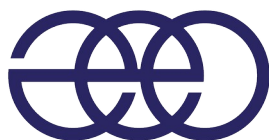




XVIII гляциологический симпозиум
«Гляциосфера Земли – состояние, изменение и взаимодействие её
компонентов»

7 – 11 октября 2024 г.

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ



**ИНСТИТУТ
ГЕОГРАФИИ**
Российской
академии наук
основан в 1918 году



**СОЧИНСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ПАРК**

Институт географии РАН и Сочинский национальный парк
г. Сочи

Сборник тезисов докладов XVIII гляциологического симпозиума «Гляциосфера Земли – состояние, изменение и взаимодействие её компонентов» (Сочи, 7–11 октября 2024 г.) / ред. Р.А. Чернов. – М. 2024. – 72 с.

ISBN 978-5-6053090-0-0

В сборнике представлены материалы симпозиума по следующим темам:

- 1) Динамика ледниковых систем разного масштаба в условиях меняющегося климата (включая дистанционные наблюдения, результаты масс-балансовых измерений, оценки состояния ледников Арктики, моделирование горных ледников).
- 2) Мониторинг и прогноз опасных гляциологических явлений (исследования лавин и селей, прорывов приледниковых озер, образования айсбергов).
- 3) Реконструкция климата и окружающей среды по данным кернов льда, ледниковых отложений, дендрохронологии и других прокси-записей.
- 4) Мониторинг снежного покрова и моделирование эволюции снежной толщи.
- 5) Рассмотрены вопросы каталогизации ледников России.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ СИМПОЗИУМА

Котляков Владимир Михайлович – научный руководитель Института географии РАН, академик РАН, д-р геогр. наук.

Смирнова Полина Олеговна – заместитель директора ФГБУ «Сочинский национальный парк» по экологическому просвещению.

Зобнин Александр Владимирович – председатель ГОО «Сочинское географическое общество».

Ковалев Андрей Юрьевич – советник главы муниципального образования городской-округ город-курорт Сочи Краснодарского края.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ СИМПОЗИУМА

Глазовский А.Ф., Чернов Р.А., Корнева И.А. – (Институт географии РАН)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА МЕРОПРИЯТИЯ

Беляева Т.Н., Крупская В.В., Воробьев М.А., Дроздов Е.Д., Агафонова З.П., Ананичева М. Д.



ООО ГК «РОСГЕО»

Адрес для корреспонденции: glac_2024@igras.ru

ОГЛАВЛЕНИЕ

Агафонова З.П., Никитин С.А., Носенко Г.А. Современные тенденции изменения ледников Кавказа.....	7
Ананичева М.Д., Адаменко М.М., Абрамов А.А. Современное состояние объектов криосферы Кузнецкого Алатау по спутниковым снимкам и полевым исследованиям.....	8
Банцев Д.В., Овсепян А.А., Козачек А.А., Распутина В.А. Результаты изотопно-гидрологических работ в долине р. Талдура (Южно-Чуйский хребет) в 2023 г.....	9
Большаинов Д.Ю., Парамзин А. С. Ёжиков И.С., Коблашов И.Д., Секисов Н.Л., Соколов В.Т. Результаты десятилетних (2014-2023) гляциологических исследований на архипелаге Северная Земля.....	10
Большаинов Д.Ю., Макеев В.М., Ёжиков И.С., Коблашов И.Д. Динамика толщины деятельного слоя грунта многолетнемерзлых пород в последние десятилетия и возможность существования сквозных таликов на дне приледниковых озёр архипелага Северная Земля.....	11
Борисик А.Л., Новиков А.Л., Харитонов В.В. Термическое состояние ледника Альдегонда по данным георадиолокации и термометрии глубоких скважин. Первые результаты.....	12
Борисик А.Л., Овсяков Е.И., Анисимов М.А., Демидов Н.Э. Оптимальный комплекс исследований при выборе мест расположения пунктов наблюдений государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты.....	13
Викулина М.А. Лавинная опасность в Хибинах в условиях увеличения туристического потока.....	14
Виноградова М.М., Воробьёв М.А., Кутузов С.С., Хайрединова А.Г., Чинова Ю.Н., Михаленко В.Н. Первые данные о содержании микроэлементов в ледниковом льду Камчатки.....	15
Воробьёв М.А., Кутузов С.С., Виноградова М.М., Хайрединова А.Г., Чинова Ю.Н., Михаленко В.Н. Влияние различных источников атмосферных аэрозолей и сезонного таяния на химический состав ледяного керна вулкана Ушковский, Камчатка.....	16
Воронцова В.С., Торопов П.А. Метеорологические условия формирования селей на территории Сочи.....	17
Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И. Полигонально-жильные структуры засоленных голоценовых отложений арктического шельфа Евразии по космическим данным	18
Ганюшкин Д.А., Деркач Е.С., Горбунова Ю.А., Алексейкова А.С. Сокращение ледников Монгольского Алтая.....	19
Глазовский А.Ф., Никольский Д.Б. Сток льда в море и айсбергопродукция выводных ледников Российской Арктики.....	20
Грига С.А., Ганюшкин Д.А. Ретроспективное прогнозирование формирования приледниковых озёр Южно-Чуйского хребта за период 2000–2021 гг.....	21
Григорьев М.Н. Распространение и особенности залегания толщ ледового комплекса на побережье морей Восточной Сибири.....	22
Губанов А.С. Разрастание моренного покрова на ледниках Кавказа с начала XXI века.....	23

Дегтярев А.И., Лаврентьев И.И. Баланс массы ледников южного и северного склонов Эльбруса: Гарабаши и Микельчиран.....	24
Долгова Е.А., Семеняк Н.С., Бичурин Р.Р. Климатическая чувствительность лиственницы, растущей на полуострове Камчатка.....	25
Дроздов Е.Д., Турков Д.В., Ломакин А.А. Альbedo снежного покрова и его параметризация для целей моделирования природных систем и климата.....	26
Жукова Е.Д., Турчанинова А.С., Петраков Д.А. Лавинная активность в условиях меняющегося климата на территории России.....	27
Зайцева Н.А. О работах Российской академии наук на архипелаге Шпицберген.....	28
Иванов В.И., Слагода Е.А., Хомутов А.В. Ледяные псевдоморфозы в четвертичных отложениях IV прибрежно-морской равнины Центрального Ямала.....	29
Киселева Т.Д., Лаврентьев И.И., Абрамов А.А., Хайрединова А.Г. Гляциологические исследования в кратере Восточной вершины Эльбруса в 2024 г.....	30
Киселева Т.Д., Абрамов А.А., Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Пименов Н.А. Комплексные снегомерные работы с использованием высокочастотного радиолокационного зондирования на леднике Левый Актру.....	31
Комаров А. Ю. Влияние микроструктуры снега на впитывание рассолов.....	32
Комаров А. Ю., Селиверстов Ю. Г., Турчанинова А. С., Сократов С. А. Новый подход к моделированию стратиграфии снега с использованием среднесуточных данных метеостанций.....	33
Корнева И.А., Рыбак О.О. Данные климатического моделирования CMIP6 за XV-XXI вв. для оценки динамики оледенения Эльбруса.....	34
Курашева О.А. Содержание тяжелых металлов в снега на западной вершине и седловине Эльбруса.....	35
Лаврентьев И.И., Борисик А.Л., Мачерет Ю.Я., Судакова М.С. Изменение гидротермической структуры политермического ледника Фритьоф на Шпицбергене по данным повторных радиолокационных измерений.....	36
Лебедева Л.С., Павлова Н.А. Происхождение подземных вод сплошной криолитозоны центральной Якутии по изотопным данным.....	37
Мавлюдов Б.Р. Динамика баланса массы ледникового купола Беллинсгаузен, остров Кинг-Джордж, (Ватерлоо).....	38
Мавлюдов Б.Р. О характере движения льда ледника Альдегонда, Шпицберген.....	39
Лукин В.В., Марков А.Н. Актуальные проблемы соотношения гипотезы тектонического доледникового генезиса котловины и водного тела подледникового озера Восток и роли ледникового покрова Антарктиды.....	40
Муравьев А.Я., Хромова Т.Е. Сокращение оледенения хребта Орулган (Верхоянский хребет) в 1951–2023 гг.....	41

Муравьев Я.Д., Марченко Е.С. Вулкано-ледниковое взаимодействие на Мутновском вулкане (Камчатка): причины и следствия развития опасных процессов.....	42
Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Шеин А.Н., Иванов М.Н., Лаврентьев И.И., Леопольд Я.К., Синицкий А.И., Токмаков В.В. Баланс массы ледника ИГАН (Полярный Урал) в 2018-2023 гг.....	43
Опокина О.Л., Бабкин Е.М., Слагода Е.А., Данько М.М., Хомутов А.В. Роль снежного покрова в формировании микрорельефа на центральном Ямале.....	44
Осипов Э.Ю., Осипова О.П. Измерение и моделирование летнего баланса массы на ледниках Кодара (Забайкалье).....	45
Попов С.В., Шерстенникова С.Р., Боронина А.С., Лебедева Л.С. Влияние лесных пожаров на формирование и развитие субэдральных таликов центральной Якутии по данным натурных измерений и результатам математического моделирования.....	46
Постникова Т.Н., Рыбак О.О., Губанов А.С., Зеколлари Х., Хусс М. Математическое моделирование эволюции ледников Эльбруса в XXI веке.....	47
Прохорова У.В., Терехов А.В., Барсков К.В., Чечин Д.Г., Репина И.А., Иванов Б.В., Варенцов М.И., Артамонов А.Ю. Роль турбулентного теплообмена в структуре теплового баланса ледников центральной части о. Западный Шпицберген.....	48
Рыбак О.О., Корнева И.А., Рыбак Е.А., Постникова Т.Н. Влияние случайных погодных флуктуаций на модельные оценки поверхностного баланса массы ледникового комплекса Эльбруса.....	49
Селиверстов Ю. Г., Комаров А. Ю., Гребенников П. Б., Турчанинова А. С., Сократов С. А. Снежный покров в Московском регионе: 10 лет полевых наблюдений и измерений.....	50
Сидорова О.Р., Макштас А.П., Богородский П.В., Махотина И.А. Сезонное оттаивание грунта в районе мыса Баранова.....	51
Слагода Е.А. Текстуры и структуры подземных льдов (иллюстрированная версия).....	52
Сократов С.А. Статистический подход к расчёту дальности выброса лавин.....	53
Соломина О.Н., Джомелли В., Бушуева И.С., Чартон Дж. Новые данные о датировках голоценовых морен на Северном Кавказе.....	54
Стельмах Ю. Ю., Петраков Д. А. Изменения ледников и снежников Мутновского и Горелого вулканов (юг Камчатки) с 1973 года.....	55
Сушинцев И.М., Дроздов Е.Д., Торопов П.А. Метеорологические условия формирования снежной толщи в высокогорных районах Камчатки в условиях современных изменений климата.....	56
Тебенькова Н.А., Хомякова В.А., Липенков В.Я., Саламатин А.Н. Общее газосодержание керна древнего атмосферного льда со станции Восток.....	57
Терехов А.В., Прохорова У.В., Веркулич С.Р. Пересмотр баланса массы ледников острова Беннетта, Восточно-Сибирское море.....	58
Торопов П.А., Дроздов Е.Д., Шестакова А.А., Сушинцев И.М., Михаленко В.Н. Моделирование осадков в горных районах применительно к задачам гляциологии.....	59
Трунин Д. А. Скорость движения ледников Валленберга, Круне и Монако по данным	

дистанционного зондирования за 2017-2023 гг.....	60
Хайрединова А.Г., Воробьев М.А., Кутузов С.С., Виноградова М.М., Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н. Причины сезонных вариаций минеральной пыли на Камчатке.....	61
Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Термоцирки Карского региона: факторы активизации термоденудационных процессов и активность термоцирков на центральном Ямале.....	62
Чернов Р.А., Андросова Е.Е. КОМЕТА – математическая модель эволюции снежного покрова для задач лавиноведения и снеговедения.....	63
Чернов Р.А. Экспериментальное определение коэффициента вязкости сухого снега.....	64
Черноус П.А., Боброва Д.А. Ошибки оценивания лавинной опасности и морфометрия Лавиносборов.....	65
Черноус П.А. Феноменологическая модель возникновения лавины из снежной доски.....	66
Черняков Г.А., Елагина Н.Э., Киселева Т.Д. Датирование ледниковой толщи западного плато Эльбруса на основе модели течения льда.....	67
Чеховских А.М., Поповнин В.В., Губанов А.С. Применение пространственно-временных связей для расчета аккумуляции ледника.....	68
Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Корнева И.А., Муравьев Я.Д., Хайрединова А.Г., Воробьев М.А. Особенности формирования изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) ледникового льда в кратере вулкана Ушковский.....	69
Шейнкман В.С., Мельников В.П. Оледенение севера Западной Сибири с позиций его взаимодействия в плейстоцене с криолитозоной и принципа актуализма.....	70
Шейнкман В.С., Мельников В.П., Седов С.Н., Андроханов В.А. Холистическая модель полигонально-жильного льдообразования на севере Западной Сибири в плейстоцене.....	71
Шерстенникова С.Р., Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С. Моделирование процесса формирования и развития субаквальных таликов центральной Якутии.....	72

Современные тенденции изменения ледников Кавказа

Агафонова З.П., Никитин С.А., Носенко Г.А.

Институт географии РАН

zpagafonova@edu.hse.ru

Исследование процессов глобального потепления приобрело большое значение особенно в настоящее время, когда одним из наиболее заметных проявлений изменения климата является таяние ледников и связанные с этим негативные последствия. Результаты оценок скорости изменений размеров ледников Кавказа, выполненных в работах предыдущих исследователей, показывают постепенный рост скорости сокращения площади ледников на протяжении последних десятилетий. Цель данной работы – подтвердить устойчивость этой тенденции на примере ледников Кавказа, оценить величину скорости сокращения их площади с момента проведения инвентаризации ледников Кавказа в 2000 г. до настоящего времени (2023 г.), и определить тенденции изменения ледников в XXI веке.

Для исследования произошедших изменений использовались космические снимки Sentinel-2, полученные в конце периода абляции 2023 года. Границы ледников дешифрировались ручным методом в программной среде ArcGIS и сравнивались с данными Каталога ледников России за 2018 г. и с данными инвентаризации ледников Кавказа за 2000 и 2022 гг. Кроме этого, в работе был проведён комплексный анализ пространственных изменений ледников с использованием цифровой модели рельефа ASTER GDEM Version 003. Однородность использовавшихся массивов данных и методов их обработки обеспечивала сопоставимость полученных результатов. Оценка величины погрешности дешифрирования проводилась буферным методом.

Выполненное исследование позволило оценить величину изменения площади ледников Кавказа с 2000 по 2023 гг. Площадь 1978 ледников составила $1003.76 \pm 35.1 \text{ км}^2$, сокращение за 23 года (2000-2023 гг.) составило $383.4 \text{ км}^2 \pm 35.1 \text{ км}^2$, что эквивалентно $27.6 \pm 3.50\%$, и составляет $1.20\% \text{ год}^{-1}$. Сравнение полученных результатов с данными предыдущих инвентаризаций позволяет сделать вывод об увеличении скорости сокращения ледников на Кавказе за последние 23 года. В период с 2020 по 2023 гг. скорость сокращения ледников Кавказа возросла на $0,04\% \text{ год}^{-1}$.

Полученные результаты свидетельствуют о продолжающемся сокращении площади ледников Кавказа, об увеличении скорости сокращения ледников с 2000 по 2023 гг., а также о необходимости проведения повторных инвентаризаций с более коротким периодом, чем предыдущие, чтобы не пропустить момент исчезновения ледников и быть готовым к возможным последствиям этого события.

Современное состояние объектов криосферы Кузнецкого Алатау по спутниковым снимкам и полевым исследованиям

Ананичева М.Д.¹, Адаменко М.М.², Абрамов А.А.¹

¹ Институт географии РАН

² Сибирский государственный индустриальный университет

maranan@gmail.com

Ледники и снежно-ледовые образования (СЛО) горного массива Кузнецкого Алатау распространены на высотах 1200-1500 м н.у.м, что нехарактерно для внутриконтинентальных районов. Основной фактор, способствующий сохранению оледенения здесь - обильные зимние осадки. С момента интенсивного изучения при составлении Каталога ледников СССР (1980) оледенение района претерпело заметные изменения. Для оценки современного состояния были использованы спутниковые снимки Sentinel-2, дешифрирование контуров ледников сделано по съемке 2021 и 2023 гг (площади и характерные высотные точки). Всего было идентифицировано 78 ледников и 57 СЛО, сокращение площади с 1980 года составило 50-75%. Сравнение площадей и высотного положения делались отдельно для ледников и СЛО по пяти речным бассейнам (рис.1). Высоты верхних отметок либо не изменились, либо снизились от 13 до 26 м в среднем для бассейна. Высоты нижних отметок снизились от 8 до 44 м в среднем по бассейну. В целом, больше всего сократили площадь присклоновые ледники, эти ледники не имеют развитых ниш для накопления снега, далее следуют височие и каровые. Оценки параметров ледников по снимкам проверялись данными экспедиции в район исследований в августе 2024 г. Общими чертами ледников Кузнецкого Алатау являются: небольшие размеры, расположение на небольших высотах, высокая чувствительность к метеорологическим параметрам (осадкам и температуре, а также направлению и силе ветров). В связи с этим, колебания площади льда от года к году могут быть как в сторону ее уменьшения (на фоне потепления климата), так и в сторону некоторого увеличения площади (за счет увеличения снежного переноса и накопления осадков на подветренных склонах в понижениях рельефа).

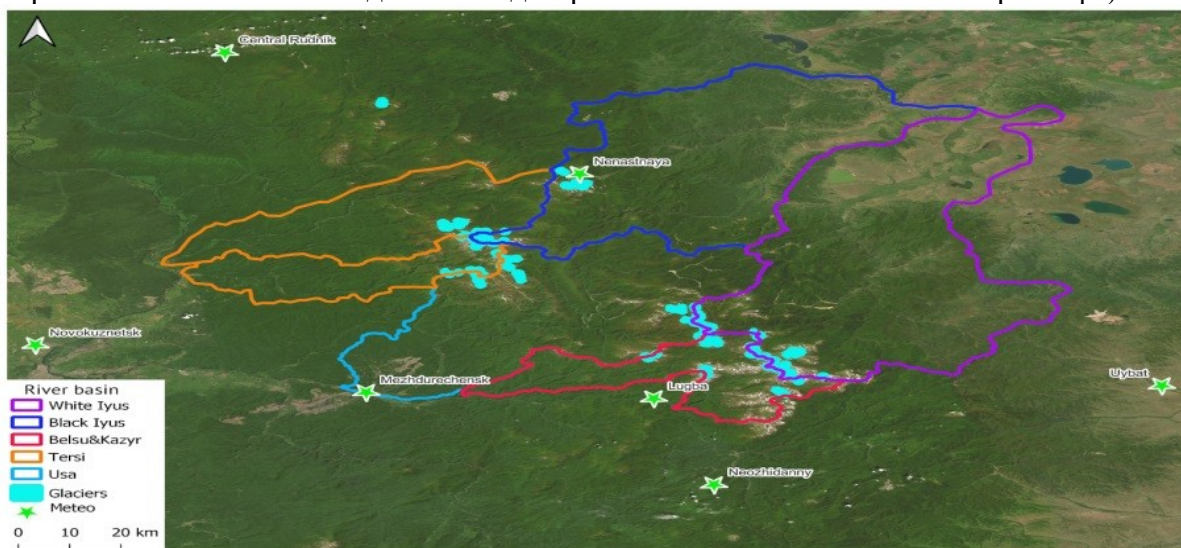


Рисунок. Карта региона: разными цветами показаны границы ледниковых бассейнов

Результаты изотопно-гидрологических работ в долине р. Талдура (Южно-Чуйский хребет) в 2023 г.

Банцев Д.В., Овсепян А.А., Козачек А.А., Распутина В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет

Bancev-d@yandex.ru

В июле-августе 2023 года был выполнен комплекс изотопных, гидрологических и метеорологических исследований в долине р. Талдура, которая берет начало от одного из крупнейших ледников Алтая – Большая Талдура. Целью исследования являлось определение вклада различных компонентов в питание р. Талдура в середине сезона абляции с использованием изотопных трассеров. Были определены изотопные характеристики речной воды, ледникового льда, сезонного снега и событийных атмосферных осадков. В верхнем и нижнем течении р. Талдура были организованы временные гидрологические посты, по результатам наблюдений на которых были построены гидрографы. С использованием полученных изотопных характеристик было выполнено двух и трехкомпонентное разделение гидрографов, которое показало полное преобладание ледникового питания на всем протяжении р. Талдура в сезон абляции 2023 года. При этом из-за большого количества притоков ледникового происхождения наблюдалось увеличение доли ледникового питания в нижнем течении реки. В верхнем течении средняя доля ледникового питания составила 91%, в нижнем – 95%. Выпадавшие осадки изменяют изотопный состав речной воды, но рассчитанный вклад событий осадков в питание как в верхнем, так и в нижнем течении, не превышал 20 %. Вклад талых вод сезонного снега был отмечен только в начале периода наблюдений и не превышал 10 %.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-27-0173 «Оценка вклада различных источников питания в сток ледниковых рек Юго-Восточного Алтая по данным изотопных индикаторов»

Результаты десятилетних (2014-2023) гляциологических исследований на архипелаге Северная Земля

Большаянов Д.Ю., Парамзин А. С. Ёжиков И.С., Коблашов И.Д., Секисов Н.Л., Соколов В.Т.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Гляциологические исследования на архипелаге Северная Земля возобновлены Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) с 2014 г. на «Ледовой базе мыс Баранова», расположенной в с-з части о. Большевик, после значительного перерыва, вызванного закрытием ледникового стационара ААНИИ, действовавшего на леднике Вавилова (о. Октябрьской Революции) с 1974 по 1989 г. Гляциологический полигон им. Л.С. Говорухи расположен на ледниковых куполах Мушкетова (высота 556 м в 2024 г.) и Семёнова-Тян-Шанского (высота 735 м в 2024 г.), на разделяющемся на несколько составных частей леднике Войцеховского и на озере Спартаковском, расположенном между ними. Основная часть наблюдений связана с геодезическими измерениями высоты и плановой привязкой вех, забуриваемых в лёд или в снежно-фирновую толщу ледников. В начале (апрель-май) и в конце (август-сентябрь) сезона таяния на леднике Мушкетова проводятся снегосъёмки, на леднике Семёнова-Тян-Шанского только весной. На периодически спускающемся приледниковом озере Спартаковском ведутся наблюдения за уровнем воды, производятся другие гидрологические наблюдения и отбор донных осадков, фиксируются периоды периодического спуска озера при его переполнении.

За 10 лет наблюдений получены следующие результаты.

Удельный баланс массы ледника Мушкетова циклически колеблется от слабо положительных +206 мм слоя воды) до отрицательных (– 1769 мм слоя воды) значений. Наибольшая потеря массы, как ледника Мушкетова, так и других ледников Северной Земли случилась в аномально тёплом 2020 г.

Высота ледника Семёнова-Тян-Шанского так же колеблется, а в целом за период наблюдений уменьшилась на 2,5 м.

Скорости движения ледников колеблются от первых сантиметров в год на ледоразделах до 11 м/год ближе к выводным ледникам. Лёд краевых поясов нижних частей ледниковых куполов испытывает восходящие движения, на что указывают установленные на них вехи.

Температурный режим верхней части ледниковых куполов (до глубины 10 м) стабилен в течение последних десятилетий.

Озеро Спартаковское впервые за время своего существования со времени Малого ледникового периода в 2021 г. было спущено практически полностью в связи с сокращением лопасти выводного ледника, подпруживающей озеро.

Динамика толщины деятельного слоя грунта многолетнемёрзлых пород в последние десятилетия и возможность существования сквозных таликов на дне приледниковых озёр архипелага Северная Земля

Большаинов Д.Ю., Макеев В.М., Ёжиков И.С., Коблашов И.Д.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Наблюдения на мерзлотном полигоне «Ледовой базы мыс Баранова» Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) в с-з части о. Большевик с 2016 по 2024 г.г. показали циклические колебания максимальной глубины сезонного протаивания грунта от 0,49 до 0,82 м (средняя 0,26-0,36 м). Сравнение этого ряда данных с аналогичными измерениями по профилям в центре о. Октябрьской Революции, выполненным на той же широте в 1974-1978 г.г. показали увеличение толщины деятельного слоя грунта в настоящее время по сравнению с прежними измерениями лишь на несколько сантиметров. Годичный цикл измерения температур грунта на полигоне с помощью термокосы на глубинах установки вытяжных почвенных термометров показал правильность определения толщины деятельного слоя грунта в сильно каменистых грунтах.

Измерения температуры льда на ледниковых куполах в скважинах глубиной до 10 м в настоящее время и сравнение их с данными по температуре льда 70-х годов прошлого века доказали стабильность температурного режима ледников. Под ледниками грунты остаются промёрзшими до температур -7 — -11 °С и нет никаких причин ожидать их изменений даже при более значительных колебаниях климата по сравнению с современными.

В приледниковых озёрах, существующих на архипелаге со времени Малого ледникового периода могут образовываться сквозные талики, на что указывает повышение температуры воды у дна на глубинах до 140 м в приледниковом озере Спартаковском на о. Большевик.

Термическое состояние ледника Альдегонда по данным георадиолокации и термометрии глубоких скважин. Первые результаты

Борисик А.Л., Новиков А.Л., Харитонов В.В.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

Ледник Альдегонда, расположенный в западной части Земли Норденшельда вблизи пос. Баренцбург за последние годы стал полигоном для проведения самых разных видов исследований. Одним из видов наблюдений на леднике является георадиолокация, по данным которой определён рельеф его ложа, рассчитан объём льда, а также, на основании наличия в толще ледника большого количества локальных отражений, сделан вывод о его политермическом строении. Поперечный профиль ложа ледника имеет неравномерное строение с глубоким врезом вблизи правого борта и относительно ровным и менее глубоким ложем в центре и у левого борта. Выделенная область тёплого льда заполняет наиболее глубокую часть ледника у правого борта и имеет вытянутую форму в соответствии с подлёдным рельефом, занимая около 15% площади ледника (рис., врезка).

С целью определения термического состояния ледника и сопоставления с полученными ранее георадиолокационными данными, весной 2024 года, в ходе экспедиции РАЭ-Ш ААНИИ, на леднике было выполнено бурение двух глубоких скважин в областях распространения тёплого и только холодного льда с установкой термокос на длительный период. Буровые работы производились с помощью установки для термобурения УВБЛ-2, предназначенной для бурения скважин во льду горячей водой.

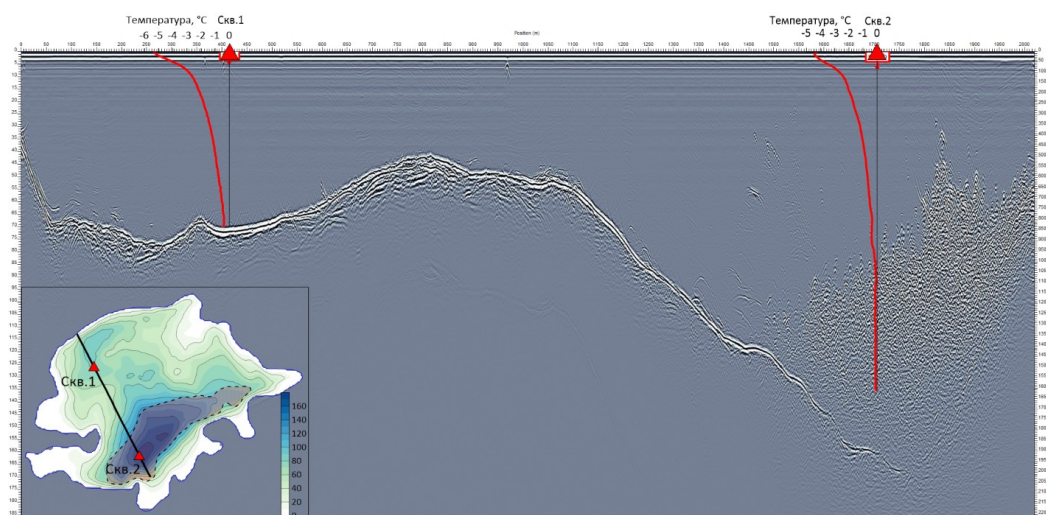


Рисунок. Поперечный профиль через ледник Альдегонда с нанесённым положением скважин и графиками температуры в них за 26.05.24. На врезке показана карта глубин, пунктиром показана область тёплого льда.

Первые результаты термометрии, полученные в весенне-летний период, хорошо согласуются с данными георадиолокации. Так, в скважине 1 находящейся в области холодного льда температура постепенно повышается от -6°C вблизи поверхности, до -0.4°C на ложе. В скважине 2, расположенной в области распространения тёплого льда, схожий рост температуры продолжается до зоны интенсивных отражений на глубине около 85 м соответствующей границе холодного и тёплого льда на радарограмме. Ниже, температура остаётся практически постоянной и составляет около -0.1°C . Также, за отчётный период наблюдений, в интервале глубин 65-90 м, отмечено локальное понижение температуры до -0.3°C , вблизи границы холодный-тёплый лёд.

Оптимальный комплекс исследований при выборе мест расположения пунктов наблюдений государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты

Борисик А.Л., Овсяков Е.И., Анисимов М.А., Демидов Н.Э.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Происходящая вследствие потепления климата деградация многолетнемерзлых пород (ММП) оказывает существенное влияние как на природную среду (рельеф, гидрологический режим, растительность, эмиссию парниковых газов), так и на хозяйственную деятельность человека (строительство и эксплуатацию сооружений, добычу полезных ископаемых, ведение сельского хозяйства). С целью определения воздействия климатических изменений на ММП и прогнозирования их состояния в будущем с 2022 года в Российской Федерации (РФ) на базе наблюдательной сети Росгидромета организуется Государственная система фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты. К концу 2025 года сеть будет включать в себя 140 пунктов наблюдений (ПН), расположенных относительно равномерно по всей территории криолитозоны РФ.

Выбор ПН является важным мероприятием необходимым для достижения репрезентативности получаемых данных и опирается на ряд критериев, ранжированных по степени важности. Среди наиболее важных можно отметить максимально полный охват различных физико-географических условий, равномерность распределения ПН, их репрезентативное распределение в соответствии с установленной климатической зональностью и геокриологическим районированием, а также максимально возможная близость ПН к действующим метеостанциям с наиболее длительными рядами метеорологических наблюдений и приоритетом выбора в том случае, если на метеостанции ведутся наблюдения за температурами грунтов на глубинах до 3,2 м.

В докладе представлены основные этапы выбора ПН, включающие:

- анализ спутниковой информации и сведений из доступных информационных баз, включая литературные данные;
- сбор сведений о текущем состоянии ближайшей метеостанции и её территории, актуального списка ведущихся метеорологических наблюдений;
- проведение маршрутных исследований в районе метеостанции с выявлением и фиксацией особенностей местного рельефа, четвертичных отложений и почв (с изучением почвенно-грунтового разреза в шурфах), ландшафтов, растительного покрова (со сбором гербария), криогенных форм рельефа;
- выполнение геофизических исследований вместе с термометрией в заверочных скважинах на участках, предварительно выбранных для размещения ПН.

Предлагаемый комплекс исследований, выработанный с учётом опыта проведения рекогносцировочных работ на ММП разного типа и глубины залегания, позволяет с большой долей вероятности определять наличие и положение кровли ММП, а также возможное присутствие внутренних таликов. Результатом применения выбранного комплекса становится участок, наиболее подходящий для размещения ПН государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты.

Лавинная опасность в Хибинах в условиях увеличения туристического потока

Викулина М.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова

masanna2003@mail.ru

Последнее десятилетие характеризовалось ростом туристического потока в Хибин, который многократно увеличился в результате различных ограничений. Несмотря на небольшие размеры Хибин обладают богатым рекреационным потенциалом. Кроме традиционно развитых здесь видов зимнего туризма (горнолыжный спорт и беговые лыжи), широкую популярность приобрели такие экстремальные виды спорта, как фрирайд и скидукинг. Многие приезжают не подготовленными к горным условиям и возможному сходу лавин. Даже наличие местных гидов не является гарантом безопасности, так как уровень лавинной грамотности у населения достаточно низкий. Об этом свидетельствует трагический случай в январе 2024го года, когда сошедшая лавина привела к гибели двух водителей снегоходов.

Катастрофические лавины сходят в Хибинах практически ежегодно, начиная с 2010 года, в том числе и за счет развития новых видов активного отдыха. За это время свыше 40 человек попали в лавины и 90 процентов из них - туристы. Данные расчетов показывают, что не только «дикие» туристы подвергаются лавинной опасности. В пределах городской застройки часть инженерных сооружений не представляют полноценной защиты от лавин.

В последние годы в Хибинах отмечаются среднеснежные и многоснежные зимы, что также приводит к увеличению количества пострадавших. Хотя малое количество снега еще не является условием для низкой лавинной опасности, так как из-за частых метелей снег скапливается в нижних частях склонов, и это становится достаточным условием для схода опасных для жизни людей лавин.

Существующие планы дальнейшего наращивания туристического потенциала региона и возможного расширения горнолыжных центров приведут к еще большему росту туристического потока и соответственно росту лавинного риска и увеличению количества пострадавших от лавин. Таким образом, обеспечение лавинной безопасности должно быть в приоритете при дальнейшем развитии региона.

Работа выполнена в рамках госзадания кафедры криолитологии и гляциологии «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

Первые данные о содержании микроэлементов в ледниковом льду Камчатки

Виноградова М.М.¹, Воробьев М.А.¹, Кутузов С.С.¹, Хайрединова А.Г.¹, Чижова Ю.Н.^{1,2},
Михаленко В.Н.¹

¹Институт географии РАН

²Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН

marvin@igras.ru

В настоящее время все более актуальным становится изучение содержания микроэлементов в ледниковых кернах. Интерес к исследованиям микроэлементов в ледниковом льду связан с возможностью более точного определения источников и путей поступления химических примесей в толщу ледников. С этой точки зрения, ледники Камчатки по-прежнему остаются малоизученными. В данной работе впервые был проанализирован микроэлементный состав льда неглубокого керна (14 м), полученного в кратере Горшкова вулкана Ушковский в сентябре 2022 года. С помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой получены данные о количественном содержании широкого спектра химических элементов: Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Nb, Ru, Rh, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th и U. Полученные результаты были соотнесены с возможными источниками поступления веществ, такими как вулканическая активность, выветривание местных пород, дальний перенос пылевых частиц и т.д. Наличие инфильтрационного льда в керне указывает на циклы таяния и повторного замерзания, как и наличие жидких осадков в летний период могут способствовать вертикальной миграции веществ. Все это указывает на сложный механизм формирования химической записи в леднике и возможные трудности при интерпретации данных для построения реконструкций климата в регионе. Поддержано грантом РФФ 22-17-00159.

Влияние различных источников атмосферных аэрозолей и сезонного таяния на химический состав ледяного керна вулкана Ушковский, Камчатка

Воробьёв М.А.¹, Кутузов С.С.¹, Виноградова М.М.¹, Хайрединова А.Г.¹, Чижова Ю.Н.^{1,2}, Михаленко В.Н.¹

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН

m.vorobyev@igras.ru

Камчатка – второй по размеру в России район оледенения, который подходит для палеоклиматических реконструкции по ледяным кернам. Различные факторы (вулканическая активность, низкая антропогенная нагрузка и т.д.) формируют уникальную, но в тоже время сложную для интерпретации химическую запись в местных ледниках.

В этом докладе мы представляем результаты исследования химического состава (содержание основных неорганических ионов Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , NO_3^- и SO_4^{2-}) и структурно-стратиграфических особенностей неглубокого ледяного керна (13.85 м), полученного в кратере вулкана Ушковский осенью 2022 г.

Было установлено, что профили концентрации ионов в разной степени подвержены влиянию сезонного таяния. Кроме того, дополнительную трудность в интерпретации палеосигнала создают частые крупные стохастические события (извержения вулканов и лесные пожары Сибири). Были выделены три группы ионов с разными основными источниками, также выполнена оценка вымывания различных ионов в результате инфильтрации талой воды. Было показано, несмотря на сложный механизм формирования химической записи в леднике Ушковского, полученные профили концентрации основных ионов могут быть использованы для построения реконструкций условий окружающей среды в регионе. Однако усиливающееся таяние может привести к существенному нарушению и потере климатического сигнала уже в ближайшее время.

Поддержано грантом РНФ 22-17-00159.

Метеорологические условия формирования селей на территории Сочи

Воронцова В.С., Торопов П.А.

Институт географии РАН

С увеличением общего числа опасных явлений погоды (экстремальных осадков и наводнений) по всей планете увеличилось число опасных селевых ситуаций.

Прогноз селей – важная задача, для решения которой используются динамические модели, требующие большого количества входной информации – метеорологической и геоморфологической. В данной работе предлагается подход, основанный на выявлении физико-статистической связи характеристик осадков (суточных сумм, интенсивности) в той или иной синоптической ситуации с возникновением селевых ситуаций.

Для исследования использовались данные pluviографа по интенсивности осадков мм/10 мин с 1997 по 2022 гг. для территории Сочи. Вычисленные параметры (максимальная интенсивность, мм/10 мин и продолжительность дождя, час) были сопоставлены с датами селевых ситуаций на территории Сочи, что позволило выявить пороговые значения для прохождения селей (интенсивность осадков не менее 2 мм/10 мин продолжительностью не менее 1 часа).

По данным реанализа ERA5 были построены карты (приземные и высотные) основных метеорологических параметров для визуализации синоптических ситуаций во время прохождения селей. Данный анализ позволил определить и классифицировать основные барические образования, необходимые для возникновения интенсивных осадков, вызывающих сели.

Для более детального рассмотрения каждой селевой ситуации были построены графики сумм осадков по данным метеостанций и реанализа ERA5, а также интенсивности осадков по данным pluviографа (осадки были отрисованы не только в день прохождения селя, но и за три дня до него, чтобы учесть промачиваемость грунтов). Анализируя данные графики были сделаны выводы о генезисе осадков (значительные различия между суммами осадков на станциях и реанализом указывали на орографический эффект, а малые различия – что осадки были вызваны проходящими циклонами).

Работа поддержана грантом 075-15-2024-554 в виде субсидии крупного научного проекта Минобрнауки России (проект «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации»).

Полигонально-жильные структуры засоленных голоценовых отложений арктического шельфа Евразии по космическим данным

Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И.

МГУ, геологический факультет

Существование полигонально-жильных структур (ПЖС) в засоленных отложениях арктических морей было выявлено в 1970-80 гг. Изучение их распространения стало возможным в последнее десятилетие благодаря глобальному покрытию World Imagery на базе детальных космических снимков (КС) с субметровым пространственным разрешением, что осуществлено авторами с использованием полученных ранее сведений [Зайцев, 1976; Васильчук, Трофимов, 1984; Дроздов и др., 2011; Слагода и др., 2014] в качестве опорных наземных данных. Результаты настоящих исследований таковы:

1. ПЖС получают развитие там, где морское волнение имеет решающее значение или влияет на осадконакопление и рельефообразование. Это шельф морей Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, а также береговая зона, доступная для ветровых нагонов. В фациальном отношении это прибрежно-морские и лагунно-морские обстановки, низкая и высокая лайды, а также голоценовые морские террасы и «нагонные заливы» в долинах рек.
2. Засоление уменьшает коэффициент линейного расширения/сокращения пород. Поэтому для растрескивания и образования повторно-жильных льдов (ПЖЛ) засоленным породам по сравнению с незасоленными аналогичного состава необходимы более низкие температуры. В низовьях Колымы эта разница составляет 5-7°C (температура пород и воздуха: -10...-11°C) [Зайцев, 1976].
3. В голоцене потепления чередовались с похолоданиями и соответствующими колебаниями уровня моря. В связи с этим на шельфе выделяются две зоны. Северной зоне с непрерывным во времени существованием мерзлых пород, полигональный микрорельеф в голоцене изменялся в соответствии с изменениями ПЖС, соответствие имеет место и сейчас. В южной зоне указанной непрерывности не было. Протаивание и последующее повторное промерзание, как это установлено для о. Белый [Слагода и др., 2014], нарушили связь ПЖС с соответствовавшим ему видом полигонального микрорельефа. В настоящее время его вид характеру ПЖС не соответствует.
4. Зона возможного развития ПЖЛ на шельфе весьма обширна. Но фациальные условия полигонально-жильного льдообразования весьма избирательны. Это участки лагунного осадконакопления, системы береговых баров, средние и тыловые части прибрежно-морских террас, «нагонные заливы».

Сокращение ледников Монгольского Алтая

Ганюшкин Д.А., Деркач Е.С., Горбунова Ю.А., Алексейкова А.С.

Санкт-Петербургский государственный университет

Ganushkinspbgu@mail.ru

На основе дешифрирования снимков Sentinel 2, Landsat, Corona и полевых данных исследовано сокращение ледников Монгольского Алтая на примере горных массивов и хребтов Таван-Богдо-Ола (максимальная высота 4374 м), Ценгел-Хайрхан (3944 м) и Цамбагарав (4208 м) после максимума малого ледникового периода (МЛП).

Оледенение горного узла Таван-Богдо-Ола в максимум МЛП имело площадь 353,4 км². К 1968 г. площадь сократилась до 278,96 км², к 1977 г. до 265,62 км², к 1989 г. до 235,61 км², в 2000 г. - 220,47 км², в 2010 - 200,98 км², в 2020- 192,39 км². В начале XXI века отступление долинных ледников ускорилось: на северном склоне ледники Аргамджи-2 и Аргамджи-3 в 1984-2009 гг. отступали со средней скоростью 8,3 и 16,6 м/год, соответственно, в 2009-2021 гг. - 30,6 и 20,6 м/год, соответственно. На западном склоне ледник Канас в 1980-2006 гг. отступал со средней скоростью 22,5 м/год, в 2006-2021 гг. - 35,2 м/год. На восточном склоне ледники Потанина и Александры отступали в 1988-2010 со средней скоростью 19,7 и 15,9 м/год, в 2010-2021 гг. - 57,9 и 34,8 м/год, соответственно.

В хребте Цамбагарав площадь ледников уменьшилась с 128,4 км² в максимум МЛП до 85,72 км² в 1968 г., 83,97 км² в 1991 г., 71,32 км² в 2006 г., 66,9 км² в 2019 г. и 61,17 км² в 2023 г. Возросла экспозиционная контрастность за счет интенсивной деградации ледников южной экспозиции.

Ледники Ценгел-Хайрхан сократились от 38,16 км² в 1850 г. до 15,57 км² в 1968 г., 13,85 км² в 1989 г., 12,81 км² в 2002 г., 10,2 км² в 2008 г., 10,19 км² в 2016 г. и 8,9 км² в 2023 г. Наибольшее относительное сокращение площади (рис. 1) для Ценгел-Хайрхан связано с малым размером ледников и меньшей высотой массива, после 1968 г оно замедлилось, что вероятно, связано с бронированием языков крупнейших ледников Холцотийн и Хоромд.

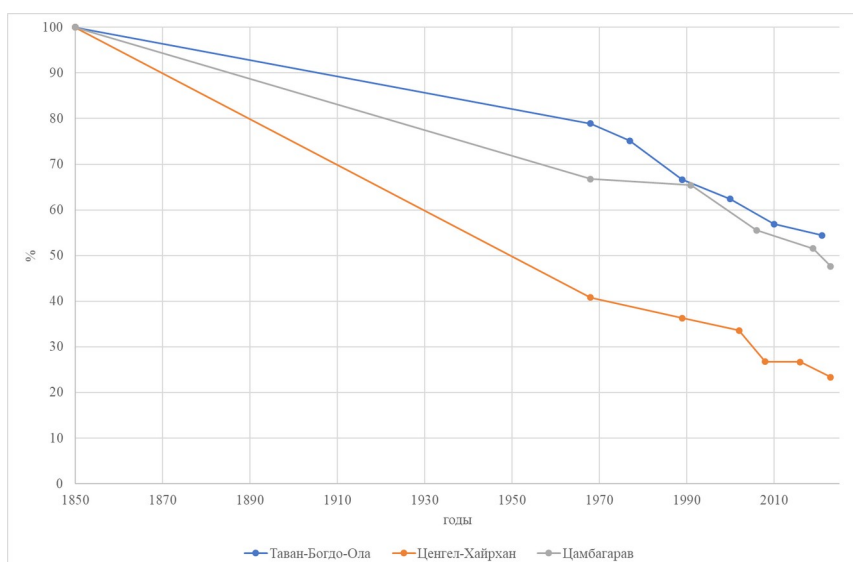


Рисунок. Относительное сокращение площади ледниковых центров

Неравномерное сокращение ледников хребта Цамбагарав связан с развитием здесь крупных ледников плоской вершины, которые в настоящее время с подъемом границы питания теряют значительные площади. Выполнено при поддержке гранта РФФИ 22-67-00020.

Сток льда в море и айсбергопродуцирование выводных ледников Российской Арктики

Глазовский А.Ф.¹, Никольский Д.Б.²

¹Институт географии РАН, ²МИИГАиК, г. Москва

glazovsky@igras.ru

Для всех 411 выводных ледников, которые заканчиваются в море в пределах архипелагов Новая Земля, Земля Франца–Иосифа и Северная Земля, была выполнена оценка интенсивности стока льда в море (фронтальная абляция) на основе имеющихся данных наблюдений (2000-2021 гг.) и информации, содержащейся в каталогах и публикациях о средних и сезонных скоростях движения выводных ледников, и данных о толщине таких ледников во фронтальных частях. Результаты этой работы содержат характеристики ледников, связанные с их стоком льда в море.

В пределах каждого из архипелагов, всего несколько крупных ледников оказывают непропорционально большое влияние на общую фронтальную абляцию за исследуемый период. В целом в Российской Арктике 32% от числа ледников (80% от их региональной площади), соответственно, дают 90% региональной фронтальной абляции.

Чтобы показать, какие части акватории оказываются под особым воздействием фронтальной абляции и, следовательно, подвержены связанным с ней опасностям, связанным с айсбергами, рассчитан индекс интенсивности фронтальной абляции. Он суммирует на 10-километровой сетке по акватории фронтальную абляцию всех ледников, находящихся в пределах 50 км. Индекс зависит как от скорости фронтальной абляции, так и от количества ледников в окрестностях каждой точки, и поэтому изменяется, в значительной степени следуя пространственным изменениям фронтальной абляции ледников в каждом районе. В нескольких прибрежных районах выделяются высокие индексы интенсивности, указывающие на горячие точки потенциального появления айсбергов.

Судя по этому индексу, на Северной Земле областью особого интереса должна быть акватория в районе восточного края купола Академии наук (о. Комсомолец), восточной части пролива Красной Армии и залив Матусевича., На Земле Франца-Иосифа несмотря на относительно низкую скорость фронтальной абляции ледников (в среднем 0,02 Гт/год), в сумме большое количество ледников, спускающихся там в море, дает повышенный индекс интенсивности. У ледников Новой Земли в целом индекс невысок, и обнаруживается, что её карская сторона менее активна, чем баренцевоморская, где несколько повышенный фон индекса наблюдается в районе залива Иностранцева.

Количество ледников в Российской Арктике со стоком льда в море более 30 млн м³ в год по нашим оценкам равно 115. Из них на ЗФИ находится 68 ледников (со средней фронтальной абляцией 83 млн м³ в год (от 30 до 550 млн м³ в год), на Новой Земле – 28 ледников со средней фронтальной абляцией 140 млн м³ в год (от 30 до 509 млн м³ в год), и на Северной Земле 19 ледников со средней фронтальной абляцией 270 млн м³ в год (от 30 до 1330 млн м³ в год).

На основе обработки ДЗЗ и ЦММ была выполнена оценка распределения по размерам/массе продуцируемых айсбергов для трех районов (ледник Знаменитый – ЗФИ, ледник Иностранцева – НЗ, и восточный край купола Академии Наук – СЗ).

Предложено для оценки сезонной доли стока льда, идущего на айсбергопродуцирование, использовать в качестве меры сезонные колебания скоростей движения этих ледников вблизи фронта отёла.

Исследование выполнено в рамках темы Государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0004 № 1021051703465-1.

Ретроспективное прогнозирование формирования приледниковых озёр Южно-Чуйского хребта за период 2000–2021 гг.

Грига С.А., Ганюшкин Д.А.

Санкт-Петербургский государственный университет

semyon.griga@yandex.ru

Для установления замкнутых понижений ложа ледников, которые при его отступании способны стать озёрами, применялась модель пространственного распределения толщины льда GlabTop2-ру. Входными данными для неё являлись актуальные на 2000 год контуры ледников, полученные из каталога ледников Южно-Чуйского хребта, и цифровая модель рельефа SRTM. Путём вычитания из поверхности цифрового рельефа значений толщины льда на участках дегляциации в 2000–2021 гг. было обнаружено 145 замкнутых понижений ложа. Дальнейшая их векторизация позволила получить максимальные из возможных значения площади потенциальных озёр. С использованием спутниковых снимков высокого разрешения (World View 3) за 2021 год была оценена оправдываемость метода прогнозирования формирования приледниковых озёр. Критерием оправдываемости служило наличие пересечения хотя бы части контура реального и прогнозируемого озера. С учётом возможности переработки ложа ледника отложениями морены, погребением льда, а также характеристик ЦМР (разрешение 30 м, абсолютная и относительная вертикальная точность ± 16 м и ± 6 м соответственно, горизонтальная позиционная точность ± 20 м) допускалось, что прогнозируемое озеро может отступать от реального не более, чем на ± 1 пиксель. В ином случае прогноз считался полностью неоправдавшимся. В результате, оправдываемость для всех прогнозируемых озёр составила 41%, для озёр площадью более 1000 м² – 58%, более 4000 м² – 76%. Кроме того, было дешифровано 39 озёр, появление которых не прогнозировалось. С их учетом для этой же градации оправдываемость составила 32%, 47% и 65% соответственно. Общая прогнозируемая на области дегляциации за 2000–2021 гг. площадь озёр составила 594 тыс. м², фактическое значение – 753 тыс. м². Прогнозируемое значение коэффициента озёрности составило 1,57%, фактическое – 2,00%. Среди 38 неоправдавшихся прогнозов формирования озёр площадью более 1 км² наиболее частой их причиной являлось полное или частичное перекрытие замкнутого понижения ложа ледником (8 случаев), мореной (20 случаев), погребенным льдом (7 случаев), снежниками перелетками (3 случая).

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-67-00020 «Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как основа модели адаптации населения внутриконтинентальных горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды».

Распространение и особенности залегания толщ ледового комплекса на побережье морей Восточной Сибири

Григорьев М.Н.

ФГБУН Институт мерзлотоведения СО РАН

grigoriev@mpi.ysn.ru

Под ледовым комплексом (ЛК), иногда называемого «едомой», обычно понимаются дисперсные, в основном супесчано-суглинистые, плейстоценовые породы, пронизанные полигональной решеткой повторно-жильных льдов. Они имеют широкое распространение на приморских низменностях Северо-Востока Сибири и занимают значительную часть побережья исследуемых морей. Их происхождение до сих пор дискутируется, но все больше данных говорит о том, что они могут иметь полигенетическую природу и состоят из фаций, преимущественно, аллювиального и склонового рядов.

В береговой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, особенно в области распространения высокольдистых берегов (максимальное содержание грунтового льда достигает 80%) отмечается наибольшее в Арктике распространение термоабразионно-термоденудационных берегов. Под ними обычно понимаются берега, характеризующиеся наличием, как термоабразионных клифов, так и термоденудационных уступов, разделяемых термотеррасами. Они представляют собой террасовидные площадки, как правило, в верхней части берегового склона, сложенные ископаемым льдом или рыхлыми многолетнемерзлыми породами. Такие террасы формируются по мере отступления бровки клифа под термическим воздействием воздуха и солнечной радиации.

Максимальная мощность ЛК составляет 55 м. Высотное положение кровли и подошвы этого горизонта варьирует в весьма широком диапазоне. В силу существенных тектонических вертикальных движений в рассматриваемом арктическом регионе, его подошва может находиться на как абсолютной высоте до 30 м, так и до 20 м ниже уровня моря. Например, в западной части дельты Лены, подошва ЛК поднята на 20-25 м, а в восточной части, напротив, опущена на 10-15 м ниже уровня моря.

Протяженность активно эродируемого ЛК составляет около 30% длины береговой линии рассматриваемых морей. Именно с этим связаны самые высокие в мире темпы разрушения берегов, а также самые большие объемы выносимого в арктический бассейн берегового материала, включая органический углерод.

Исследование выполнено при поддержке научного проекта НИОКТР 122011400151-0 «Деградация мерзлоты и трансформация рельефа в береговой зоне и на шельфе арктических морей восточного сектора РФ: Динамика, прогноз и риски».

Разрастание моренного покрова на ледниках Кавказа с начала XXI века

Губанов А.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет

Современная стадия деградации оледенения проявляется и в интенсификации привноса литогенного материала на поверхность ледников. Поверхностные отложения существенно влияют на абляцию глетчерного льда, что напрямую отражается на ледниковом стоке и балансе массы ледника. Несмотря на прогресс в методах, основанных на дистанционном зондировании из космоса, картографирование границ ледников, покрытых мореной, и самих моренных покровов в масштабе горной системы остается сложной задачей.

На весь большой Кавказ границы морен определены полуавтоматическими методами [Scherler et al., 2018; Herreid & Pellicciotti, 2020; Tielidze et al., 2024 и др.]. В данной работе приведены результаты ручного дешифрирования границ моренного покрова по состоянию на 2000 г. (по данным Landsat-7) и 2020 г. (Sentinel-2). Для оценки точности определения площади покрытого мореной льда использовался буферный метод.

В результате с 2000 по 2020 г. количество ледников с заметным моренным покровом возросло с 763 (34% от количества ледников Кавказа) до 1274 (58%), а их площадь – с $132,5 \pm 8,6$ км² (8-9% от площади ледников) до $163,9 \pm 5,9$ км² (14-15%). Установлено, что на северном склоне общая площадь заморененного льда за 20 лет увеличилась на 25%, на южном – на 18%. При этом наибольший прирост количества заморененных ледников (в 3 раза) и общей площади морены (+123,6%) относительно 2000 года отмечен в западном секторе Большого Кавказа, в то время как в центральном секторе прирост умеренный (в 1,5 раза, +17%), а восточном и вовсе отмечено уменьшение как количества заморененных ледников (на 0,97% от 2000 г.), так и общей площади морены (-5,1%).

Вследствие активной деградации оледенения повысилась активность привноса литогенного материала со скального окружения ледников. Постепенный подъем кинематической границы питания на ледниках Кавказа, свойственный современной эволюционной стадии, приводит к характерной тенденции: со временем вытаивание на дневную поверхность ледника первых вдоль линии тока порций моренного материала фиксируется всё выше и выше по течению.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта 23-27-00050.

Баланс массы ледников южного и северного склонов Эльбруса: Гарабаши и Микельчиран

Дегтярев А.И.¹ Лаврентьев И.И.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

²Институт географии РАН

arsangel2207@gmail.com

С конца малого ледникового периода 1860-х годов ледники практически всего мира начали деградировать. Темпы сокращения ледников в конце XX – начале XXI века существенно возросли почти во всех горных районах мира [Котляков, 2015].

Длительные наблюдения за балансом ледников играют ключевую роль в изучении климатических изменений, позволяя реконструировать прошлые и прогнозировать будущие реакции ледников на изменение климата. Это играет важную роль в оценке рисков, связанных с ледниками, включая потенциальные прорывы ледниковых озёр. Кроме того, потеря массы ледников влияет на баланс воды в приледниковых районах, особенно в периоды абляции, и имеет ключевое значение для аридных территорий, где ледниковый сток необходим в засушливые периоды.

В результате проделанной работы был выполнен баланс массы ледника Гарабаши южного склона Эльбруса за 2023 год. Баланс составил -995 мм. водн.экв., что является отражением текущего отрицательного тренда деградации ледника. Для анализа распределения прихода и расхода вещества были построены поля аккумуляции, абляции и баланса массы. На основе полученных данных был построен график кривых высотного распределения баланса массы ледника Гарабаши за 2023 год, на котором отчетливо видно, что линия границы питания поднялась до отметки 4100 м. Основной причиной таяния ледника является повышение летних температур. Кроме того, повышенную абляцию вызывает отсутствие облачности в летний период и высокий уровень прямой солнечной радиации.

С 2023 года Институтом географии Российской академии наук были начаты наблюдения на северном склоне Эльбруса, а именно на леднике Микельчиран. В том же году был выполнен расчет за 2022/2023 балансовый год. Результат составил -550 мм водн.экв.

Синхронное измерение гляциологических и метеорологических параметров на противоположных склонах Эльбруса позволит проследить динамику компонентов баланса массы всего ледникового кластера, а также оценить физические компоненты формирования аномалий баланса массы, определяемые в основном метеорологическим режимом. Кроме того, различие в антропогенной загруженности двух склонов позволит оценить влияние человеческой деятельности на существование ледников.

Исследование обоих ледников продолжается, в ходе летних экспедиций Института географии РАН получены данные для расчета баланса на 2023/2024 год, а также установлены автоматические метеостанции, которые позволят получать метеорологические характеристики дистанционно.

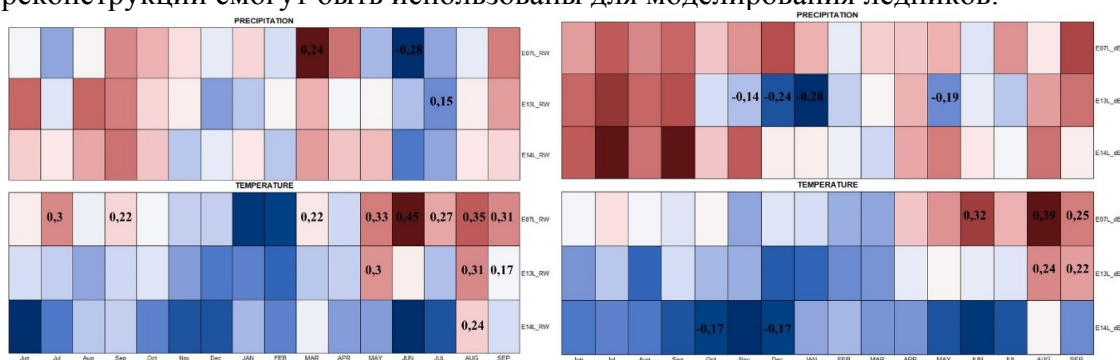
Климатическая чувствительность лиственницы, растущей на полуострове Камчатка

Долгова Е.А., Семеняк Н.С., Бичурин Р.Р.

Институт географии РАН

В данной работе мы представляем результаты дендроклиматических исследований, которые смогут стать основой для реконструкции сезонных климатических параметров. В ходе экспедиционных работ в 2023-2024 гг. сотрудниками института географии РАН были отобраны керны лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.). Дендрохронологические площадки расположены на различных гипсометрических уровнях – от экотона верхней границы леса (например, район Козыревска) до уровней речных террас. Керны – по два с каждого дерева - отбирались возрастным буром Пресслера. Смолы и другие вещества удалялись в ультразвуковой ванне УЗК-28 (40 кГц) с использованием ацетона в течение 200 минут. Керны были наклеены на деревянные подложки, а их поверхность зачищена микротомом. Образцы сканировались в разрешении 3200 dpi на сканере после процедуры калибровки цветовыми карточками. Измерение ширины и оптической плотности проводилась в программе Coorecorder, перекрёстное датирование в программе COFENHA (Grissino-Mayer, 2001). Индексация хронологий осуществлялась с помощью негативной экспоненты путём деления. Дендрохронологические ряды сравнивались с климатическими данными за 15 месяцев (с июня предыдущего года по сентябрь текущего года) в пакете TreeClim (Zang and Biondi, 2015). В работе использованы ряды инструментальных наблюдения среднемесячной температуры и осадков сеточного архива CRU TS 4.07 (Harris et al., 2014) из ближайшего узла сетки.

Дендроклиматический анализ показал, что на прирост практически везде оказывают влияние температуры летних месяцев ($R = 0.3 - 0.6$, $p < 0.05$). Примечательно, что для некоторых площадок связь ширины поздней древесины с летними температурами оказалась даже сильнее, чем у других параметров. Почти все хронологии по оптической плотности имеют отклик на летние температуры воздуха, однако величина самой связи оказалась несколько ниже, чем для ширины. Также величина связи зависит от высоты над уровнем моря, причём эта закономерность справедлива для обоих параметров – ширины и оптической плотности. Связь всех хронологий с осадками значительно слабее и не имеет выраженной закономерности. Таким образом, в данной работе показана перспективность использования дендрохронологических данных, которые способны описать около 40% изменчивости инструментальных летних температур воздуха. Поскольку летние температуры играют определяющую роль в изменчивости абляции ледников Камчатки, полученные реконструкции смогут быть использованы для моделирования ледников.



Коэффициенты корреляции Пирсона, полученные при сравнении ДКХ по ширине годовых колец (слева) и оптической плотности (справа) со среднемесячными осадками и температурой за период 1901-2022 гг. Строчными буквами обозначены месяцы предыдущего года, прописными – текущего. Цифрами обозначены значимые коэффициенты ($p < 0.05$). Цветовая гамма соответствует положительным (красные) и отрицательным (синие) коэффициентам корреляции.

Альbedo снежного покрова и его параметризация для целей моделирования природных систем и климата

Дроздов Е.Д.^{1,2}, Турков Д.В.¹, Ломакин А.А.^{3,4}

¹Институт географии РАН

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

⁴Институт космических исследований РАН

В исследовании рассмотрены физические факторы, влияющие на альbedo снежного покрова, а также основные методы его параметризации в моделях природных систем. В данной работе предложена новая схема параметризации альbedo снежного покрова, учитывающая большинство процессов и факторов, важных для метаморфизма снега и изменения его стратификации и микроструктуры, а именно: влияние погодных условий при выпадении снега, его возраста, плотности и скорости поступления фоновых загрязнений, температуры воздуха и интенсивности солнечного излучения, а также высоты Солнца. Предложенная схема параметризации была внедрена в модель LSM SPONSOR. Проведено тестирование новой схемы параметризации альbedo снега в составе модели LSM SPONSOR по данным многолетних наблюдений. Данные наблюдений были получены для четырех полигонов проекта ESM-SnowMIP, расположенных в горных регионах Европы и Северной Америки: Col-de-Porte (Франция), Weissfluhjoch (Швейцария), Senator Beck и Swamp Angel (США, штат Колорадо). Ряды данных наблюдений за полуденным альbedo поверхности составляют по 20 лет для первых двух полигонов, и по 10 лет для остальных. При сравнении со старой схемой параметризации альbedo снежного покрова в модели LSM SPONSOR, основанной на зависимости альbedo только от возраста снега, новая схема показала значительное увеличение качества расчетов альbedo (Рис. 1): коэффициенты корреляции между наблюдаемыми данными и результатами расчетов составляют 0.78–0.83, что дает коэффициенты детерминации 0.61–0.69.

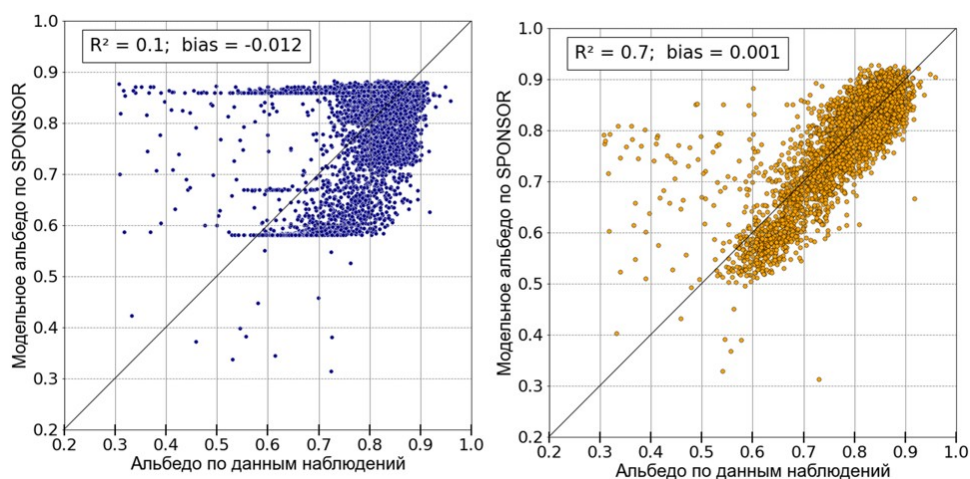


Рис. 1. Диаграммы рассеяния и статистические характеристики для альbedo снежного покрова по старой схеме (слева) и по новой схеме (справа) для полигона Weissfluhjoch.

Новая схема позволяет получать несмещенные оценки альbedo со статистическими характеристиками распределения, практически совпадающими с теми, что получены для данных наблюдений. Набор тестовых полигонов охватывает особенности условий формирования снега в горах, как в лесной зоне, так и в безлесной, поэтому схема может быть рекомендована для расчета альbedo в широком диапазоне горных ландшафтов при сохранении одних модельных параметров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 23-17-00247.

Лавинная активность в условиях меняющегося климата на территории России

Жукова Е.Д., Турчанинова А.С., Петраков Д.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

zhukova.geo@mail.ru

На сегодняшний день основным источником информации о лавинной активности на территории России (и бывшего СССР) является Атлас снежно-ледовых ресурсов мира (АСЛРМ), выпущенный в 1997 году. Климатические характеристики, использованные при анализе лавинной активности, рассчитывались за базовый период 1961-1990 гг. Однако сейчас использование данной информации теряет свою актуальность из-за климатических изменений. В связи с этим встает вопрос об актуализации сведений о современном состоянии активности снежных лавин, а также прогнозирования изменения степени лавинной активности на территории России в XXI веке в условиях меняющегося климата.

Для оценки степени лавинной активности использованы данные о густоте лавинных очагов и повторяемости лавин [1], что позволяет оценить региональные различия с течением времени.

Основой морфометрического анализа послужила цифровая модель рельефа — GTOPO30; суть методики сводится к построению сетки квадратов (10 км x 10 км), покрывающей всю территорию России, где каждая ячейка сетки несёт в себе информацию о глубине расчленения рельефа (разности максимальной и минимальной высот).

Данные о повторяемости лавин получены на основе анализа толщины снежного покрова с учетом климатической модели MRI-ESM2-0 (CMIP6) [2].

Стоит отметить, что на протяжении XXI века степень лавинной активности на большей части территории России прогнозируется неизменной и лишь в некоторых районах уменьшается. Однако результат моделирования нельзя использовать как статистически значимый, т.е. использовать его возможно исключительно как свидетельство общей тенденции моделируемых изменений.

Литература:

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М.: изд. Российской академии наук, 1997. Т. 2. Кн. 1. 263 с.; Кн. 2. 270 с.
Yukimoto, S., and Coauthors (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Earth System Grid Federation, accessed 25 September 2020, <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842>.

О работах Российской академии наук на архипелаге Шпицберген

Зайцева Н.А., д.г.н., гл. специалист ОНЗ РАН

ninaz@.ras.ru

Архипелаг Шпицберген является уникальным районом для изучения ответных реакций природной среды Арктики на воздействия природного и антропогенного происхождения на фоновом уровне. Это один из немногих полярных районов Земли, где компоненты природной среды длительное время вовлечены в хозяйственную деятельность человека.

Исследования ученых РАН проводятся на архипелаге Шпицберген на протяжении более 20 лет благодаря международно-правовому статусу архипелага Шпицберген и действию российско-норвежского договора. На территории островов архипелага и в акватории работают ученые нескольких институтов Минобрнауки России, функционирующие под научно-методическим руководством РАН по следующим направлениям:

Институт географии - изменчивость природных и антропогенных ландшафтов архипелага Шпицберген в условиях современного климата.

Мурманский морской биологический институт - экосистемы фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген.

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина - криптогамная биота, адаптации растений и процессов почвообразования в арктических экосистемах.

Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» - сейсмические и инфразвуковые наблюдения на архипелаге Шпицберген.

Полярный геофизический институт - магнитные и оптические явления, геофизические процессы в высокоширотной атмосфере Земли.

Институт археологии - сохранение и исследование памятников российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова - энерго- и газообмен, структура атмосферного пограничного слоя в прибрежных районах Шпицбергена.

Пущинский научный центр биологических исследований - формирование и функционирование почвенного покрова в геологической истории Земли.

Работу ученых объединяет Российский научный центр на архипелаге Шпицберген (РНЦШ). Исследования проводятся согласно Межведомственной программы научных исследований и наблюдений на архипелаге Шпицберген, которая ежегодно утверждается Наблюдательным советом по координации деятельности Российского научного центра на архипелаге Шпицберген.

Ледяные псевдоморфозы в четвертичных отложениях IV прибрежно-морской равнины Центрального Ямала

Иванов В.И., Слагода Е.А., Хомутов А.В.

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН

На севере Западной Сибири строение и залегание верхнечетвертичных отложений зачастую осложнены влиянием криогенных процессов. Следы криогенеза, современного и прошлого, легко обнаруживаются в стенках термоцирков, которые, отступая с каждым годом, позволяют уточнить историю формирования исследуемой территории.

В центральной части полуострова Ямал на научно-исследовательском стационаре (НИС) «Васькины Дачи» группой ученых из Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН ведутся ежегодные наблюдения за состоянием термоцирков, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП), пластовыми (ПЛ) и повторно-жильными льдами (ПЖЛ).

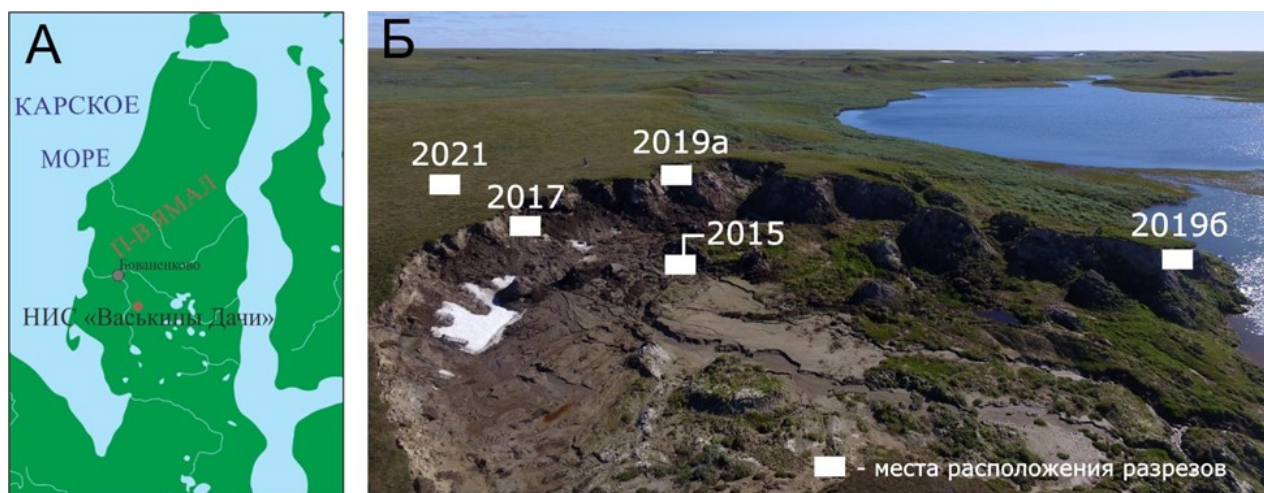


Рисунок. Район расположения научно-исследовательского стационара «Васькины дачи» (А), расположение разрезов в стенках термоцирка ТЦ2 за период 2015-2021 гг., фото А.В. Хомутова, июль 2018 г.

Во время полевых работ в 2021 г. на термоцирке ТЦ2, расположенном на территории НИС «Васькины дачи» (рис.), были изучено строение верхней части осадочной толщи IV прибрежно-морской равнины, вскрыты ММП с наклонным ледяным телом.

Образование самого термоцирка связано с активизацией термоденудационных процессов на исследуемом участке в теплые периоды 2012-2013 гг. в связи с резким повышением летней температуры и соответствующим увеличением глубины СТС. Отслеживание динамики отступления стенок термоцирка проводится до сих пор, в последние годы она стала затухать. Вероятно, это связано с уменьшением мощности пластового льда в основании, который мог бы способствовать более активному росту термоцирка.

Гляциологические исследования в кратере Восточной вершины Эльбруса в 2024 г.

Киселева Т.Д., Лаврентьев И.И., Абрамов А.А., Хайрединова А.Г.

Институт географии РАН

milkyclimb@gmail.com

Ледники Эльбруса на высотах более 4.5 тыс. м предоставляют хорошую возможность исследования годовой и сезонной стратиграфии, так как на этих высотах в холодной фирновой зоне изотопный и химический состав снега не меняется из-за таяния. Их анализ позволяет восстановить прошлые климатические изменения, что является важным инструментом в изучении и прогнозировании глобальных климатических изменений. Скорость аккумуляции снежного покрова на Восточной вершине почти в 3 раза меньше, чем на Западном плато Эльбруса по результатам предыдущих исследований.

В августе 2024 года в кратере Восточной вершины Эльбруса на высоте 5600 м был проведён комплекс гляциологических исследований, включающий в себя: высокочастотное радиолокационное зондирование снежно-фирновой толщи, шурф глубиной 110 см с отбором образцов каждые 5 см, отбор фирнового керна (6 м).

Измерения проводились высокочастотным георадаром ОКО-3 с антенными блоками 400-900 МГц. Всего было проложено 2 км георадарных профилей. Пространственное положение радарограмм координировалось при помощи установленного на георадаре GPS-приёмника. Обработка данных выполнялась в программном обеспечении Cartscan. Скорость распространения радиоволн рассчитывались с учётом изменений значений плотности, полученные из шурфа. Средняя плотность снега в шурфе составила 348 кг/м^3 . В шурфе наблюдалась слоистость, в основном крупно и среднезернистый снег с ледяными включениями, а также 6 плотных ледяных корок. С помощью БПЛА была проведена фотограмметрическая съёмка, получен ортофотоплан и ЦМР поверхности кратера, составлен план поверхности на основе тепловизионной съёмки.

Комплексные снегомерные работы с использованием высокочастотного радиолокационного зондирования на леднике Левый Актру

Киселева Т.Д.¹, Абрамов А.А.¹, Ерофеев А.А.², Копысов С.Г.², Пименов Н.А.²

¹ Институт географии РАН

² Томский Государственный Университет

milkyclimb@gmail.com

2-12 мая 2024 года состоялась экспедиция гляциологических отрядов Института географии РАН и Томского государственного университета в горно-ледниковый бассейн Актру (Центральный Алтай) с целью проведения комплексных снегомерных работ на леднике Левый Актру, на котором ежегодно проводится исследования по программе изучения режимных характеристик ледников, включая масс-балансовые работы. Программа исследований включала в себя стандартные снегомерные работы (шурфование, установку реечной сети, зондирование снежной толщи измерительным щупом) и дополнительные (аэрофотосъёмка рельефа местности при помощи БПЛА, радиолокационное зондирование). В ходе экспедиции была проведена высокочастотная георадарная съёмка снежного покрова на языке и в фирновой зоне ледника до абсолютной высоты 3300 метров над уровнем моря. Было получено 200 снегомерных точек и проложено 2 км георадарных профилей.

Измерения проводились высокочастотным георадаром ОКО-3 с антенными блоками 400-900 МГц. Пространственное положение радарограмм координировалось при помощи установленного на георадаре GPS-приёмника. Обработка данных выполнялась в программном обеспечении Cartscan.

Глубина снегомерного шурфа на краю языка ледника (точка №2) составила 73 см. Средняя плотность в шурфе составила 0,3 г/см³. В фирновой зоне ледника на высоте 3200 м. глубина шурфа составила 340 см. Мощность слоя свежего снега (плотность 0,3 г/см³) составила 60 см. Слежавшийся снег с плотностью 0,5-0,56 г/см³ располагался в диапазоне глубин 60-250 см. В зоне контакта с ледником на глубинах 280-340 см наблюдается рыхлый фирн плотностью 0,5 г/см³. Средняя плотность в шурфе составила 0,5 г/см³. Ледяные прослойки, толщиной до 5 мм были отмечены на глубинах: 30, 40, 50, 67 см. На глубине 98-122 см расположен слой с обломками горных пород размером до 3-5 мм принесённых ветром.

На основе совместных данных составлены подробные карты аккумуляции на леднике Левый Актру. С помощью БПЛА была проведена фотограмметрическая съёмка, получен ортофотоплан и ЦМР поверхности ледника. Представлены сравнительные данные о величинах аккумуляции по георадиолокационным профилям, результатам щупования снега и определения плотности в шурфах. Средняя высота снежного покрова на языке ледника составила 100-200 см. В центральной фирновой зоне ледника на высотах 3100-3300 м высота снега варьировалась от 200 см до 400 см. На аккумуляцию ледника также влияет лавинное питание. В таких зонах мощность снега составила 400-500 см. В верхней части ледника на высоте 3400 м снежный покров отсутствовал ввиду сильного ветрового переноса.

Влияние микроструктуры снега на впитывание рассолов

Комаров А. Ю.

CEOS, Университет Манитобы, Виннипег

В данном исследовании, проведенном в Университете Манитобы, Виннипег, зимой 2023–2024 годов, мы изучили влияние трех различных типов снега, характеризующихся различным размером и формой зёрен (мелкозернистых округлых зёрен, кристаллов с огранкой/глубинной изморози и смёрзшихся зёрен), на скорость и высоту впитывания рассола. Работа проводилась с целью использования полученных результатов для совершенствования алгоритмов интерпретации данных ДЗЗ. Полевой эксперимент проводился в течение 23 дней и включал регулярные измерения высоты впитывания рассола в образцах снега, а также измерения плотности снега, запасов воды в снеге и солёности на различных стратиграфических уровнях образцов.

Результаты показали, что во всех образцах вне зависимости от типа и плотности снега наблюдалось расслоение нижней части толщи на 2 слоя со значительно различающимися свойствами. В нижней части сформировался слой плотного снего-льда (около 850 кг/м³), а выше него — слой влажного снега, сохраняющего зернистую структуру и имеющего вдвое меньшую солёность и плотность. Установлено, что наибольшая высота поднятия рассола составила от 6,5 до 8,9 см и наблюдалась на 13–15 день эксперимента, в дальнейшем оставаясь относительно неизменной и демонстрируя лишь незначительный рост. В крупнозернистых образцах наблюдался более низкий уровень поднятия рассола по сравнению с мелкозернистыми, а также более раннее выделение рассола из нижней части толщи. При этом, в более плотных образцах высота поднятия рассола была выше, чем в рыхлых, сложенных теми же типами кристаллов, а выделение рассола наблюдалось значительно позднее и в меньших объёмах.

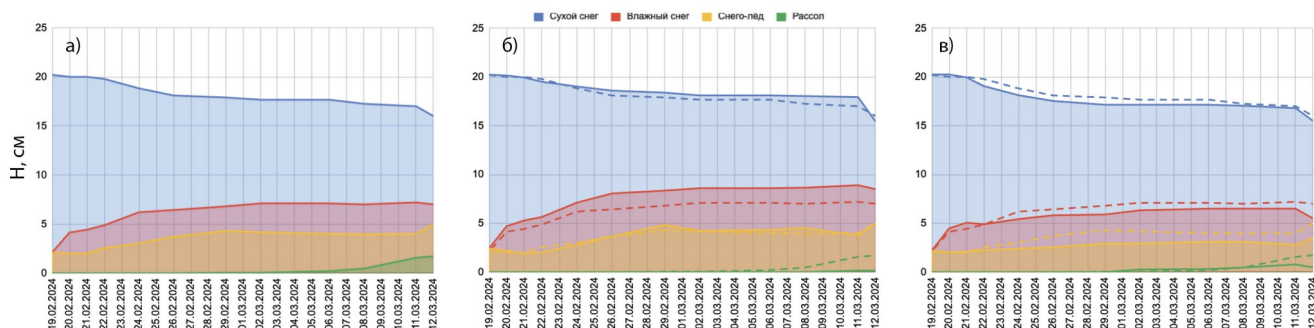


Рисунок. Высота поднятия рассола в образцах снега, сложенного мелкозернистым снегом а) плотностью 370 кг/м³, б) плотностью 430 кг/м³ и крупнозернистого снега с огранкой плотностью 305 кг/м³. Пунктирная линия – положение границ слоёв в образце а).

Новый подход к моделированию стратиграфии снега с использованием среднесуточных данных метеостанций

Комаров А. Ю.^{1,2}, Селиверстов Ю. Г.², Турчанинова А. С.², Сократов С. А.²

¹СЕОС, Университет Манитобы, Виннипег

²НИЛСЛиС, Географический факультет, МГУ им. Ломоносова

Стратиграфия снега является важнейшей характеристикой снежного покрова, влияющей на его устойчивость на склонах, теплоизоляционные свойства и запасы воды в снеге. От строения снежного покрова зависит интенсивность протекания процессов в снеге и подстилающем грунте, а наличие рыхлых и твердых слоёв оказывает влияние на выживаемость растений и животных.

Современные модели снега, такие как SnowPack, Crocus, SnowModel и др., позволяют выполнять высокоточное моделирование высоты, плотности, запасов воды в снежном покрове и его стратиграфии с высоким временным разрешением. Однако, для работы этих сложных моделей требуются значительные вычислительные ресурсы, а также большое количество входных данных, которые не всегда доступны.

В данной работе мы представляем алгоритм, позволяющий использовать ограниченное количество усредненных за сутки метеорологических данных (температура воздуха, высота снежного покрова и скорость ветра) для определения стратиграфии снега, включая толщину слоёв, их плотность, водный эквивалент и тип зёрен. Данный алгоритм позволяет эффективно воспроизводить эти характеристики на больших территориях с минимальными вычислительными требованиями и может использовать данные метеостанций и реанализа. Мы представляем предварительные результаты применения и верификации модели в Московском регионе, демонстрируя ее потенциал для практического применения.

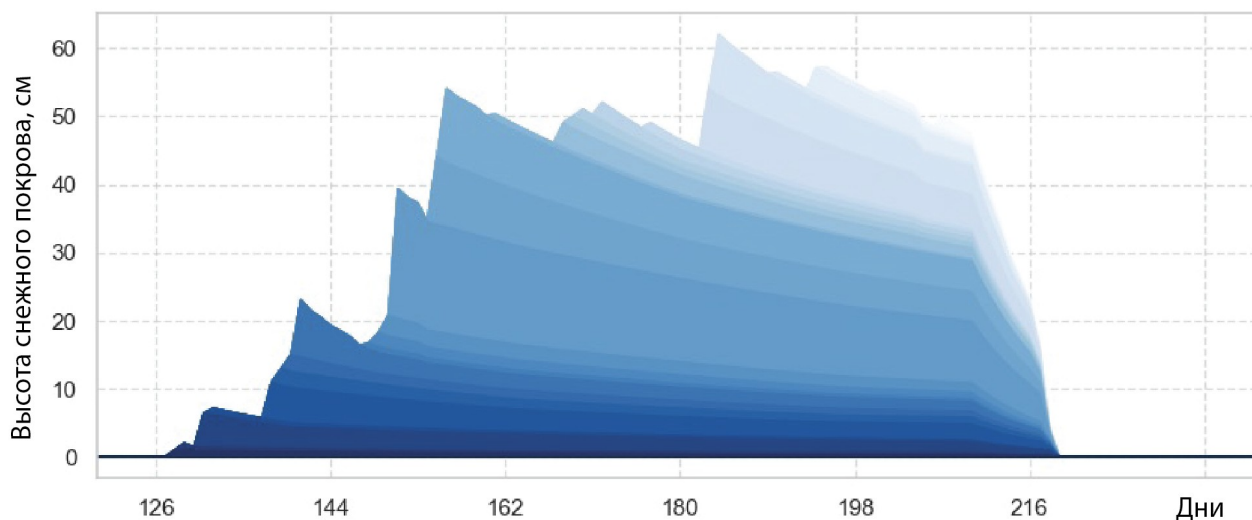


Рисунок. Строение снежного покрова в Москве зимой 2017–2018 гг., восстановленное с использованием предложенного алгоритма.

Данные климатического моделирования CMIP6 за XV-XXI вв. для оценки динамики оледенения Эльбруса

Корнева И.А.^{1,2}, Рыбак О.О.^{2,3}

¹Институт географии РАН

²Институт природно-технических систем

³Институт водных проблем РАН

Для моделирования динамики оледенения Эльбруса необходимы качественные климатические данные с высоким пространственным и временным разрешением, что в высокогорных условиях является весьма непростой задачей. В данной работе рассматривается длительный период в несколько веков: 1466-2100 гг. Поскольку заданный временной промежуток выходит за рамки доступных данных наблюдений, основными климатическими данными являлись данные глобальных климатических моделей проекта CMIP6: палеоклиматические данные проекта PMIP4-CMIP6 Past1000 за период 1466-1849 гг., а также данные исторического эксперимента CMIP6 HISTORICAL (1850-2014 гг.) и прогностических экспериментов CMIP6 при 4 сценариях будущих изменений: ssp-1-2.6, ssp-2-4.5, ssp-3-7.0, ssp-5-8.5 (2015-2100 гг.). Использовались исходные среднемесячные данные за период 1466-1849 гг. и среднесуточные данные за 1850-2100 гг. о температуре воздуха и количестве атмосферных осадков.

В палеоклиматическом эксперименте PMIP4-CMIP6 Past1000 (850-1849 гг.) имеются в свободном доступе данные 4-х глобальных климатических моделей: INM-CM4-8 (Россия), MIROC-ES2L (Япония), ACCESS-ESM1-5 (Австралия), MRI-ESM2-0 (Япония). За период 1466-1849 гг. было проведено сравнение этих модельных данных с данными дендрохронологических реконструкций на Кавказе: для летней температуры воздуха (Центральный Кавказ) и для летнего количества осадков (Абастумани, Грузия). Для получения непрерывного климатического ряда вплоть до 2100 гг. были проанализированы также данные тех же 4-х моделей за период 1850-2100 гг. Сравнение статистических характеристик данных наблюдений на метеостанциях в районе Эльбруса, данных реконструкций и модельных данных позволило выделить модели, которые наилучшим образом воспроизводят климат региона. В результате данной работы получены единые климатические ряды температуры воздуха и количества осадков за 1466-2100 гг. для региона Эльбруса, которые могут применяться для моделирования динамики ледников. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-27-00050.

Содержание тяжелых металлов в снега на западной вершине и седловине Эльбруса

Курашева О.А.

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

oks.anchik@mail.ru

В рамках исследования данной работы отбор проб снега производился на высотах от 3100 до 5642 м. На Западной вершине (5642 м) и седловине г. Эльбрус (5300 м) отобраны пробы в слое 0–30 см (2019 г.). Шурфы на п. Терсол (3100 м) на л. Гарабаши (4000 м) были заложены в 2020–2021 гг., глубина шурфов составила 145 и 125 см соответственно. Всего было отобрано по 10 проб из сезонной снежной толщи. Анализ проб производился атомно-абсорбционным методом на спектрометре МГА–915. В полученных пробах, лабораторным методом, выявлялось содержание 10 микроэлементов (Cr, Ni, Mo, Mn, Pb, Zn, Ag, Cu, Co, и V).

Таблица. Средние концентрации тяжелых металлов в пробах снега, мкг/л.

Категория проб	Дата отбора проб	Cr	Ni	Mo	Mn	Pb	Zn	Ag	Cu	Co	V
г. Эльбрус, (5642 м).	04.09.2019 г.	0,6	3,2	1	6,2	2	4,6	0,6	2,6	0,4	
г. Эльбрус, седловина (5300 м)		0,5	2	0,6	6,1	2,5	5,2	0,6	2,7	0,3	
п. Терскол, шурф (3100 м)	23.03.2020 г.	0,35	7,9	0,68	7,6	6,5	14,3	0,2	0,16	1,2	
л. Гарабаши, шурф (4000 м)	08.06.2021 г.	0,35	0,60	0,223	6,19	0,845	3,34	1,09	0,015		0,052

Пустые графы – означает элемент не определялся.

Анализ полученных данных показал, что Cr, Mo и Co в отличие от других ТМ содержатся в количествах менее ПДК, и их абсолютные значения отличаются незначительно. На п. Терскол концентрации Ni, Mn, Pb достигают 6–7 ПДК. Наибольшие концентрации соответствуют Mn и Zn. Высокое содержание Zn, как вулканогенного элемента в снежной толще, вероятно, связано с фумарольной деятельностью, аномалии Mn объясняются высоким содержанием его, как порообразующего минерала в подстилающих породах Эльбрусского вулканического центра. На п. Терскол концентрации Zn в пробах снега более 14 ПДК, что вероятно имеет техногенное происхождение.

Изменение гидротермической структуры политермического ледника Фритьоф на Шпицбергене по данным повторных радиолокационных измерений

Лаврентьев И.И.¹, Борисик А.Л.², Мачерет Ю.Я.¹, Судакова М.С.³

¹Институт географии РАН

²ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

³МГУ им. М.В.Ломоносова

Политермические ледники, состоящие из холодного и тёплого, водосодержащего льда, широко распространены на Шпицбергене и установлены по данным радиозондирования в других районах полярного и горного оледенения, таких как Гренландия, Скандинавия, Аляска, Анды, Альпы, горы Центральной Азии и острова Субантарктики. Дистанционными индикаторами таких ледников являются радарные отражения от внутреннего горизонта, соответствующего глубине поверхности раздела холодного и тёплого льда и изотерме 0°C. Многие из таких ледников имеют зимний сток и приледниковые наледи, а в прошлом испытывали резкие подвижки (сёрджи). Важными характеристиками, определяющими реакцию гидротермической структуры таких ледников на изменения климата, являются толщина холодного и тёплого льда и содержание воды в тёплом льду. Данные повторных радиолокационных измерений позволяют оценить изменения этих параметров, связать их с изменениями климата, и использовать для моделирования эволюции гидротермической структуры и оценки гидрологического и динамического режима политермических ледников.

Такие данные весьма ограничены и получены лишь для небольшого количества ледников, включая ледники Шпицбергена и Скандинавии, а повторные измерения содержания воды в тёплом льду по данным измерения скорости распространения радиоволн, имеются лишь для ледников Фритьоф и Ханс, расположенных, соответственно, в центральной и южной частях острова Западный Шпицберген. В настоящем исследовании приводятся и обсуждаются результаты повторных измерений скорости распространения радиоволн в тёплом льду, полученные на леднике Фритьоф в период 1977-2023 гг. с использованием разных методов: сравнение данных радиозондирования и бурения, радиолокационный каротаж скважин и зондирование методом общей глубинной точки (ОГТ). Полученные данные показали, что в течение периода исследования изменилась не только общая толщина ледника, но и его внутренняя структура, а именно соотношение холодного и тёплого льда. Также по данным ОГТ выявлено, что сам слой тёплого льда неоднородный и состоит из слоёв повышенной и пониженной влажности. Годовые и сезонные изменения скорости распространения радиоволн и оценённые по ней содержание воды в тёплом льду варьируют в пределах первых процентов и долей процентов, соответственно. При этом пространственные измерения содержания воды в верхней части тёплого льда по данным аэрорадиозондирования 21 ледника на севере Шпицбергена (Bamber, 1989) показывают значительно больший диапазон изменчивости (2,8-9,1 %), что также нужно учитывать при моделировании эволюции гидротермической структуры ледников.

Приведённые данные мониторинга показывают реакцию таких ледников на изменения климата, что позволит прогнозировать возможные его изменения, в том числе связанные с опасными геологическими процессами.

Происхождение подземных вод сплошной криолитозоны центральной Якутии по изотопным данным

Лебедева Л.С., Павлова Н.А.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

В сплошной криолитозоне, где взаимодействие поверхностных и подземных вод затруднено присутствием криогенного водоупора, оценка происхождения воды в подземных горизонтах может позволить сделать выводы о распространении и динамике многолетнемерзлых пород и таликов в условиях изменения климата. Целью работы являлось оценка источников питания и возраста надмерзлотных и межмерзлотных подземных вод, развитых в области сплошной криолитозоны Центральной Якутии, на основе новых данных о содержании трития и стабильных изотопов воды. Тритий, радиоактивный изотоп водорода с массой 3 а. е. м. и периодом полураспада 12,32 года, входит в молекулу сверхтяжелой воды и может играть роль трассера, по содержанию которого оценивается происхождение и время нахождения воды в водном объекте. Искусственное введение огромного количества трития в атмосферу Земли вследствие ядерных взрывов в середине 20 в. позволяет рассчитать для каждой пробы доли воды старше и моложе этих событий. Стабильные изотопы воды использовались для оценки вклада дождевой, снеговой и озерной воды в исследуемый водный объект. За период с 2019 по 2023 г. было отобрано 29 проб подземных вод для анализа содержания трития и 138 проб для определения стабильных изотопов воды. Выявлено отсутствие "старой" воды в надмерзлотных таликовых водоносных горизонтах, различные ее доли в межмерзлотных горизонтах и полное доминирование «старой» воды в подмерзлотных водах. Показаны три основных источника питания надмерзлотно-межмерзлотных подземных вод в регионе исследования: атмосферные осадки, озерные воды и подмерзлотные подземные воды. Некоторые выходы межмерзлотных вод, такие как Улахан-Тарын и Юнюгестях, питаются смесью всех трех источников, в то время как другие, как Ерюю и Суллар, в основном питаются водами озер и атмосферных осадков. Мелкие родники Мечта, Находка и Кетюрен, а также надмерзлотные воды, в основном пополняются водами атмосферных осадков. Полученные расчетные оценки долей «старой» и «новой» воды и источников питания согласуются друг с другом и с общим представлением о функционировании сложной гидрогеологической системы Центральной Якутии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Динамика баланса массы ледникового купола Беллинсгаузен, остров Кинг-Джордж, (Ватерлоо)

Мавлюдов Б.Р.

Институт географии РАН

Рассмотрены составляющие и сам годовой баланс массы ледникового купола Беллинсгаузен площадью льда, не покрытого мореной, около 9 км² и высотой 250 м над уровнем моря. В качестве приходной составляющей баланса массы выступала аккумуляция снега, а в качестве расходной – таяние снега и льда. Измерения проводились ежегодно с 2007 по 2024 гг. с перерывом в 2013-2014 гг. Для получения величины аккумуляции снега на куполе во второй половине ноября каждого года проводилась снегомерная съемка, включавшая измерение толщины снега по сетке 250×250 м, описание структуры снега и измерение его плотности в нескольких шурфах. По полученным данным строилась карта толщины снега на куполе, которая показывала ветра каких направлений способствовали перераспределению снега на куполе с течение каждого зимнего сезона. Расходная часть баланса массы определялась по сети из 29 абляционных реек, установленных на разных склонах купола. Величина абляции рассчитывалась по данным, полученным в конце полевого сезона (обычно конец марта – начало апреля) с учетом площадей высотных зон. Для каждого года рассчитывался годовой баланс массы. Выяснено, что в период с 2009 по 2019 гг. на куполе преобладал положительный баланс массы. До 2009 г. и в последние годы знак баланса массы был отрицательным. Сравнение ситуации на ледниковом куполе Беллинсгаузен с ситуацией на других ледниках острова не показало сходимости результатов. Хорошее совпадение кривых отмечается только с ледником Херд, расположенном на острове Ливингстон в том же архипелаге, что связано с примерно одинаковой открытостью обоих объектов к преобладающим ветрам. Для понимания как будет изменяться баланс массы ледникового купола Беллинсгаузен в будущем необходимо проведение дальнейших полевых исследований.

Исследование выполнено в рамках темы госзадания FMWE-2024-0004 при поддержке РАЭ.

О характере движения льда ледника Альдегонда, Шпицберген

Мавлюдов Б.Р.

Институт географии РАН

bulatrm@bk.ru

Горно-долинный ледник Альдегонда расположен в 7 км к ЮЗ от российского поселка Баренцбург на западном берегу залива Грэнфиорд. Известно, что в начале 20 века ледник достигал берега фиорда и выдвинулся туда, вероятно, в результате пульсации. В настоящее время ледник деградирует, и его язык располагается более чем в 2 км от берега моря. Ледник является политермическим. Исследование пещеры, расположенной в северной части языка ледника показало, что она сформировалась по плоскости надвига, расположенного в нижней части ледяной толщи. Вероятно, это современный надвиг, который охватывает только северную часть языка ледника, который связан с избыточным давлением воды в нижней теплой части ледяной толщи. Вода не может свободно выходить на поверхность на краю льда из-за его примороженности к ложу. Этот надвиг дает возможность воде из толщи ледника дренироваться на его языке. Наличие пещеры на севере языка ледника в течение многих лет говорит о том, что надвиг, вероятно, постоянно подновляется, что говорит о том, что движение льда ледника не прекращается, хотя в настоящее время он находится в неблагоприятных орографических условиях.

Для большей части поверхности ледника (за исключением его южной части) характерна крупнокристаллическая структура льда с размером кристаллов до 10 см и более. Однако во всей северной части ледника видны слои льда, где крупнокристаллическая структура льда перемежается с тонкими прослоями льда до 5 см толщиной с зерном до 2-5 мм. При ближайшем рассмотрении оказалось, что мелкое зерно – это зоны дробления льда, для которых характерна своеобразная «штриховка» в толще льда, соответствующая его направлению движения. «Штриховка» подчеркивается линейным распределением зерен льда. Такое явление отмечено во многих слоях, видимых на поверхности ледника. Это означает, что во время подвижки ледника в конце 19 – начале 20 века движение льда происходило не всей массой, а как бы послойно. Почему возникло такой характер движения льда пока не ясно. Однако, оказалось, что подобные зоны дробления льда были обнаружены и на других ледниках архипелага, таких как Восточный Грэнфиорд и Эсмарк, для которых также были характерны подвижки в прошлом. Насколько широко на ледниках архипелага Шпицберген распространено это явление, и характерно ли оно только для пульсирующих ледников, покажут дальнейшие исследования.

Работа выполнена в рамках госзадания ИГРАН FMWS-2022-0002.

Актуальные проблемы соотношения гипотезы тектонического доледникового генезиса котловины и водного тела подледникового озера Восток и роли ледникового покрова Антарктиды

Лукин В.В.¹, Марков А.Н.^{2,3}

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

²Санкт-Петербургский Государственный университет

³Китайский Университет Наук о Земле, факультет Геофизики и Информационных технологий
Цзилиньский университет

am100@inbox.ru

На основе комплексного анализа геологических, геофизических и микробиологических данных рассматривается гипотеза формирования антарктического озера Восток в доледниковую эпоху. Генезис озёрной котловины связывается с процессами рифтообразования, начавшегося в период распада суперконтинента Гондваны, и омоложенного в Кайнозой. Она заполнилась водами из гидрологических и атмосферных источников, а также геотермальными водами из рифтовых разломов в период, когда Антарктида находилась в умеренном климатическом поясе планеты. Это привело к созданию сильно стратифицированной вертикальной структуры водного тела. Донные отложения озера сформировались за счет эрозии горных пород, аллювия стока вод древних рек, органических останков водных живых организмов и химических соединений, поступающих с геотермальными потоками.

Выдвигается гипотеза о существовании под толщей ледника более древних, чем он сам, вод и донных отложений.

Крупнейший на нашей планете ледниковый антарктический щит оказывает значительное влияние на формирование и изменчивость климата, систему циркуляции океанических вод, биоразнообразие, а также на поверхностные и подледниковые озёра этого региона. Возникновение водной толщи объектов гидрологии суши Антарктиды обычно связывается с процессами таяния снега и льда. В случае подледниковых озёр этот процесс происходит на ложе ледника под влиянием термоизоляции геотермального потока большой толщиной льда, энергии сил трения при движении ледника по коренным породам и больших величин давления, что позволяет скапливаться талой воде в углублениях подледникового рельефа. Однако, в случае озера Восток генезис его водного тела связан с аккумуляцией атмосферных осадков и стоком древних рек, существовавших на этом континенте во время его нахождения в умеренном климатическом поясе до эпохи его оледенения, т.е. до начала формирования единого континентального ледникового покрова. Авторы выделяют послойное строение ледника над озером Восток, объясняя генезис всех слоёв различными этапами оледенения шестого континента. Анализ геологических, геофизических, гляциологических и биологических исследований в районе расположения котловины озера Восток убедительно доказывает, что водное тело этого подледникового озера существовало на поверхности до начала многолетнего оледенения Антарктиды, а ледник имеет лишь роль покрова, изолирующего водное тело. Этот же вывод подтверждается результатами численного моделирования процессов замерзания/таяния ледника, которые доказывают, что водная толща озера никогда не могла промерзнуть до дна вследствие намерзания воды на нижней поверхности ледника. Таким образом, водное тело и донные отложения озера Восток являются более древними природными объектами, чем антарктический ледниковый щит.

Сокращение оледенения хребта Орулган (Верхоянский хребет) в 1951–2023 гг.

Муравьев А.Я., Хромова Т.Е.

Институт географии РАН

anton-yar@rambler.ru

Представлены новые данные о характеристиках оледенения хребта Орулган в 2013, 2018 и 2023 гг. По результатам анализа разновременных спутниковых съёмок и исторических данных оценено изменение площади ледников района с середины XX века по 2013, 2018 и 2023 гг., а также за периоды 2013–2018, 2018–2023 и 2013–2023 гг. В 2023 г. оледенение хребта Орулган включало в себя 58 ледников общей площадью 7.47 ± 0.85 км². Среди морфологических типов преобладают каровые и карово-долинные ледники. Наибольшие площади формируют перемётно-долинные и карово-долинные ледники. Основная часть (71.8%) общей площади оледенения района сосредоточена в высотном диапазоне 1700–2000 м. С середины XX века по 2023 г. площадь ледников района, зарегистрированных в Каталоге ледников СССР и идентифицированных в Каталоге ледников России, сократилась с 16.41 до 7.47 ± 0.85 км², то есть на 8.94 км² (54.5%). Из них 5,90 км² было утрачено в период с 1951–1967 по 2013 г., 1.14 км² за 2013–2018 гг. и 1.90 км² за 2018–2023 гг. К 2023 г. наиболее сократились малые ледники с площадью меньше 0,1 км² (84.7%), а наименее – крупнейший ледник района с площадью больше 2 км² (12.9%). Значительнее всего (91.7%) сократились малые ледники западной экспозиции. Установлено существенное увеличение средней скорости сокращения площади ледников в последние 10 лет по сравнению с периодом с середины XX века по 2013 г.: 0.61%/год в период с 1951–1967 по 2013 г. до 2.17%/год в 2013–2018 гг. и 4.06%/год в 2018–2023 гг. Средняя вертикальная протяжённость ледников хребта Орулган (разница высоты высшей и низшей точек) в 2013–2023 гг. сокращалась – в 2013 г. она составляла около 215 м, в 2018 г. – 195 м, в 2023 г. – 170 м. Более всего сократилось оледенение на относительно низких гипсометрических уровнях. Эти изменения происходили на фоне устойчивого тренда повышения среднегодовой температуры воздуха, с ускорением этого процесса в последнюю декаду, и недостаточного для сохранения положительного баланса количества осадков.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-17-00247.

Вулкано-ледниковое взаимодействие на Мутновском вулкане (Камчатка): причины и следствия развития опасных процессов

Муравьев Я.Д., Марченко Е.С.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Мутновский вулкан является наиболее крупным центром современного оледенения Южной Камчатки. В пределах его постройки насчитывается до 8 ледников, крупнейшие из которых Юго-Западный (ЮЗ) и Северо-Восточный (СВ) почти полностью занимают одноименные кратеры. Современная вулканическая активность сосредоточена в северо-западной части массива, где имеется система перекрывающихся друг с другом кратеров, глубоко врезавшихся в тело вулканической постройки. Мониторинг активности вулкана и опасных природных процессов в его окрестностях диктуется насущными задачами оценки вулканической опасности в связи с богатыми рекреационными ресурсами этого района и расположенной у его северного подножия Мутновской ГеоТЭС, производящей до 30% электроэнергии Камчатского края.

Выявлена взаимосвязь между изменениями гидрогеологической обстановки в активных кратерах Мутновского вулкана и его извержениями, опосредованными через динамику и массообмен его ледников. Образование озер в кратерах Мутновского вулкана – регулярно повторяющееся событие и тесно связано с динамикой кратерных ледников, которая выражается в создании плотин на пути внутрикратерных водотоков и увеличении стока талой воды за счет перекрытия льдом (при участии сезонного мощного снежного покрова) фумарольных полей. Вследствие подобных процессов происходят существенные изменения во внутрикратерной гидрогеологической обстановке, часто приводящие к эруптивным событиям в активных кратерах вулкана, что может служить прогностическим признаком. Подобное взаимодействие одна из основных причин начала извержений вулкана на современном этапе его развития: наступление/сокращение ледников, сброс нагрузки, изменение циркуляции подземных вод в недрах действующего вулкана (при значимых изменениях климатических условий); приводят к его извержениям и активизации обвально-оползневых процессов на склонах и в кратерах вулканического сооружения.

Вулкано-ледниковое взаимодействие в 1990-2023 гг. приводило к извержениям вулкана в 2001, 2007, 2012, 2013, 2018 и 2020 гг., а также к обрушению крупных оползней и обвалов в кратерах, с формированием лахаров (объемом в первые миллионы кубометров), за его пределы. Подобные события в первой четверти 21 столетия происходят регулярно с интервалом в несколько лет, что привело к закрытию в последние три года популярных маршрутов на Мутновский вулкан.

Баланс массы ледника ИГАН (Полярный Урал) в 2018-2023 гг.

Носенко Г.А.¹, Муравьев А.Я.¹, Шеин А.Н.², Иванов М.Н.³,
Лаврентьев И.И.¹, Леопольд Я.К.², Синицкий А.И.², Токмаков В.В.⁴

1 Институт географии РАН, Москва, Россия

2 ГАУ ЯНАО “Научный центр изучения Арктики”, Салехард, Россия

3 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

4 ООО Техстройпроект, Чебоксары, Россия

nosenko@igras.ru

В условиях изменений климата, происходящих в последние десятилетия, особую актуальность приобретают наблюдения за состоянием баланса массы ледников, которые, с одной стороны, служат естественными индикаторами современных климатических трендов, а с другой – являются важным компонентом криосферы, имеющим, к сожалению, ограниченный ресурс [IPCC ARI 06, 2023]. Поэтому Международная служба мониторинга ледников (WGMS) [<https://wgms.ch/>] проявляет в последние годы повышенную активность, привлекая внимание общественности к результатам таких наблюдений, которые проводятся по единой методике в разных ледниковых районах Земли. 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 году в рамках программы Международного геофизического года. Важным обстоятельством является то, что после длительного перерыва, инструментальные гляциологические наблюдения на леднике были возобновлены в 2008 году и продолжаются до сих пор. Поэтому мы имеем возможность количественной оценки изменений состояния ледника в настоящее время и сравнений с результатами прошлых лет.

В данной работе представлены результаты наблюдений за балансом массы северной карово-долинной части ледника ИГАН геодезическим методом с использованием DGPS-съемок и разновременных цифровых моделей его поверхности в период 2018-2023 гг. На основе сравнения полученных данных и результатов исследований предыдущих лет определена общая тенденция к увеличению скорости сокращения массы ледника. Если в период 1963-2008 гг. баланс массы ледника составлял -317 ± 59 мм в.э./год и за следующие десять лет (2008-2018 гг.) он немного увеличился до -336 ± 61 мм в.э./год, то за 2018-2023 гг. он вырос почти в два раза и достиг -627 ± 45 мм в.э./год. На этом фоне сохраняется высокая межгодовая изменчивость баланса массы ледника, которая отмечалась еще во время наблюдений в 1958-1981 гг. Так, например, в 2018-2020 гг. баланс массы был положительным и составил 456 ± 33 мм в.э./год. Такие колебания обусловлены высокой контрастностью зимних и летних метеоусловий данного района, которые сопровождаются аномалиями температур и осадков в последние годы.

Экспедиционная часть работ выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального НОЦ «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мерзлых грунтов под объектами капитального строительства». Обработка и анализ результатов при поддержке темы Госзадания ИГРАН FMWS-2024-0001 №1021051703465-1 «Криосфера в условиях изменения климата».

Роль снежного покрова в формировании микрорельефа на центральном Ямале

Опокина О.Л., Бабкин Е.М., Слагода Е.А., Данько М.М., Хомутов А.В.

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН

На ключевом участке Центрального Ямала изучены микроформы рельефа, формирование которых связано с неравномерным накоплением снега и сохранением снежников. Вокруг снежников в теплый сезон возникают локальные геокриологические условия - повышенная льдистость мерзлых и влагонасыщенных оттаивающих отложений. Повторное образование снежников приводит к активизации пучения и термокарста и, как следствие, к образованию просадочных воронок.

Мощность снежного покрова в районе исследований составляет 15-30 см на плоских поверхностях и более 100-150 см в понижениях и термоцирках (Дворников и др, 2015). Оползневые пылеватые отложения днищ старых термоцирков обладают повышенной льдистостью, линзовидными и линзовидно-сетчатыми криотекстурами, соответствующими конфигурации кровли мерзлоты.

Накопление навейного снежного покрова происходило на подветренном склоне стабилизированного термоцирка, на теле оползня, заросшего травянисто-кустарничковой растительностью. В теплый период года снежники дольше всего (июль-август) сохранялись вблизи оползневого вала, препятствуя протаиванию пород сезонно-талого слоя. К мерзлому выступу под снежником из окружающих водонасыщенных оттаивающих пород СТС мигрировала грунтовая влага, что привело к образованию льдистого ядра. Увеличение льдистости пылеватых и песчаных отложений сопровождалось криогенным пучением, а таяние снежника, вероятно, могло приводить к образованию линз, шлиров льда под ним и в выступе мерзлых пород, т.е. больше деформировать породы. Образование снежника в одном и том же месте за несколько лет приводит к увеличению объема льдистого ядра. После стаивания снежника в августе протаивание льдистого ядра вызывает просадки поверхности сначала небольшие, а в последующие годы с увеличением их площади и глубины. Просадочные воронки приводят к развитию бугристого микрорельефа, неравномерному накоплению снега, что нарушает стабильность склона, разрушает тело оползня, активизирует локальный термокарст, эрозию и оползневые процессы.

Локальные термокарстовые просадки по новообразованным льдистым участкам под снежниками и пучение могут привести к аварийным ситуациям инженерных сооружений в зонах накопления снега.

Работа выполнена в ИКЗ ТюмНЦ СО РАН по государственному заданию Минобрнауки России: № FWRZ-2021-0012.

Измерение и моделирование летнего баланса массы на ледниках Кодара (Забайкалье)

Осипов Э.Ю.¹, Осипова О.П.^{1,2}

¹ Лимнологический институт СО РАН

² Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН

Ледники Кодара являются наиболее чувствительными к современным климатическим изменениям в горах юга Восточной Сибири. Для понимания физических процессов, регулирующих скорость таяния кодарских ледников, на переметном Сыгыктинском леднике с 2019 г. с помощью автоматических метеостанций проводятся регулярные исследования метеорологических и радиационных условий, а также летней абляции (Рис. 1). Высокоразрешающие метеорологические данные (30 минут) за период абляции 2021 г. (45 дней в июле–августе) были использованы для измерения и моделирования абляции с суточным разрешением. Количественно был оценен вклад разных тепловых потоков в таяние ледника, выявлен доминирующий вклад радиационного тепла. Средняя величина энергии, расходуемой на таяние ледника, составила 81 Вт/м². Наибольший вклад в таяние вносил радиационный баланс (70 Вт/м², 86%), особенно его коротковолновая составляющая (76 Вт/м², 94%). За период наблюдений длинноволновый баланс был слабо отрицательным (–7 Вт/м²), в результате чего ледник терял длинноволновое тепло. Турбулентные потоки скрытого и явного тепла были положительными во все дни, однако их суммарный вклад оценивается как второстепенный (10 Вт/м², 13%). Проведено сравнение измеренной абляции (с использованием реек и ультразвукового датчика) с абляцией, рассчитанной на основе теплового баланса ледниковой поверхности. Средние и суммарные значения измеренной и рассчитанной абляции хорошо согласуются между собой, в то время как суточные колебания имеют расхождения. Также были протестированы две температурные модели таяния (регрессионная и Т-индексная модель “градус–день”), оценены их потенциальные ошибки при оценке абляции. Обе модели хорошо воспроизводят сезонную (среднюю и суммарную) абляцию (ошибка ≤ 9%), однако ее суточные значения моделируются со значительной ошибкой (около 50%). Использование коэффициентов таяния, различных для снега и льда позволило улучшить точность моделирования до 44%. Наилучшим образом Т-индексная модель оценивает абляцию для ледяной поверхности (ошибка ≤ 26%). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №24-27-00165 “Гляциоклиматическое моделирование оледенения хребта Кодар”.

Влияние лесных пожаров на формирование и развитие субэкральных таликов центральной Якутии по данным натурных измерений и результатам математического моделирования

Попов С.В.^{1,2,3}, Шерстенникова С.Р.^{2,3}, Боронина А.С.^{3,4}, Лебедева Л.С.³

¹АО Полярная морская геологоразведочная экспедиция,

²Санкт-Петербургский государственный университет

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

⁴Государственный гидрологический институт

spopov67@yandex.ru; s.popov@spbu.ru

Для выяснения степени влияния пожаров на теплофизические процессы в мерзлоте осенью 2022-го и 2024-го года на полигоне в районе реки Шестаковка (Центральная Якутия) проводилось физическое моделирование. В задачи работ входил сбор данных для последующего математического моделирования процессов тепломассопереноса в мерзлом и талом грунте, а также в таликах. В ходе экспериментов были получены данные о распределении температуры в грунте с течением времени, а также распределение лучистой энергии от костра в пространстве.

Основой математической модели является решение одномерного уравнения теплопроводности с граничными условиями теплообмена для дневной поверхности и постоянной температурой многолетнемерзлых пород для нижней, расположенной на достаточно большой глубине. Полученные данные и результаты моделирования указывают на то, что вклад непосредственно лесного пожара на теплофизические процессы в почве чрезвычайно мал. Само тепловое воздействие длится относительно недолго. Кроме того, пламя охватывает стволы и кроны деревьев, т.е. основное тепло приходится не на грунт, а на окружающий воздух. Практически это означает, что большая часть тепла от пожара рассеивается и не попадает в грунт. На это указывает и полученная диаграмма направленности лучистой энергии от костра. Но если даже происходит приповерхностное горение упавших стволов, то тепло всё равно не проникает глубоко в грунт, а после окончания пожара температура приповерхностной толщи достаточно быстро восстанавливается.

При этом в долгосрочной перспективе влияние пожаров опосредовано может сказываться на теплофизических процессах в грунтах. Открытый огонь уничтожает либо трансформирует напочвенный слой, что приводит к изменению его теплофизических характеристик. Это, в свою очередь, провоцирует деградацию многолетнемерзлых пород и постепенный рост мощности сезонно-талого слоя. Кроме того, продукты горения древесины падают вниз на поверхность, существенно (в разы) уменьшая её альбедо. Практически это означает, что в грунт поступает значительно больше атмосферного тепла, чем до пожара. Всё это в конечном итоге приводит к растеплению многолетнемерзлых пород, и их кровля постепенно заглубляется.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субэкральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Математическое моделирование эволюции ледников Эльбруса в XXI веке

Постникова Т.Н.¹, Рыбак О.О.^{1,2,3}, Губанов А.С.⁴, Зеколлари Х.³, Хусс М.^{5,6,7}

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва

² Институт природно-технических систем, Севастополь

³Earth System Science and Department of Geography, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

⁴Географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁵Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich, Zürich, Switzerland

⁶Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Switzerland

⁷Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

Эльбрус – высочайшая вершина Европы (5642 м), ныне спящий вулкан, покрытый более чем двадцатью ледниками. При самых теплых сценариях изменения климата, почти все оставшиеся на Северном Кавказе ледники будут скоцентрированы на Эльбрусе (Postnikova et al., 2023). Нами рассмотрены вероятные изменения ледников Эльбруса в соответствии с климатическими сценариями из проекта CMIP6 (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) в XXI веке. Ожидаемое отступление фронтов ледников приведет к формированию прогляциальных озёр в локальных депрессиях ложа, которые были идентифицированы ранее (Лаврентьев и др., 2020). Нами было определено наиболее вероятное время их образования и уточнены их характеристики. Кроме того, было спрогнозировано вероятное время и место образования областей погребенного под мореной мертвого льда, которые в определенных обстоятельствах будут подпруживать озёра, увеличивая, тем самым, вероятность их прорыва.

Согласно прогностическим расчетам, к 2100 году ледники на Эльбрусе отступят выше 4000 м н.у.м., и на их месте на Эльбрусе вероятно будет образовано до 17 новых озер. При умеренном потеплении (сценарии SSP1-1.9, SSP1-2.6) возможна стабилизация положения фронтов ледников на высоте 3600-3700 м. При этом на Эльбрусе будет сформировано до 8 озер. Самое большое озеро на месте ледового плато Джикаугенкёз, возможно, будет подпружено мореной с погребенной под ней областью мертвого льда толщиной до 60 м предположительно в 2040±10 годах, и вероятно будет представлять значительную селевую опасность ниже по течению р. Малка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-27-00050.

Роль турбулентного теплообмена в структуре теплового баланса ледников центральной части о. Западный Шпицберген

Прохорова У.В.¹, Терехов А.В.¹, Барсков К.В.², Чечин Д.Г.², Репина И.А.^{2,3}, Иванов Б.В.^{1,4},
Варенцов М.И.^{2,3}, Артамонов А.Ю.²

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

²Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

uvprokhorova@aari.ru

В работе приводится оценка средней величины турбулентного теплообмена ледника Альдегонда (о. Западный Шпицберген) и её сравнение с другими основными компонентами теплового баланса. Оценка получена аэродинамическим методом по срочным данным метеостанции Баренцбург, пересчитанным для ледника Альдегонда, за период с 1991 по 2020 гг. Типичные величины потоков тепла составили: турбулентный потоки явного тепла — 23.4 и скрытого — -7.5 Вт м^{-2} , длинноволновый баланс поверхности — 14.5 Вт м^{-2} . При этом средний поток приходящей коротковолновой радиации по данным реанализа ERA5 составил 161.6 Вт м^{-2} . Для поглощенной солнечной радиации представлены две граничные оценки, для гипотетических случаев, когда поверхность ледника Альдегонда круглый год покрыта снегом, либо, напротив, всегда свободна от него. По данным натурных измерений 2018-2023 гг. типичное альbedo снега и льда составляет 0.78 и 0.32, соответственно. Таким образом, поток поглощенной коротковолновой радиации должен лежать в диапазоне от 36 до 110 Вт м^{-2} . Основной вывод состоит в том, что даже при минимальной оценке вклад поглощенной солнечной радиации в тепловой баланс будет выше, чем оцененный для турбулентных потоков. Поскольку ледник Альдегонда по своему высотному диапазону типичен для оледенения в этой части Шпицбергена, отличающейся относительно низменным рельефом, можно предположить, что результаты наших оценок репрезентативны по крайней мере для центральной части острова Западный Шпицберген — земель Норденшельда и Натхорста.

Благодарности. Оценка доли турбулентного теплообмена в структуре теплового баланса ледника Альдегонда выполнена в рамках темы 5.1 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей». Эксперимент по сравнению результатов пульсационного и аэродинамического методов и обработка данных выполнены в рамках темы госзадания РАН 1022032200002-2-1.5.10.

Влияние случайных погодных флуктуаций на модельные оценки поверхностного баланса массы ледникового комплекса Эльбруса

Рыбак О.О.^{1,2}, Корнева И.А.^{2,3}, Рыбак Е.А.², Постникова Т.Н.^{1,4}

¹Институт водных проблем РАН

²Институт природно-технических систем

³Институт географии РАН,

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Целью исследования является оценка влияния случайных погодных колебаний на модельные результаты расчетов компонентов поверхностного баланса массы ледников Эльбруса. Традиционный подход в модельных масс-балансовых расчетах заключается в использовании метеорологических рядов (инструментальных или полученных в ходе прогностического моделирования климата) в качестве внешнего форсинга. Результаты расчетов, как правило, чувствительны к выбору модельных параметров, и для получения корректных результатов масс-балансовая модель должна быть тщательно откалибрована по данным измерений. В рамках этого подхода обычно игнорируется тот факт, что сами ряды форсинга содержат внутреннюю погодную изменчивость, которая после интегрирования моделью может быть причиной возникновения в рядах рассчитанных компонентов баланса массы трендов по типу случайного блуждания или дополнительного разброса в результатах, не связанных с особенностями самой модели.

Для выполнения соответствующих оценок в модельных расчетах баланса массы мы используем суррогатные ряды температуры приземного воздуха и количества осадков. Суррогатные ряды продолжительностью в несколько модельных десятилетий генерируются стохастическим генератором погоды WGEN на основе наблюдаемых рядов на метеостанции Терскол. События осадков моделируются марковской цепью первого порядка, а их интенсивность гамма-распределением. Температура воздуха рассчитывается путем подгонки соответствующих распределений и гармонических функций отдельно для влажных и сухих дней. Статистический анализ сгенерированного ансамбля компонентов баланса массы позволяет отфильтровать реакцию моделируемых ледников, вызванную погодным шумом, от систематической реакции на климатические изменения.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-27-00050.

Снежный покров в Московском регионе: 10 лет полевых наблюдений и измерений

Селиверстов Ю.Г.¹, Комаров А. Ю.^{1,2}, Гребенников П.Б.¹, Турчанинова А.С.¹,
Сократов С.А.¹

¹ НИЛСЛиС, Географический факультет, МГУ им. Ломоносова

² CEOS, Университет Манитобы, Виннипег

Снежный покров в центральной России характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, обусловленной погодными условиями, растительностью и рельефом подстилающей поверхности. Изменчивость параметров снежного покрова в течение отдельных зим зависит от последовательности, интенсивности и частоты оттепелей, ветров, снегопадов и дождей, которые значительно варьируют год от года. Несмотря на выраженное влияние снежного покрова на функционирование природных систем и экономическую деятельность в Московском регионе, детальные и продолжительные исследования снежного покрова выполнялись редко, а стратиграфические описания остаются спорадическими.

В данном исследовании представлены результаты статистического анализа метеорологических данных, полученных на региональных метеостанциях в период с 1990 по 2024 годы, а также обширных полевых измерений снежного покрова, проведенных авторами в Московском регионе в зимние сезоны 2014–2024 годов. Непрерывные 10-летние наблюдения направлены на изучение изменений стратиграфии, высоты, плотности снежного покрова и запасов воды в снеге вследствие изменяющихся климатических условий.

Установлено, что увеличение температуры воздуха и количества жидких осадков в зимние месяцы приводит к сокращению продолжительности залегания снежного покрова, более позднему началу и раннему таянию, в то время как высота снежного покрова остаётся относительно неизменной. В то же время, наблюдается уменьшение числа и толщины слоев, состоящих из кристаллов с огранкой и глубинной изморози при увеличении доли слоев таяния-замерзания и ледяных корок.

Сравнительный анализ показал различия между г. Москвой и северо-восточной частью региона. В Москве наблюдается меньшая продолжительность залегания, меньшая высота, более позднее установление и раннее разрушение снежного покрова по сравнению с северо-востоком Московской области. Более высокие зимние температуры воздуха в Москве приводят к формированию толстых ледяных корок, в то время как слои с огранкой и глубинной изморозью оказываются менее развиты. Несмотря на региональные различия, последовательность типов слоев перед весенним таянием снега остается одинаковой, что обусловлено единством циркуляционных процессов на рассматриваемой территории.

Сезонное оттаивание грунта в районе мыса Баранова

Сидорова О.Р., Макштас А.П., Богородский П.В., Махотина И.А.

Арктический и Антарктический НИИ, г. Санкт-Петербург

olsid@aari.ru

Рассмотрены особенности протаивания мерзлоты в северной части о. Большевик (арх. Северная Земля). Описаны особенности динамики глубины сезонно талого слоя по данным измерений, выполнена параметризация теплофизических свойств грунтов и растительности района исследований. С помощью модели, реализующей алгоритм Лейбензона, получены оценки сезонной изменчивости толщины деятельного слоя грунта для различных параметризаций свойств растительности и грунта, проведено их сравнение с результатами полевых измерений.

Работы выполнены в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021 – 2030 годы. Соглашение № 169-03-2024-072.

Текстуры и структуры подземных льдов (иллюстрированная версия)

Слагода Е.А.

ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Происхождение подземных льдов - фундаментальная дискуссионная проблема, пути решения которой петрографическими методами заложили П.А.Шумский, Б.А. Савельев, А.И. Попов, Б.И. Втюрин, Е.А. Втюрина, Т.Н. Жесткова, В.И. Соломатин и многие другие. Залежи льда сохраняют в своем строении признаки генезиса и всю историю развития - от начала их образования в разных природных условиях под воздействием экзогенных процессов до преобразования за весь период существования в мерзлых толщах. Опубликованные исследователями немногочисленные изображения текстуры и структуры льдов - схемы, черно-белые фотографии фрагментов под микроскопом и в поляроиде, не дают целостного визуального образа для интерпретации их строения. Поэтому поставлена задача - с новыми техническими средствами повторить исследования текстуры и структуры льдов в шлифах для понимания условий, процессов льдообразования и стадийного анализа формирования подземных льдов.

С 2009 по 2021 годы в экспедициях ИКЗ ТюмНЦ СО РАН собрана коллекция монолитов и шлифов разных генетических типов поверхностных и подземных льдов, в основном, на севере Западной Сибири (рис). Выполнено дешифрирование изображений более 400 шлифов льда, анализ их текстуры и структуры, авторская интерпретация видов и типов льда, условий и процессов льдообразования. С учетом залегания залежей в мерзлых толщах, их морфологии, состава и строения определены генезис и следы метаморфизма льда.

Обоснованная и объективная интерпретация механизмов, условий и истории формирования льдов на основе структурно- петрографических признаков генезиса льдов П. А. Шумского возможна только с учётом строения вмещающих мёрзлых толщ, их генезиса, стадий промерзания и протаивания отложений, гидрохимического, изотопного состава льда. Работа выполнена ИКЗ ТюмНЦ СО РАН по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ: FWRZ-2021-0012.



Рисунок. Коллекция монолитов льдов.

Статистический подход к расчёту дальности выброса лавин

Сократов С.А.

Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

sokratov@geogr.msu.ru

Различия в результатах расчётов дальности выброса снежных лавин при использовании разных методик — давно известный и ожидаемый факт. Однако и после появления нормативного документа с прописанной методикой определения дальности выброса в случае отсутствия прямых данных, результаты для одних и тех же лавиносборов продолжают разниться от пользователя к пользователю, а часть из них оказывается просто невероятной. Кроме того, нормативно установленное отсутствие ссылок на первоисточники в нормативном документе оставляет значительное пространство для различий в интерпретации требуемых для расчёта параметров и их комбинаций. В связи с этим проведена ревизия достаточно широко используемой методики В.П. Благовещенского, являющейся основой СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования», и определены факторы, влияющие на получаемый результат. Ими, помимо неопределённостей в используемых климатических данных, оказались пространственное разрешение используемых для расчётов цифровых моделей рельефа (для использования методики необходимо «привести» их к соответствующих масштабам изначально использованных карт 1:10 000 и 1:25 000) и нахождение точек перегиба по профилю лавиносбора (25, 20 и 15°). Кроме того, методика нахождения дальности выброса, соответствующая «лавинам раз в 50–100 лет» также потребовала формализации и уточнения. В результате разработана схема позволяющая минимизировать различия в результатах определения дальности выброса лавин базирующаяся на статистическом анализе данных, проведённом В.П.Благовещенским вне зависимости от её пользователя.

Новые данные о датировках голоценовых морен на Северном Кавказе

Соломина О.Н.^{1,2}, Джомелли В.³, Бушуева И.С.^{1,2}, Чартон Дж.^{3,4}

¹Институт географии РАН, Москва, РФ

²НИУ Высшая Школа Экономики, Москва, РФ

³Университет Экс-Марсель, Экс-ан-Прованс, Франция

⁴Обсерватория Ламонт-Дохерти, Колумбийский университет, Нью-Йорк, США

В докладе будут представлены результаты радиоуглеродного датирования погребенных почв, обнаруженных в моренах ледника Большой Азау, и датировки морен нескольких ледников, полученные с помощью анализа космогенных изотопов, главным образом ^{10}Be (Алибек (Западный Кавказ), Большой Азау, Ирик, Шхельда, Терскол, Кашкаташ, Донгуз-Орун (Приэльбрусье, Центральный Кавказ) и Безенги (Долина Череха Безенгийского, Центральный Кавказ). В целом на Северном Кавказе, выделено и датировано несколько стадий наступаний ледников в голоцене: 3,0-2,9, 1,6, 0,7-0,8, 0,5, 0,25 и 0,16-0,14 тыс. лет назад. Все они относятся к неогляциалу, т.е. к периоду похолодания, который наступил в умеренных и высоких широтах северного полушария после голоценового климатического оптимума. Эти неогляциальные морены собраны в компактные комплексы, которые примыкают с внешней стороны к моренам малого ледникового периода, которые, в свою очередь, ранее были датированы по картографическим, историческим, лихенометрическим и дендрохронологическим данным (Solomina et al., 2016, Solomina, Jomelli, Bushueva, 2024). Морена, возможно, относящаяся к наступанию раннего голоцена, зафиксирована только в двух долинах (Терскол, Башкара), но эти даты требуют подтверждения. Для среднего голоцена в долине Безенги было получено три космогенные датировки по ^{10}Be (7.02 ± 0.39 , 6.8 ± 0.41 и 6.57 ± 0.41 тыс. л.н.) для валунов, находящихся примерно в 6 км от современного конца ледника Безенги. Эти отложения считались ледниковыми, но последние исследования показали, что они, скорее всего – имеют обвальный генезис и наложены на древнюю морену, возраст которой неизвестен.

Таким образом, большая часть раннего и среднего голоцена, скорее всего, на Северном Кавказе были теплыми и, даже если в это время и происходили ледниковые подвижки, ледники, вероятно, не выходили за пределы современного оледенения. В позднем голоцене (неогляциал) размеры ледников в целом увеличились и их наступания стали более частыми. Современные ледники на северном склоне Кавказа отступают, и от внутренних частей комплексов малого ледникового периода они отстоят на расстояние до 2 км.

Изменения ледников и снежников Мутновского и Горелого вулканов (юг Камчатки) с 1973 года

Стельмах Ю.Ю., Петраков Д.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

julia.stelmakh1806@gmail.com

Район вулканов Мутновский и Горелый на юге Камчатки считается одним из самых многоснежных на полуострове, что обеспечивает также широкое распространение малых форм оледенения – многолетних снежников, в том числе в переходной к ледникам стадии, и ледников площадью менее 0,1 км² [1].

В работе представлена оценка изменений площади и массы ледников и снежников вулканов Горелый и Мутновский. Было проведено дешифрирование ледников и снежников на основе снимков спутников Landsat-8 (2013-2017 гг.), Sentinel-2 (2018-2023 гг.), КН-9 (1973 г). При расчете баланса массы использовались фрагменты мозаики ArcticDEM разрешением 2 метра, а также ЦМР, построенная по результатам оцифровки топографической карты масштаба 1:50000 с состоянием местности на 1974 г. Для сопоставления высот разных ЦМР была проведена корегистрация. Расчет балансы массы ледников и снежников проводился путем вычитания растровых значений высоты одной ЦМР из другой в программе ArcGis Pro.

Площадь ледников и снежников исследуемого района сокращалась в период с 1973 по 2023 гг. С 1974 по 2022 гг. среднее значение баланса массы ледников составило примерно - 0,2 м. в. э. в год. Баланс массы ледника Козельский за 1977-2022 гг. составил -0,33 м в. э. в год [2], что в целом сопоставимо с результатами баланса массы на территории исследования.

Изменения кратерных ледников напрямую зависят от активности вулкана и обвально-осыпных процессов. Состояние внекратерных ледников и снежников зависит от метеопараметров конкретного года.

Некоторые из исследованных многолетних снежников, вероятно, могут рассматриваться как малые ледники, поскольку имеют положительный баланс массы, непрерывно существуют на протяжении нескольких десятков лет, состоят из льда и имеют трещины движения.

Литература:

- Виноградов В. Н., Муравьев Я. Д. Современное оледенение Южной Камчатки // Вопросы географии Камчатки. – 1982. – №8. – С. 27-33
Муравьев А. Я., Носенко Г. А., Миронов И. К., Двигало В. Н., Муравьев Я. Д. Баланс массы ледника Козельский на Камчатке за 1977–2022 гг. // Лёд и Снег. – 2023. – Т. 63. – №3. – С. 317-331.

Метеорологические условия формирования снежной толщи в высокогорных районах Камчатки в условиях современных изменений климата

Сушинцев И.М.^{1,2}, Дроздов Е.Д.^{1,2}, Торопов П.А.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² Институт географии РАН

sushintsev@yahoo.com

Условия ледообразования играют существенную роль в формировании типов горных ледников. Кроме того, их понимание необходимо для интерпретации палеогляциологических и палеоклиматических данных, извлекаемых из ледовых кернов. Между тем, эти условия меняются вместе с изменениями климата. Одним из районов возможного резкого изменения условий формирования снежной толщи с «холодного» на «теплый альпийский» является мало изученный район Камчатского полуострова. Экспедиции японских специалистов в 1996 (Kodama et al., 1996), а также сотрудников Института Географии в 2004 и 2022 годах на вершину вулкана Ушковский выявили сложную стратиграфию снежного покрова. Оказалось, что снежно-фирновая толща осложнена большими количеством ледяных прослоев, имеющих различные физические механизмы образования: от инфильтрационного льда, появляющегося вследствие замерзания жидкой влаги внутри снежного покрова, до гололедных и радиационных корок на поверхности снега.

В данной работе предпринята попытка выявить механизмы формирования снежных корок на вулкане Ушковский с использованием модели SNOWPACK, а также модели орографической компоненты осадков (Торопов, 2022).

Смоделированная стратиграфия снега на базе реанализа ERA5 хорошо соотносится с фактическими данными кернов при моделировании на 10 лет. Визуально профили плотности модельных данных и керна похожи, а также неплохо соотносятся статистически (коэффициент детерминации 0,32). Модель неплохо воспроизвела ледяные корки вблизи поверхности, но существенно хуже в глубине снежной толщи. Количество корок, полученных по модели Snowpack, сравнивалось с таковым по данным керна (Kodama et al., 1996), получены хорошие коэффициенты корреляции и детерминации. Показано, что жидкие осадки не делают большого вклада в формирование плотных ледовых корок. SNOWPACK в связке с орографической моделью осадков хорошо воспроизвел снегонакопление в течение 10-летнего периода.

Работа поддержана грантом 075-15-2024-554 в виде субсидии крупного научного проекта Минобрнауки России (проект «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации»).

Общее газосодержание керна древнего атмосферного льда со станции Восток

Тебенькова Н.А.^{1,2}, Хомякова В.А.¹, Липенков В.Я.¹, Саламатин А.Н.¹

¹ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

² Санкт-Петербургский государственный университет

Сильная антикорреляция, наблюдаемая между сигналом общего газосодержания в ледяных кернах Центральной Антарктиды и местной летней инсоляцией, делает общее газосодержание полезным инструментом орбитального датирования для определения возраста этих кернов и, возможно, будущих ледяных кернов, которые ожидаются на основе текущих и запланированных проектов бурения древнего льда. Мы измерили общее газосодержание в ледяном керне из скважины 5Г-5, пробуренной на станции Восток в 2018–2024 годах в рамках инициативы Vostok Oldest Ice Challenge. Обсуждаемые здесь данные общего газосодержания были получены с использованием барометрического метода на основе стратиграфически нарушенного атмосферного льда, залегающего между 3463 и 3538 м возрастом 600–1200 тыс. лет. Новые измерения показывают почти такое же среднее значение общего газосодержания, как и в верхней части ледовой толщи в районе станции Восток, отложившейся 5–420 тыс. лет назад, что позволяет предположить, что за последние 1,2 миллиона лет высота поверхности ледникового щита в этой части Восточной Антарктиды была стабильной и схожей той, которая преобладала в течение последних 420 тыс. лет. Однако амплитуда вариаций общего газосодержания древнего льда оказалась в 2–3 раза меньше, чем в верхней части ледникового щита. В этой работе мы демонстрируем, что наблюдаемое затухание орбитального сигнала в данных общего газосодержания керна со станции Восток является результатом сочетания перемешивания льда в масштабах меньше 1 м и диффузионного сглаживания - двух процессов, которые становятся особенно активными у подножия ледникового покрова. Мы также показываем, что в отсутствие перемешивания льда амплитуда изменений общего газосодержания в частотах прецессии и изменения наклона орбиты претерпела бы лишь незначительное диффузионное сглаживание, а это означает, что общее газосодержание все ещё может оказаться полезным для датирования древнего ненарушенного льда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 23-27-00447.

Пересмотр баланса массы ледников острова Беннетта, Восточно-Сибирское море

Терехов А.В., Прохорова У.В., Веркулич С.Р.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Остров Беннетта площадью около 155 км² (76°41' N 148°56' E) — один из немногих центров оледенения в Восточно-Сибирском секторе высокоширотной Арктики. Треть поверхности острова занимают ледниковые купола: Толля, Де Лонга восточный и западный, а также Малый. До настоящего времени известными оставались результаты лишь одного балансового года непосредственных измерений баланса массы, экспедиции лета 1987 г. [1]. Однако, в настоящей работе впервые представлены и обработаны результаты полевых работ 1989 г., когда зимний и годовой баланс массы также были измерены на всех ледниковых куполах.

Кроме того, на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM нами был рассчитан геодезический баланс массы оледенения острова Беннетта за десятилетие 2012–2022 гг. Среднее по площади снижение ледниковой поверхности составило -6.27 ± 0.12 м, что эквивалентно балансу в -5.33 ± 0.39 м в.э. При этом площадь оледенения сократилась за десятилетие на 4 км², или на 7%.

Обнаруженные архивные данные и результаты применения геодезического метода позволили перекалибровать линейную регрессионную модель, предложенную в 2014 г. Копуа и соавторами [2] для реконструкции баланса массы купола Толля. По сравнению с предыдущей реконструкцией, представленный ряд характеризуется гораздо меньшими потерями массы на протяжении 20го века: кумулятивный баланс за 1967–2010 гг. оценивается нами в -8.4 м в.э. (против -19.4 м в.э. в работе [2]).

Приблизительная оценка запасов льда на острове по формуле степенной зависимости от площади ледника даёт результаты от 40 (купол Малый) до сотни метров (купол Толля). При сохранении нынешних климатических условий купол Малый исчезнет уже через несколько десятилетий, в то время как три других ледника "доживут" до следующего века.

Литература:

- Verkulich, S. R., Krusanov, A. G., & Anisimov, M. A. (1992). The present state of, and trends displayed by, the glaciers of Bennett Island in the past 40 years. *Polar Geography*, 16(1), 51–57.
Konya, K., Kadota, T., Yabuki, H., & Ohata, T. (2014). Fifty years of meteo-glaciological change in Toll Glacier, Bennett Island, De Long Islands, Siberian Arctic. *Polar Science*, 8(2), 86–95.

Моделирование осадков в горных районах применительно к задачам гляциологии

Торопов П.А., Дроздов Е.Д., Шестакова А.А., Сушинцев И.М., Михаленко В.Н.

Институт географии РАН

Физически обоснованная оценка орографической составляющей осадков весьма актуальна для задач гляциологии, горной гидрологии, геоморфологии, рекреационной географии. Речь идет о расчетах баланса массы горных ледников (Кренке и др., 2012; Михайлов, 1985), оценке снегонакопления применительно к задачам лавиноведения (Butschek, Niedermoser, 2018; Олейников, Володичева, 2020), оценке селевых рисков и паводках на горных реках (Rets E., Kireeva M., 2010), и т.д. Еще одно возможное и важное приложение алгоритма расчета орографической составляющей осадков – уточнение полей осадков в горных районах в глобальных климатических моделях.

Рассчитать орографическую компоненту осадков можно на основе полных мезомасштабных моделей прогноза погоды, которые в сочетании с дистанционными измерениями дают неплохие результаты по горным районам (Rotunno R., Houze R. A., 2007). Однако их использование требует огромных вычислительных ресурсов, поэтому практически невозможно на сезонных и тем более климатических масштабах. Другой подход основан на простых статистических связях сезонных сумм осадков со снежным покровом (Huss M., Hock R., 2015), характеристики которого в последние годы восстанавливаются с помощью дистанционных методов. Несмотря на вычислительную простоту, физическая обоснованность такого подхода вызывает много вопросов. Еще один вариант восстановления осадков в горах – использование плювиометрических градиентов, полученных по горному району со схожими климатическими условиями и хорошо обеспеченному данными наблюдений (Barry, 2008), или на основе подробных топографических данных (Кислов и др., 2007). Однако и в этом случае речь не может идти о физически обоснованных прогностических расчетах. Поэтому представляется логичным использование подхода «промежуточной сложности», который с одной стороны существенно проще мезомасштабных гидродинамических моделей, но с другой стороны более обоснован, чем простые физико-статистические схемы.

В данной работе предложена модель орографической компоненты осадков, основанная на алгоритме расчета скорости конденсации водяного пара в воздухе, натекающем на горный склон. В модели учтено затухание вертикальной компоненты скорости ветра, инициированной рельефом, в зависимости от стратификации атмосферы, а также доля влаги, выпадающей в виде осадков, от общей массы конденсата. В качестве начальных данных используется информация реанализа ERA5 (температура, характеристики влажности, компоненты скорости ветра). Показано, что предложенный алгоритм неплохо воспроизводит синоптическую изменчивость осадков, их сезонный ход и климатическую изменчивость, а также пространственное распределение по склонам Эльбруса на Кавказе и вулкана Ушковский на Камчатке. Также выполнено сравнение годовых сумм осадков с реконструкцией аккумуляции по данным ледовых кернов, полученных на Западном плато Эльбруса в 2009 и 2018 г., а также по результатам снегомерной съемки и моделирования снежного покрова на леднике Гарабаши в 2023 – 2024 гг. Показано, что данный алгоритм может быть использован для расчета годового слоя аккумуляции на горных ледниках, и применяться для обобщенных оценок лавинной и селевой опасности.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-17-00247.

Скорость движения ледников Валленберга, Круне и Монако по данным дистанционного зондирования за 2017-2023 гг.

Трунин Д.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

trunden02@gmail.com

В период с 1971 по 2019 год среднегодовая температура воздуха на Шпицбергене возросла на $3,1^{\circ}\text{C}$, что в три раза больше, чем среднемировой показатель. Ледники считаются ключевыми индикаторами изменения климата из-за их чувствительной реакции даже на небольшие климатические изменения. Это проявляется в изменении фронта ледников, высоты поверхности, баланса массы и скорости движения, которые являются взаимосвязанными характеристиками. В данном контексте весьма актуальной задачей представляется изучение скоростей движения ледников, чтобы правильно фиксировать и оценивать климатические изменения. Цель данной работы – оценить скорости движения ледников Валленберга, Круне и Монако за период с 2017 по 2023 год на основе космических радиолокационных изображений.

Чтобы оценить скорости движения исследуемых ледников было использовано 198 снимков с группировки спутников Sentinel-1 с февраля 2017 по декабрь 2023 с интервалом между снимками 12 дней. Они были обработаны в приложении SNAP и получены 612 пар снимков. В итоге составлена 21 карта среднегодовых скоростей движения трёх ледников за 2017-2023 гг. и серия карт сезонных скоростей движения. Благодаря полученным данным была зафиксирована подвижка ледника Валленберга в 2017-2018 годах. Максимальная скорость на фронте ледника составляла более 3 м/сутки. Также в исследуемый период скорость движения на фронте ледника Круне была более 2 м/сутки каждый год. На леднике Монако подвижка произошла в 2017-2020 годах. Пик скоростей приходился на 2019, где он составлял более 4,5 м/сут. В 2021 году скорость на фронте ледника заметно уменьшилась, но оставалось довольно высокой – 1 м/сутки.

Причины сезонных вариаций минеральной пыли на Камчатке

Хайрединова А.Г.¹, Воробьев М.А.¹, Кутузов С.С.¹, Виноградова М.М.¹, Чижова Ю.Н.^{1,2},
Михаленко В.Н.¹

¹Институт географии РАН,

²Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН

a.khairedinova@igras.ru

Камчатка обладает уникальными климатическими особенностями, сочетая морской и континентальный типы климата при суровых температурных условиях, избыточном увлажнении и значительной роли циклонической деятельности. Эти факторы делают регион особенно интересным для изучения атмосферного переноса и осаждения минеральных частиц.

Осенью 2022 года в кратере Горшкова ледника Ушковский был получен ледниковый керн длиной 13,85 метра. Для ледникового керна был выполнен комплексный анализ минеральной пыли. Рассмотрена общая характеристика минеральной пыли, исследован минералогический состав, проведена оценка источников поступления.

Выявлена четкая цикличность поступления минеральной пыли на ледник, которая характеризуется атипичным распределением в течение года. Проведено сравнение с рядом химическим элементов (в том числе Са, F). Рассмотрены причины повышенных концентраций в отдельные периоды.

Поддержано грантом РФФИ 22-17-00159.

Термоцирки Карского региона: факторы активизации термоденудационных процессов и активность термоцирков на центральном Ямале

Хомутов А.В.¹, Бабкина Е.А.¹, Хайруллин Р.Р.², Дворников Ю.А.^{3,4}

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН

² b.geos GmbH, Корнойбург, Австрия

³ Лаборатория Smart Urban Nature, Российский университет дружбы народов

⁴ Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

На основе сопоставления разновременных дистанционных материалов (2010, 2013 и 2018 гг.), сопровождавшегося анализом климатических данных, проведен анализ активности термоцирков, формирующихся в результате активизации криогенных оползней течения по пластовым подземным льдам, в период 2010-2018 гг. Анализ данных мониторинга показал, что в 2012 и 2013 гг. для всех типов поверхностей характерно значительное увеличение сезонного протаивания по сравнению с предыдущим периодом 1993-2011 гг. (12% на склонах), связанного с ростом летней температуры воздуха, с увеличением количества летних осадков, а также с увеличением продолжительности теплого периода (Бабкина и др., 2019). Результаты анализа активности термоцирков были визуализированы с помощью карты (Хомутов и др., 2024). Результаты этого локального исследования сопоставлены с результатами регионального (полуострова Ямал и Гыданский) дистанционного исследования термоцирков (Нестерова и др., 2021), что показало более высокую точность локальных исследований, основанных на полевом мониторинге и космических снимках высокого разрешения. В результате выявлено следующее: 1) за период с 2010 по 2018 гг. активность термоденудации в изучаемом районе повысилась за счет аномальных климатических условий весенне-летнего сезона 2012 г., а затем постепенно пошла на спад; 2) кроме «классических термоцирков, находившихся на разных стадиях активности в анализируемые временные срезы (2010, 2013 и 2018 гг.), выявлено значительное количество эмбриональных термоцирков. Такие термоцирки, как и большинство небольших «классических» термоцирков, могут быть выявлены только по космическим снимкам со сверхвысоким пространственным разрешением.

Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

КОМЕТА – математическая модель эволюции снежного покрова для задач лавиноведения и снеговедения

Чернов Р.А., Андросова Е.Е.

Институт географии РАН.

chernov@igras.ru

На основе математических функций в модели КОМЕТА реализован принцип взаимодействия процессов уплотнения снега и роста кристаллов в условиях термоградиентного метаморфизма.

Математическая модель эволюции снежного покрова КОМЕТА рассчитывает характеристики снежного покрова послойно (толщина, плотность, размер кристаллов, температура) на основе ограниченного набора метеоданных: температуры воздуха, количества осадков, тип осадков, скорость ветра. Скорость ветра и тип осадков определяет начальную плотность слоя снега. Система уравнений рассчитывает скорость уплотнения снега в зависимости от текущей плотности каждого слоя снега, весовой нагрузки на слой, температуры в слоях, среднего размера кристаллов в каждом слое. Уплотнение в каждом слое снега идет с различной скоростью, что отличает модель КОМЕТА от большинства физико-математических моделей снежного покрова. Тот же принцип реализован в расчете скорости роста кристаллов снега в каждом слое. Процессы уплотнения снега при нулевой температуре также учтены в модели и имитируют уплотнение верхних слоев снега при поверхностном таянии. Расчет характеристик снежного покрова проводится от начала накопления первого слоя снега с интервалом 1 час и представлен в виде стратиграфического разреза (рисунок) и набора численных характеристик слоев для любого момента времени в пределах расчетного интервала времени.

Модель КОМЕТА реализована в виде программы для установки на Windows XP, 7 и 10. Модель реализована на основе языка программирования C++ и отличается высокой экономичностью компьютерных ресурсов. Создание загрузочного файла для расчета эволюции снежного покрова занимает около 1-2 часа в зависимости от количества снегопадов и детализации хода температуры воздуха, расчет длится 2-3 сек. В диалоговом окне программы имеется возможность редактировать загрузочный файл. Пакет программы с описанием предлагается автором для всех заинтересованных исследователей.

Показаны примеры расчета на основе полевых исследований снежного покрова и данных литературы в ЦАО, Алтае, Хибинах, Якутии и Шпицбергене. Модель апробирована по данным шурфования снежного покрова, выполненной лавинной службой г. Кировска зимой 2023/2024 и в связи с этим авторы выражают благодарность Василию Струину. Авторы отмечают огромный вклад Сергея Михальчука в создание кода программы.

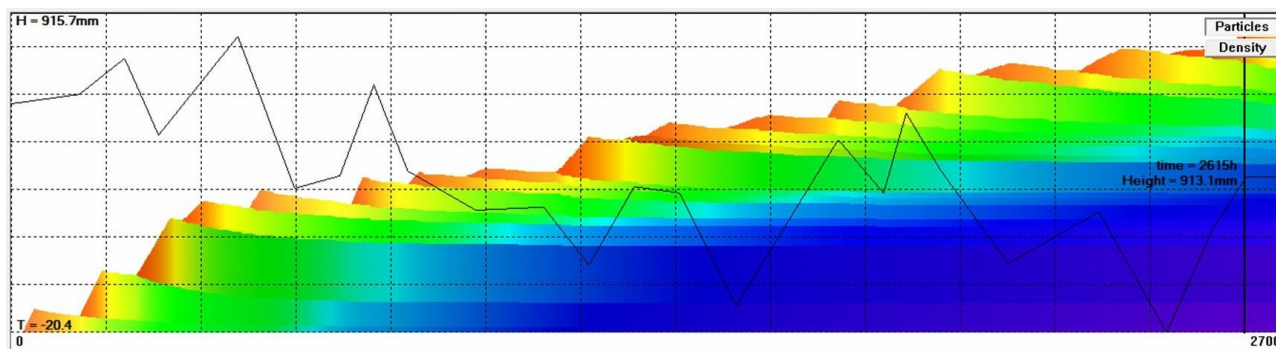


Рисунок. Представление эволюции снежной толщи в виде стратиграфического разреза.

Экспериментальное определение коэффициента вязкости сухого снега

Чернов Р.А.

Институт географии РАН

chernov@igras.ru

Уплотнение снега – естественный процесс эволюции снежного покрова, который влияет на его физико-механические свойства. Количественной оценкой этого процесса является коэффициент вязкости снега, который линейно связан со скоростью деформации. На основе теории вязкого уплотнения снега представлена методика определения коэффициента вязкости снега при одноосном сжатии. Определены оптимальные размеры образцов снега и соответствующие им нагрузки. Во избежание резких просадок и выполнении условия вязкого уплотнения оптимально подбирать вес нагрузки не более 10 г/см². Определены значения коэффициента вязкости мелкозернистого снега в диапазоне плотности от 0,1 до 0,3 г/см³ и при изменении температуры от —1 до —18 °С, которые изменяются от $0,9 \cdot 10^8$ до $0,8 \cdot 10^{10}$ Па·с. Среднее значение коэффициента вязкости мелкозернистого снега в испытаниях составило $8,5 \cdot 10^8$ Па·с. Данная величина удовлетворительно описывает естественное оседание снега в верхнем горизонте снежного покрова при отрицательной температуре. Для расчетных оценок предложена эмпирическая формула зависимости коэффициента вязкости мелкозернистого снега от плотности и температуры.

В ходе исследования отмечено, что влияние плотности и температуры на изменения коэффициента вязкости снега сопоставимы по величине. Результат может быть использован в моделировании процессов уплотнения слоев снежного покрова для широкого спектра задач.

Экспериментальные работы проводились в рамках темы государственного задания Института географии РАН №1021051703465-1 (FMWS-2024-0004) “Криосфера в условиях изменения климата”.

Ошибки оценивания лавинной опасности и морфометрия лавиносборов

Черноус П.А., Боброва Д.А.

СКБ САМИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск

pchernous48@gmail.com

Существует много методов оценивания лавинной опасности территорий, все они либо полностью эмпирические, либо содержат эмпирические параметры. Надежность их использования связана с физико-географическими условиями, для которых они создавались. В нормативных документах, регламентирующих инженерные изыскания в лавиноопасных районах, обязательных требований к оценке точности опасных характеристик лавин нет. В работе анализируется точность оценок характеристик лавин с помощью топографических моделей. Оцениваются ошибки связанные с выбором пути лавины, масштабами карт, которые использовались при разработке моделей, определением параметров моделей, измерениями и некоторыми другими факторами. Показано, что с учетом всех возможных ошибок, ошибки в определении коэффициента эффективного сопротивления могут превышать 10%, что при малых его значениях и определенным профилям движения лавин может приводить к ошибкам в сотни метров в определении дальности выброса лавины и большим ошибкам определения ее скорости и ударного давления. Для уменьшения ошибок требуется по крайней мере единообразное определение параметров рельефа, используемых при построении модели и ее эксплуатации. Топографическая модель не может использоваться для определения обеспеченности различных дальностей выброса, скоростей и ударных давлений лавин.

Феноменологическая модель возникновения лавины из снежной доски

Черноус П.А.

СКБ САМИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск

pchernous48@gmail.com

В зависимости от скоростей деформации разрушение снежной доски носит характер хрупкого либо пластического. Измерение деформаций и их скоростей в полевых условиях представляет собой довольно трудную задачу. В то же время деформации и их скорости связаны с нагрузками и скоростями их приложения, которые измерить гораздо проще. Предлагается модель возникновения лавины из снежной доски, учитывающая изменение прочностных характеристик снега в зависимости от скорости приложения нагрузки. Приведены примеры полевых и лабораторных экспериментов по измерению предельного сопротивления сдвигу при различных скоростях приложения нагрузок. Показано, что существуют различные пределы прочности при быстрых и медленных нагружениях. В обычных условиях напряжения сдвига на подложке лавинообразующего слоя снега меняются медленно. Они связаны со снегопадами и метелевым переносом в лавинном очаге. Соответственно прочность снега может быть значительно выше, чем при быстрых нагружениях, возникающих из-за проскальзывания снежного покрова по подложке в зонах, где напряжение сдвига становится равным предельному сопротивлению сдвига и как следствие быстрому перераспределению напряжений в окружающем снеге, а также в результате сейсмического либо акустического воздействия взрывов, проезда лыжника и т.п. Предлагаемый подход позволяет более адекватно описать процесс возникновения лавины из снежной доски.

Датирование ледниковой толщи западного плато Эльбруса на основе модели течения льда

Черняков Г.А., Елагина Н.Э., Киселева Т.Д.

Институт географии РАН

Оледенение г. Эльбрус представляет собой ледниковый архив палеоклиматических данных, репрезентативных для всего юга европейской части России. При этом на Эльбрусе на больших высотах практически отсутствует таяние, что обеспечивает сохранность климатического сигнала. Для выполнения реконструкций на основе палеоархива его необходимо датировать. Ранее лабораторными методами были продатированы отдельные участки глубокого ледникового керна (182,7 м), полученного в 2009 г. в привершинной области Эльбруса, на Западном плато. Датированы были верхняя часть керна – до глубины 168,6 м (возраст льда до 260 лет) и придонные слои в диапазоне глубин 176,9–182,2 м (усреднённые оценки возраста – между 1000 и 2000 лет).

В нашем исследовании при помощи модели течения льда было рассчитано поле скоростей в трёхмерной области ледника (в пределах охвата данными ЦМР) и на этой основе смоделировано пространственное распределение возраста фирново-ледяной толщи Западного плато; в частности, реконструирован возраст недатированного прежде промежуточного участка керна. Распределение скоростей в леднике позволяет рассчитать время перемещения каждой частицы фирна/льда от поверхности до её текущего положения.

Расчёт поля скоростей выполнен на основе трёхмерной стационарной полной модели Стокса с реологическим законом для сжимаемой нелинейно вязкой среды (фирн/лёд). Использованы модели как изотермической, так и теплопроводной среды (термомеханическое сопряжение). Рассмотрены два варианта граничных условий: (1) горизонтальный отток льда через южную и западную границы расчётной области со скоростью до 20 м/год и (2) отсутствие ледового стока на боковых границах. Калибровка модели и поиск соответствия данным ледникового керна произведены путём вариации вязкости фирна/льда. Краевые задачи модели решены численно методом конечных элементов.

В результате калибровки из всех вариантов моделирования выбраны три. Модельные датировки верхней части керна почти полностью согласуются с лабораторными (до глубины 165 м; 243 года по керну). Базальная часть керна также описывается моделью удовлетворительно: для глубин 176,9–179,3 м часть модельных датировок попадает в 68,2 % доверительные интервалы возраста, вычисленные на основе химического анализа керна.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00262, <https://rscf.ru/project/24-27-00262/>.

Применение пространственно-временных связей для расчета аккумуляции ледника

Чеховских А.М., Поповнин В.В., Губанов А.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Аккумуляция, абляция и баланс массы горных ледников являются ключевыми показателями эволюции наземного оледенения, однако на уровне ледниковых систем и отдельных ледников особый интерес представляет площадное распределение этих показателей. По сравнению с абляцией распределение максимальных водозапасах на леднике зависит от большего количества факторов и проявляется в значительной изменчивости величины аккумуляции даже в пределах ограниченного полигона.

Наблюдения за балансом массы опорного ледника Джанкуат ведутся непрерывно с 1967/68 г., однако первый опыт построения поля аккумуляции относится к 1970/71 г. Для экстраполяции результатов снегосъемки на всю площадь ледника, включая недоступные участки, был разработан и применен физико-географический подход, основанный на использовании карты динамики покрытости ледника сезонным снегом в последующий период абляции. Совершенствование методики построения полей и пополнение архива полевых материалов привело к формированию нового научного направления – изучению пространственно-временной устойчивости гляциологических полей.

Несмотря на отличающиеся метеорологические условия разных сезонов снегонакопления, вклад различных источников в питание ледников и их меняющуюся морфометрию, при анализе полей аккумуляции наблюдаются участки как со стабильными, так и с изменчивыми значениями водозапаса. Количественная оценка временной устойчивости поля аккумуляции возможна при использовании статистических закономерностей путем анализа корреляционных связей между точечными, зональными и ледниковыми значениями аккумуляции. В качестве эксперимента на основе связей различного уровня по единственной точке с известным значением аккумуляции рассчитана аккумуляция 2008/09 г. После расчёта приходной составляющей баланса по 13 высотно-морфологическим зонам для всего ледника в целом выведено значение 2360 мм вод.экв., что лишь на 10 мм меньше фактически измеренной величины. Аналогичные расчеты аккумуляции сделаны для последних сезонов наблюдений, которые показали высокую точность данного подхода при минимальном количестве входных данных, что выливается в уменьшение количества пунктов снегосъемки и сокращение трудозатрат. На практике этот приём позволяет выявить участки, требующие более и менее плотного расположения промерных точек, и скорректировать расчет аккумуляции на недоступных участках ледника.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 22-17-00133).

Особенности формирования изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) ледникового льда в кратере вулкана Ушковский

Чижова Ю.Н.^{1,2}, Михаленко В.Н.¹, Корнева И.А.^{1,3}, Муравьев Я.Д.⁴, Хайрединова А.Г.¹, Воробьев М.А.¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

³Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

⁴Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

eacentr@yandex.ru

Исследованы изотопные характеристики ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d-excess) льда, полученного в ходе кернового бурения ледника в кратере вулкана Ушковский летом 2022 г. Керна льда длиной 14 м охватывает 16 лет аккумуляции. В распределении среднегодовых значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ замечен тренд повышения от 2006 к 2022 г. (среднее возрастание величины $\delta^{18}\text{O}$ на 2,5‰). Для этого же периода средние за год температуры воздуха также демонстрируют положительный тренд (общее возрастание температуры воздуха на 1,1 °C). Однако, повышение температур воздуха не являлось причиной возрастания значений $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда. В целом вариации $T_{\text{ср.год}}$ и $\delta^{18}\text{O}$ не коррелируют ($r^2 = 0,2$). Изменения величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда по глубине происходят в противофазе с изменениями d-excess. На изотопной диаграмме значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда формируют линейный тренд, описываемый уравнением $\delta^2\text{H} = 7,47 \times \delta^{18}\text{O} + 2,9$ ($R^2 = 0,98$), наклон линии, отличный от глобальной линии метеорных вод, отражает смешение летних и зимних атмосферных осадков. Рассматривая совместно распределение величин $\delta^{18}\text{O}$ и d-excess, мы пришли к выводу, что тренд повышения значений $\delta^{18}\text{O}$ льда связан с изменением структуры питания ледника – увеличением количества осадков летнего (весеннего) сезона на фоне уменьшения осадков зимнего периода. Также использование величины d-excess позволило установить, что на изотопные параметры льда 2011-2012 и 2021-2022 годовых слоев повлияла выраженная положительная аномалия температур поверхности океана, которая подтверждается данными наблюдений HadSST.

Поддержано грантом РНФ 22-17-00159.

Оледенение севера Западной Сибири с позиций его взаимодействия в плейстоцене с криолитозоной и принципа актуализма

Шейнкман В.С., Мельников В.П.

Институт криосферы Земли, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН

Принцип актуализма является основой палеогляциологических реконструкций. Но в отношении его применения к былым, формировавшимся в условиях криолитозоны, гляциальным обстановкам на севере Западной Сибири, накопились противоречия – в связи со сформировавшимися ранее стереотипами их восприятия. Причина – изначально на былое пространство данного региона переносились, порой без должной корректировки, черты альпийско-скандинавских схем развития оледенения путем сопоставления равнины севера Западной Сибири с внешне похожей на неё Русской равниной и с аналогичным размещением здесь ледникового щита. Но на Русскую равнину ледник двигался из Скандинавии, что логично – многие её горы выше 2000 м (высшая точка – 2469 м), имеют большую площадь (>800 тыс. км²), а атмосферных осадков на них ныне оседает от 3000 до 5000 мм/год – превышая на порядок количество осадков на севере Западной Сибири. Питание у ледников (важнейший их параметр) в Скандинавии >300 г/(см²·год) [Атлас ..., 1997], что весьма много: при похолодании климата оно определит быстрое снижение хионосферы, разрастание ледников до крупных размеров и высокое значение, на этапе их роста, энергии оледенения (по [Шумский, 1955]). А горы, окружающие север Западной Сибири, вдвое ниже (высота их обычно до 1000 м, несколько выше 1500 м лишь отдельные массивы Путораны и Полярного Урала) и, получая в сравнении со Скандинавией на порядок меньше осадков, находятся более чем на 1000 м ниже климатической снеговой линии. Фоновое снегонакопление здесь вдвое уступает снеготаянию, и ныне в отмеченных горах развиты лишь малые азональные ледники, существующие за счёт локального накопления в ветровой тени снега, сносимого с окружающих склонов. Даже максимально допустимое в криохроны для данного района опускание хионосферы (на величину около 1000 м, или пусть несколько больше [Sheinkman, 2016]) не обеспечит здесь развитие крупных ледников: оно вызовет лишь сближение снеговых линий – местной, связанной с перемещением снега ветром со склонов, и климатической, определяемой общими зональными причинами. Учитывая, что горное обрамление региона было в прошлом существенно ниже [Шейнкман и др., 2020], здесь зона ледосбора у ледников могла охватить в криохроны лишь самую высокую, малую по площади часть гор, и эти ледники, даже становясь зонально обусловленными, остались бы весьма небольшими. Тем более что в Сибири малая энергия присуща и современным, и древним ледникам: они образуются по холодному типу [Sheinkman, 2016], что определит очень медленное, в отличие от Скандинавии, накопление ледовой массы у них и также медленное их продвижение на весьма ограниченное расстояние.

Подчеркнем: палеомерзлотные формы широко представлены на севере Западной Сибири во всех структурах плейстоцена, и на вход палеогляциологических моделей здесь закономерно должны подаваться параметры, благоприятные для промерзания горных пород. Но они будут негативны для усиления ледникового фактора. Так что развитие образуемых быстро высокоэнергичных ледниковых покровов будет нереально ввиду характерного для региона глубокого промерзания горных пород и малого количества поступающей из атмосферы влаги. Для формирования таких покровов – холодных, с низкой энергией, потребовалось бы в условиях региона увеличить длительность криохронов на порядок и более, что несовместимо с закономерностями климатической ритмики в плейстоцене.

Подтверждает эти выводы и наличие на севере Западной Сибири криогенных палеопочв – ранее из-за превалирования концепции ледникового покрова их поиск не осуществлялся, и данные о них отсутствовали. Но, придя к выводу об отсутствии такого покрова, в последние годы автор и его партнеры [Sheinkman et al., 2024] реализовали поиск палеопочв, которые были обнаружены повсеместно и на разных хронологических и геоморфологических уровнях. В том числе уже выделены [Sedov, Sheinkman, 2024] репрезентативные зональные криопедогенные горизонты.

Холистическая модель полигонально-жильного льдообразования на севере Западной Сибири в плейстоцене

Шейнкман В.С.¹, Мельников В.П.¹, Седов С.Н.¹, Андроханов В.А.²

¹ИКЗ, ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, ²ИПА СО РАН

Холи́зм (от греч. ὅλος – цельный)— позиция в науке в аспекте соотношения части и целого, и ее суть в том, что для понимания какой-либо системы нужно оценивать её в целостности, не сводя сложное к простому, так как целое несводимо к своим частям. Такой подход крайне важен при решении палеокриологических задач, поскольку следы явлений холодного мира, дошедшие до нас, носят многокомпонентный характер, и их верификация сопровождается немалыми трудностями.

С подобными сложностями авторы столкнулись при реконструкции полигонально-жильного льдообразования на севере Западной Сибири. Современные полигонально-жильные льды (ПЖЛ) существуют в данном регионе севернее параллели 68° с. ш., где они неплохо изучены и определены как образования, формируемые со второй половины позднего плейстоцена (Васильчук, 2006; Стрелецкая и др., 2015). Естественно, что южнее отмеченной параллели должны были встречаться следы ПЖЛ, однако до последнего времени в литературе они практически не освещались, так как накопились стереотипы, когда преувеличенно акцентировалось внимание не на криогенных системах в целом, а на отдельных их элементах (Шейнкман, Мельников, 2019). В (Зыкина и др., 2017), например, полигонально-жильные структуры (ПЖС) в регионе отнесены к следам суперхолодной пустыни, аналогичной пустыне Мак-Мёрдо в Антарктиде, где круглый год крайне низкие температуры воздуха и отсутствует сезонное оттаивание пород. Другие авторы (Архипов, 2000; Гросвальд, 2009) считали, что в криохроны север Сибири покрывал ледниковый щит, так как на Сибирь можно переносить выявленные в Европе черты, хотя они в обоих регионах похожи только по отдельным аспектам, а в целом принципиально отличны. Иными словами, целое сводилось к его частям, холистический принцип не соблюдался, и во избежание искажений реконструируемой среды авторы поставили его во главу угла, применив к проблеме полигонально-жильного льдообразования в Западной Сибири.

ПЖЛ формируются в холодных условиях, но с летним оттаиванием пород, когда идет затекание талой воды в морозобойные трещины и ее замерзание там. Холистический подход требовал найти и верифицировать следы этих процессов, показав тем самым, что в криохроны на территории региона господствовали не ледниковые покровы и холодные пустыни, а характеризуемая присутствием ПЖЛ низкотемпературная, но с сезонно-талым слоем криолитозона. Это удалось сделать, привлекая возможности, которые дает изучение криопедогенеза. Оказалось, что на основании бывшего сезонно-талого слоя сохраняются реликты бедных, плохо выраженных криогенных почв. Обычно распознать их трудно. Но выяснилось: они сопряжены с контурами псевдоморфоз, формируемых на месте ПЖЛ, и в терминальную фазу криохронов при переходе их к термохронам, ПЖЛ, для развития которых в песках нужна температура пород –3 ... –5° С (Романовский, 1977), при ее повышении, но при сохранении отрицательных значений, начинается процесс медленного таяния ПЖЛ. В наших условиях он шел несколько тысяч лет и сопровождался оползанием, на прежде занятое льдом место, педоседиментов, которые, захоронились, хорошо сохранились и стали источником важной информации об окружающей среде.

В итоге холистический подход позволил установить распространение ПЖЛ в криохроны в регионе почти на 10° южнее их современной границы. Соответственно отвергнув сценарии с развитием ледникового щита и холодной пустыни.

Моделирование процесса формирования и развития субаквальных таликов центральной Якутии

Шерстенникова С.Р.^{1,2}, Попов С.В.^{1,2,3}, Боронина А.С.^{2,4}, Лебедева Л.С.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

³АО Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Санкт-Петербург

⁴Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

sonya.sherstennikova@gmail.com

В современных климатических условиях многолетняя мерзлота подвергается деградации, что может повлечь за собой глобальные изменения ландшафтов и экосистем и быть разрушительным для объектов инфраструктуры. Одним из методов изучения многолетнемёрзлых пород является математическое моделирование. Он даёт возможность исследовать объекты дистанционно и выполнять различные сценарные расчёты.

В представленной работе исследуются условия формирования и развития субаквальных таликов Центральной Якутии. В основу модели положено решение задачи Стефана. В ней также учитывается испарение, процессы уплотнения в снежной толще (в холодное время года) и теплообмен с атмосферой. На нижней границе задаётся постоянная температура многолетнемёрзлых пород. Входными данными являются теплофизические параметры воды, снега и льда (в холодное время года), а также песчаных отложений в соответствии с имеющимися геологическими разрезами. На рис. 1 представлена концептуальная схема процессов промерзания – протаивания верхней части геологического разреза в течение года, характерная для районов многолетней мерзлоты, где имеются субаквальные талики.

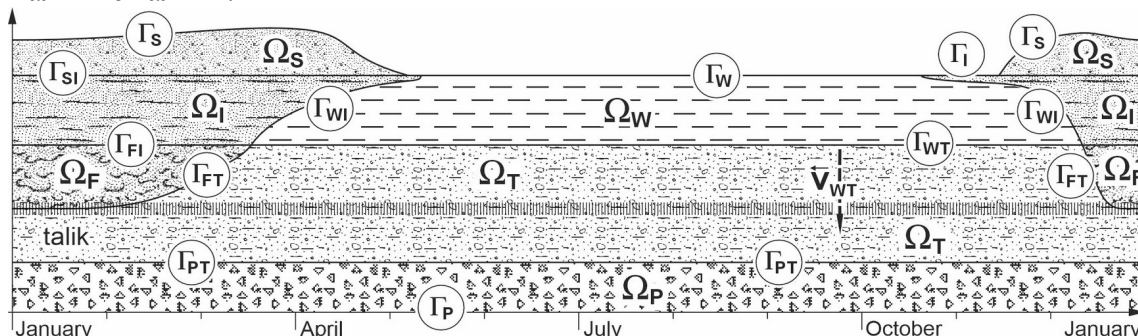


Рисунок. Изменение верхней части геологического разреза с течением времени

ΩP- многолетнемёрзлые породы; ΩF- сезонно-мёрзлые породы; ΩT- талый грунт; ΩS- снежный покров; ΩI- озёрный лёд; ΓP- нижняя граница расчётной области; ΓS, ΓI и ΓW- верхние границы расчётной области; ΓFT- граница между сезонно-мёрзлыми и талыми породами; ΓPT- граница между талыми породами и многолетнемёрзлыми породами; ΓSI - граница между озёрным льдом и снежным покровом; ΓFI - граница между сезонно-мёрзлыми породами и снежным покровом.

Представлены расчёты, выполненные для озера Хаха, Центральная Якутия. Моделирование осуществлялось на основе сценариев, предполагающих различную глубину озера при современных климатических условиях. Согласно полученным результатам, водоём и грунт под ним промёрзли насквозь с течением времени. Вместе с тем, натурные исследования, проводимые на озере, не указывают на полное промерзание водоёма и сохранение отрицательных температур в летний период. В работе обсуждаются возможные причины полученного несоответствия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».