva[1]

[1]Institute of Geography RAS, Moscow, Russia; [2]Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia; [3]Higher School of Economics, Moscow, Russia; [4]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; [4]Saint-Petersburg State University, the Faculty of Physics, Saint-Petersburg, Russia

t-repkina@yandex.ru

Summary. This research presents an overview of the coastal dunes morphological types within White Sea Coast, as well as the patterns of their evolution during the Holocene. We have identified four types of Holocene coastal dunes: beach ridge plains and foredune plains, cliff-top dunes, blowouts and parabolic dunes and transgressive dunefields. They formed later than ~ 9.5 ka cal BP within the eastern coast of the White Sea, where, due to the slow post-glacial uplift (no more than ~3 mm/year) or long-term stabilization of the relative sea level, existed favorable conditions for the accumulation of sufficient sand volumes in the coastal zone. The main source of dunes nourishment was the sediment influx into the coastal zone due to selective erosion of glacial sediments. The solid river runoff was significant for dune nourishment within the coasts of estuaries and deltas. The rhythmic patterns of periods with increased/onset of aeolian activity in different parts of the White Sea Coast were asynchronous. The regional activation of aeolian processes (~ 0.9–0.5 ka cal BP) is likely associated with an increase in storm activity during the Little Ice Age. Over the past decades, human activity has begun to directly affect the dynamics and intensity of aeolian processes along certain parts of the White Sea Coast.

Key words: ***coastal dynes, relative sea level changes, morphodynamics, chronology, Holocene, the White Sea, Russian Arctic***

Резюме. Представлен обзор данных о морфологии прибрежных дюн Белого моря, а также тенденциях их развития в голоцене. Выделены четыре типа голоценовых прибрежных дюн: перевеянные береговые валы и/или древние авандюны; дюны на абразионных уступах; дюны прорыва и параболические дюны; трансгрессивные дюнные поля. Они формировались позже ~9.5 тыс. кал.л.н. на восточных берегах Белого моря, где благодаря медленному (не более ~3 мм/год) послеледниковому понижению или продолжительной стабилизации относительного уровня моря существовали условия для накопления в береговой зоне запасов песка. Основным источником питания дюн были наносы, поступившие в береговую зону за счёт селективного размыва отложений ледникового комплекса. Твёрдый сток рек был значим для питания дюн на берегах эстуариев и дельт. Периоды усиления/начала эоловой активности на разных участках побережья не были синхронны. Региональная активизация эоловых процессов (~0.9–0.5 тыс. кал.л.н.) связана, вероятно, с увеличением штормовой активности во время малого ледникового периода. В последние десятилетия на некоторых участках побережьях Белого моря динамику и интенсивность эоловых процессов определяет деятельность человека.

Ключевые слова: ***прибрежные дюны, изменения относительного уровня моря, морфодинамика, хронология, голоцен, Белое море, Российская Арктика***

Введение

Эоловые процессы – одна из важнейших составляющих морфолитогенеза берегов Мирового океана (Зенкович, 1962). По отношению к основному источнику питания – наносам береговой зоны, выделяют «первичные» и «вторичные» аккумулятивные эоловые формы (*coastal dunes*) (Sloss et al., 2012). «Первичные дюны», в том числе авандюны, образуются в тыловой части пляжа в результате ветровой аккумуляции песчаных наносов (Зенкович, 1962; Леонтьев и др., 1975 и др.). «Вторичные дюны» возникают и развиваются за счёт перевеивания первичных эоловых форм. Они разнообразны по морфологии и динамике и могут быть распространены на значительном расстоянии от современной береговой линии (Hesp, 2011; Courrech du Pont et al., 2024).

Факторами, влияющими на активизацию выноса песка с пляжей и приливных осушек, зарождение и развитие «первичных» и «вторичных» прибрежных дюн чаще всего считают сочетание изменений относительного уровня моря, режима ветров и баланса наносов в береговой зоне (см. обзоры Hesp, 2002; Выхованец, 2003; Hesp, 2013; Wolfe, 2014; Hesp et al., 2022; Vimpere, 2023). К важным факторам относят также изменения температуры и влажности воздуха (Clemmensen et al., 2008; Wolfe, 2014; Vimpere, 2023), уровня грунтовых вод (Kocurek et al., 2001), растительности (Hellemaa, 1998 и др.) и пожары (Hesp, 2013

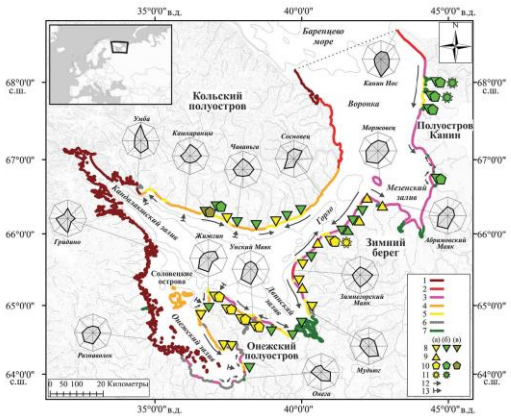


Рис. 1. Генетические типы берегов и «вторичных» прибрежных дюн Белого моря
Условные обозначения: Генетические типы берегов. Берега, сформированные: 1 – *субаэральными денудационными и/или тектоническими процессами и мало измененные морем*; 2–5 – *преимущественно волновыми процессами:* абразионные активные и отмирающие, выработанные: 2 – в скальных породах, 3 – в рыхлых отложениях, в том числе в многолетнемерзлых отложениях с малой льдистостью; 4 – абразионно-аккумулятивные, 5 – аккумулятивные (пляжевые и лагунные); 6–7 – *преимущественно неволновыми процессами*: 6 - приливно-отливными (осушные), 7 – устьевыми (дельтовые и эстуарные). *Типы «вторичных» прибрежных дюн:* 8 – перевеянные береговые валы и/или древние авандюны; 9 – дюны на абразионных уступах; 10 – дюны прорыва и/или параболические дюны; 11 – трансгрессивные дюнные поля. Цветом значка показаны источники питания дюн: (а) наносы пляжей и приливных осушек, (б) тоже при участии твердого стока рек, (в) тоже при участии водно-ледниковых отложений. *Преобладающие направления потоков наносов*: 12 – вдольбереговых, 13 – поперечных. Розы-диаграммы - среднегодовая повторяемость направлений ветра в 1976–2006 гг., внешний контур роз-диаграмм соответствует повторяемости 25%; курсив – название ГМС (Атлас…, 2022). Картографическая основа (ВСЕГЕИ…, 2022). По (Репкина, Яковлева, 2023, с изменениями).

а типизация дюн – на основе классификаций (Bird, 2008; Hesp, 2011; Sloss et al., 2012). Выделены типы дюн, отличающиеся друг от друга морфологией, механизмами и условиями формирования (Hesp, 2002;