

**УТВЕРЖДЕНО**  
протоколом Наблюдательного совета  
по координации деятельности  
Российского научного центра на  
архипелаге Шпицберген  
от 15 декабря 2021 г. № 13

**ОТЧЕТ**  
**о выполнении**  
**Межведомственной программы**  
**научных исследований и наблюдений на архипелаге**  
**Шпицберген в 2021 году**

Москва 2021

## Содержание

Введение .....	4
Мероприятия Росгидромета .....	7
ФГБУ «ААНИИ» .....	7
Мероприятие 1. Метеорологические исследования параметров приземной атмосферы .....	7
Мероприятие 2. Комплексный мониторинг гидрологического цикла и состояния водных объектов архипелага Шпицберген .....	18
Мероприятие 3. Мониторинг океанографических условий на внутренних акваториях архипелага Шпицберген .....	22
Мероприятие 4. Наблюдения за динамикой баланса массы ледников Западного Шпицбергена .....	27
Мероприятие 5. Палеогеографические исследования .....	30
Мероприятие 6. Современное состояние и динамика многолетней мерзлоты .....	34
Мероприятие 7. Спутниковый мониторинг акватории и побережья Северного ледовитого океана и арктических морей .....	38
Мероприятие 8. Экологические исследования .....	39
Мероприятие 9. Работы по линии международного сотрудничества на арх. Шпицберген ...	44
ФГБУ «Мурманское УГМС» .....	46
Мероприятие 10. Проведение регулярных наблюдений на базе гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» .....	46
ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ФГБУ «ААНИИ» .....	49
Мероприятие 11. Фоновый и локальный экологический мониторинг в районах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген .....	49
Мероприятия Роснедр .....	52
ФГБУ «ВНИИОкеангеология» .....	52
Мероприятие 12. Региональные геолого-геоморфологические исследования в рамках программы по составлению комплекта карт и схем геологического содержания масштаба 1:1 000 000 архипелага Шпицберген .....	52
Мероприятия организаций Минобрнауки .....	54
ФГБУН Институт географии Российской академии наук (ИГ РАН) .....	54
Мероприятие 13. Исследование изменчивости природных и антропогенных ландшафтов архипелага Шпицберген в условиях современного климата .....	54
ФГБУН ФИЦ Кольский научный центр Российской академии наук (ФИЦ КНЦ РАН) .....	57
Мероприятие 14. Изучение минералогического разнообразия и минеральных фаз-концентраторов редких, радиоактивных и рассеянных элементов архипелага Шпицберген .....	57
ФГБУН Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (ММБИ РАН) .....	58
Мероприятие 15. Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген .....	58
ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Российской академии наук (ПАБСИ КНЦ РАН) .....	61
Мероприятие 16. Растительно-почвенные ресурсы, совершенствование методов управления охраняемыми природными территориями в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия и оптимизация среды обитания человека на архипелаге Шпицберген .....	61
Кольский филиал ФГБУН ФИЦ Единая геофизическая служба РАН .....	69

(КоФ ФИЦ ЕГС РАН) .....	69
Мероприятие 17. Развитие методов и аппаратных средств сейсмо-инфразвукового мониторинга процессов деструкции арктической криосферы и обеспечение прогнозирования опасных геодинамических явлений на архипелаге Шпицберген и в прилегающем районе Западного сектора Арктической зоны Российской Федерации.....	69
ФГБНУ Полярный геофизический институт (ПГИ) .....	76
Мероприятие 18. Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли.....	76
ФГБУН Институт археологии Российской академии наук (ИА РАН) .....	84
Мероприятие 19. Сохранение и исследование памятников российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген .....	84
ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН).....	90
Мероприятие 20. Исследование энерго- и газообмена, а также структуры атмосферного пограничного слоя в прибрежных районах Шпицбергена .....	90
Заключение .....	95
Целевые индикаторы и показатели программы научных наблюдений и исследований на архипелаге Шпицберген в 2021 г. ....	98

## Введение

Межведомственная программа научных исследований и наблюдений на архипелаге Шпицберген в 2021 г. (далее – Межведомственная программа) была утверждена Наблюдательным советом РНЦШ 17 марта 2021 г. Её целью является проведение на базе инфраструктуры Российского научного центра на архипелаге Шпицберген междисциплинарных научных наблюдений и исследований для реализации «Стратегии российского присутствия на архипелаге Шпицберген до 2030 года в области фундаментальных и прикладных научных исследований» в соответствии с «Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года», утвержденных указом №164 Президентом Российской Федерации от 5 марта 2020 г., «Концепцией создания и развития Российского научного центра на архипелаге Шпицберген», одобренной распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 сентября 2014 г. № 1676-р, и распоряжением Правительства Российской Федерации от 4 апреля 2016 г. № 577-р о создании постоянно действующей Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген.

Программа содержала следующие задачи, поставленные перед организациями – участниками РНЦШ:

1. Исследование гидрометеорологического режима, текущих и прошлых климатических изменений на архипелаге Шпицберген, включая изучение криосферы, рельефа, почв и грунтов, вод суши.
2. Выполнение комплексных наблюдений за гидрометеорологическими параметрами окружающей среды на базе гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург».
3. Мониторинг океанологических и ледовых условий в прибрежных водах архипелага, изучение влияния атлантических вод на океанологические условия в регионе.
4. Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген.
5. Мониторинг температурного состояния многолетней мерзлоты, глубины распространения сезонно-талого слоя и оценка энерго- и массо-обмена подстилающей поверхности с атмосферой.
6. Исследование межгодовой изменчивости параметров снежного покрова и многолетней мерзлоты, влияющих на деятельность человека в Арктике.
7. Разработка параметризаций для расчета характеристик взаимодействия атмосферы и поверхности над сложным рельефом в полярных районах.
8. Комплексные гляциологические исследования на архипелаге Шпицберген, оценка пространственной изменчивости характеристик ледников, снега и фирна.
9. Исследование растительно-почвенных ресурсов и оптимизация среды обитания человека на архипелаге Шпицберген.
10. Исследование динамики углерода в системе «почва-атмосфера» для почв архипелага Шпицберген в условиях меняющегося климата.
11. Исследование механизмов устойчивости и оценка продуктивности растений разных таксономических групп в высокоширотных тундровых экосистемах.
12. Совершенствование методов управления охраняемыми природными территориями Западного Шпицбергена в условиях глобальных климатических изменений и антропогенного воздействия.
13. Геоэкологический мониторинг различных районов архипелага Шпицберген, в частности законсервированных и действующих поселков.
14. Изучение четвертичных отложений архипелага с целью палеогеографического анализа, реконструкции ландшафтов и прогноза их формирования и развития.

15. Комплексное геолого-геофизическое изучение недр отдельных районов архипелага Шпицберген для уточнения их геологического строения и минерально-сырьевого потенциала.

16. Изучение геоморфологического строения и основных рельефообразующих процессов, оказывающих разрушительное воздействие на действующие и законсервированные посёлки и другие объекты архипелага Шпицберген.

17. Изучение минералогического разнообразия и минеральных фаз-концентраторов редких, радиоактивных и рассеянных элементов архипелага Шпицберген.

18. Исследование уровня геодинамического риска в природно-технических системах районов угледобычи на архипелаге Шпицберген.

19. Развитие методов и аппаратных средств интегрированного сейсмо-инфразвукового комплекса на острове Западный Шпицберген для контроля опасных геодинамических процессов в литосфере и криосфере Западной Арктики.

20. Разработка геофизических индикаторов айсбергогенных льдотрясений.

21. Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли.

22. Сохранение и исследование памятников российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген.

23. Популяризация российских научных исследований и разработок на архипелаге Шпицберген.

Эти задачи вошли в 20 Мероприятий Межведомственной программы, распределенных между 13 исполнителями – участниками Консорциума РНЦШ.

#### **Организации Росгидромета**

ФГБУ «ААНИИ» – Мероприятие 1. Метеорологические исследования параметров приземной атмосферы. Мероприятие 2. Комплексный мониторинг гидрологического цикла и состояния водных объектов архипелага Шпицберген. Мероприятие 3. Мониторинг океанографических условий на внутренних акваториях архипелага Шпицберген. Мероприятие 4. Наблюдения за динамикой баланса массы ледников Западного Шпицбергена. Мероприятие 5. Палеогеографические исследования. Мероприятие 6. Современное состояние и динамика многолетней мерзлоты. Мероприятие 7. Спутниковый мониторинг акватории и побережья Северного ледовитого океана и арктических морей. Мероприятие 8. Экологические исследования. Мероприятие 9. Работы по линии международного сотрудничества на Шпицбергене.

ФГБУ «Мурманское УГМС – Мероприятие 10. Проведение регулярных наблюдений на базе гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург».

ФГБУ «НПО «Тайфун» – Мероприятие 11. Фоновый и локальный экологический мониторинг в районах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген.

#### **Организации Роснедр**

ФГБУ «ВНИИОкеангеология» – Мероприятие 12. Региональные геолого-геофизические исследования с целью изучения геологического строения и минерально-сырьевого потенциала территории архипелага Шпицберген.

#### **Организации Минобрнауки**

ФГБУН «ИГ РАН» – Мероприятие 13. Исследование изменчивости природных и антропогенных ландшафтов архипелага Шпицберген в условиях современного климата.

ФГБУН «ФИЦ КНЦ РАН» – Мероприятие 14. Изучение минералогического разнообразия и минеральных фаз-концентраторов редких, радиоактивных и рассеянных элементов архипелага Шпицберген.

ФГБУН «ММБИ РАН» – Мероприятие 15. Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген.

ФГБУН «ПАБСИ КНЦ РАН» – Мероприятие 16. Растительно-почвенные ресурсы, совершенствование методов управления охраняемыми природными территориями в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия и оптимизация среды обитания человека на архипелаге Шпицберген.

КоФ ФГБУН «ФИЦ ЕГС РАН» – Мероприятие 17. Развитие методов и аппаратных средств сейсмо-инфразвукового мониторинга процессов деструкции арктической криосферы и обеспечение прогнозирования опасных геодинамических явлений на архипелаге Шпицберген и в прилегающем районе Западного сектора Арктической зоны Российской Федерации.

ФГБНУ «ЛГИ» – Мероприятие 18. Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли.

ФГБУН «ИА РАН» – Мероприятие 19. Сохранение и исследование памятников российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген.

ФГБУН «ИФА им. А.М. Обухова РАН» – Мероприятие 20. Исследование энерго- и газообмена, а также структуры атмосферного пограничного слоя в прибрежных районах Шпицбергена.

При выполнении Межведомственной программы организации РНЦШ по-прежнему сталкивались с логистическими проблемами, связанными с пандемией новой коронавирусной инфекции. Принятые Российской Федерацией, Норвегией и другими странами меры по предотвращению распространения вируса Covid-19 резко ограничили возможности по организации работ на Шпицбергене. Прохождение карантина на территории материковой Норвегии как условие въезда на архипелаг привело к дополнительным финансовым расходам при организации полевых работ. Тем не менее большинство организаций смогли провести полевые исследования, хотя и в скорректированном виде. Особое значение имела взаимная помощь партнеров по РНЦШ, проявляющаяся в логистической поддержке и информационном обеспечении.

Краткий отчет по каждому из мероприятий приводится в данном отчете. Полные отчеты о выполнении каждого из мероприятий Программы хранятся в фондах организаций-исполнителей.

## Мероприятия Росгидромета ФГБУ «АНИИ»

### Мероприятие 1. Метеорологические исследования параметров приземной атмосферы

Исследования параметров приземной атмосферы включают три раздела:

- Изучение оптических, микрофизических характеристик и химического состава атмосферного аэрозоля и оценка вклада антропогенных составляющих в уровни загрязнения арктической атмосферы за счет дальнего трансграничного переноса воздушных масс по содержанию аэрозоля;
- Исследования теплового баланса снежно-ледникового покрова с целью корректного описания процессов абляции и процессов энерго-массообмена атмосферы с подстилающей поверхностью и физических процессов в радиационно-активном деятельном слое ледников и снежного покрова тундры и исследование режима осадков, формирования снежного покрова и коррекция методик наблюдения;
- Совершенствование описания процессов взаимодействия пограничного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью для решения фундаментальной задачи эволюции криосферы Арктики в условиях глобального изменения климата.

*Изучение оптических, микрофизических характеристик и химического состава атмосферного аэрозоля*

АНИИ совместно с Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА СО РАН) продолжил измерения характеристик атмосферного аэрозоля на архипелаге Шпицберген в соответствии с соглашением об организации Совместной межведомственной «Лаборатории полярного аэрозоля». Исследования выполнялись также в рамках Программы Президиума РАН №32 «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» (проект «Комплексные исследования аэрозоля и сажи в атмосфере Российской Арктики»). Основная цель исследований состоит в оценке радиационно-климатического влияния аэрозоля в высокоширотном регионе и разработке средних эмпирических микрофизических моделей аэрозоля в регионе работы станции. Также исследование характеристик атмосферного аэрозоля позволяет оценить вклад региональных источников аэрозоля (местных и морских) и переносов аэрозоля со стороны Евразии.

Измерения характеристик атмосферного аэрозоля выполнялись на территории Гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» (ГМО Баренцбург) сотрудниками зимовочного состава РАЭ-Ш. Аэрозольная станция состоит из приборов для измерения основных микрофизических характеристик аэрозоля и обеспечивает круглосуточные наблюдения динамики аэрозольного состава в приземном слое воздуха. Комплекс аппаратуры включает: четырехволновой дифференциальный аэталометр МДА-02 (ИОА СО РАН); аэталометр АЕ-33 (АНИИ); оптический счетчик частиц AZ-10 (ИОА СО РАН); оптический счетчик частиц Grimm 1.109 (АНИИ); аспиратор аэрозольных частиц на серию фильтров. В связи с логистическими трудностями новый счетчик AZ-10 №416 (взамен отправленного на калибровку №248) удалось доставить в п. Баренцбург только в марте 2021 г. Вследствие неисправности счетчик Grimm 1.109 не работал в зимний период и начал измерения в марте 2021 г. Таким образом в период полярной ночи измерения концентраций аэрозоля не проводились (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Количество измерений аэрозольным комплексом (2020-2021 гг.)

Прибор	Количество	
	Среднечасовых значений	Измерительных дней
Счетчик AZ-10	3395	158
Grimm 1.109	14914 (1раз/15мин)	171
Аэталометр МДА-02	8642	360
Аэталометр АЕ-33	>500000 (1раз/мин)	335

Для измерений аэрозольной оптической толщины и общего влагосодержания атмосферы использовался солнечный фотометр SP9. Методики определения АОТ и влагосодержания описаны в работах (Кабанов и Сакерин 1995, Кабанов и Сакерин 1997, Кабанов и др. 2001, Кабанов и др. 2009, Сакерин и др. 2010). Фотометром SP9 в 2021 г. выполнен 9231 замер. Обработка результатов осуществлялись в ИОА СО РАН (Турчинович 2014). Важная роль при обработке исходных данных отводилась выбраковке данных, отягощенных влиянием локальных источников аэрозоля и неблагоприятных метеорологических условий (низкая облачность, туман, осадки). В некоторых случаях при соответствующем направлении ветра проявлялось воздействие дымовых выбросов трубы ТЭЦ, расположенной на расстоянии около 1 км в Ю-ЮЗ направлении от пункта наблюдений. Максимумы концентраций аэрозоля и сажи, возникающие в таких случаях, исключались из дальнейшей обработки.

В течение года измерялись: интегральные (по всей толще атмосферы) характеристики – аэрозольная оптическая толщина (АОТ  $\tau_{\lambda}^a$ ) и общее влагосодержание атмосферы  $W$  [ $\text{г}\times\text{см}^{-2}$ ] (ОВС); в приземном слое атмосферы – счетная концентрация частиц аэрозоля  $N_A$  [ $\text{см}^{-3}$ ] и распределение объема частиц по размерам  $dV/dr$  [ $\text{мкм}^2\times\text{см}^{-3}$ ], где  $r$  – радиус частиц; массовая концентрация аэрозоля  $M_A$  [ $\text{мкг}\times\text{м}^{-3}$ ] и поглощающего вещества («сажи» – black carbon)  $M_{BC}$  [ $\text{мкг}\times\text{м}^{-3}$ ]; коэффициенты полного и обратного аэрозольного рассеяния; осуществлялся забор проб аэрозоля на фильтры для последующего химического анализа.

#### *Вариации микрофизических характеристик аэрозоля в приземном слое атмосферы*

Отличительной особенностью в отчетном периоде явились высокие значения  $M_{BC}$  в октябре 2020 г.: в 2-3 раза больше других среднемесячных значений (рис. 1.1а). По данным метеонаблюдений (по данным сайта [gr5.ru](http://gr5.ru)) этот период отличался частыми и продолжительными туманами и туманной дымкой. В целом средние концентрации в период полярной ночи почти в 3 раза больше, чем в период полярного дня. Аналогично наблюдалось и в предыдущем году. Максимальные значения в период полярного дня приходятся на июнь-июль, хотя, как видно из рис. 1.1б, эти значения ниже, чем в предыдущие годы. Минимальные значения  $M_{BC}$  ( $43\div 45 \text{ нг}\times\text{м}^{-3}$ ) наблюдались в апреле и в сентябре. Указанные среднемесячные значения являются самыми низкими за все годы наблюдений в Баренцбурге.

В целом, диапазон вариаций массовой концентрации сажи за полный период измерений составил  $0,003\div 6,76 \text{ мкг}\times\text{м}^{-3}$  при среднем значении  $0,110 \text{ мкг}\times\text{м}^{-3}$ .

Диапазон вариаций массовой и счетной концентраций аэрозоля в период полярного дня 2021 г. (без данных за август) составил:  $M_A = 0,009\div 41,6 \text{ мкг}\times\text{м}^{-3}$  при среднем значении  $4,08 \text{ мкг}\times\text{м}^{-3}$ ;  $N_A = 0,096\div 95,8 \text{ см}^{-3}$  (среднее  $6,79 \text{ см}^{-3}$ ) (рис. 1.2а). Из рис. 1.2б видно, что массовые концентрации  $M_A$  в 2021 г. существенно выше средних значений в предыдущие годы. Аналогичная ситуация наблюдалась в период полярной ночи 2017-2018 гг. (измерения счетчиком AZ-10 №416). Однако, очевидно, что счетчик AZ-10 № 416 завышает концентрации, особенно в диапазоне крупных частиц. В дальнейшем необходим пересчет данных с учетом поправочных коэффициентов для данного счетчика, который ранее проходил процедуру калибровки со счетчиком AZ-10 (№ 248).

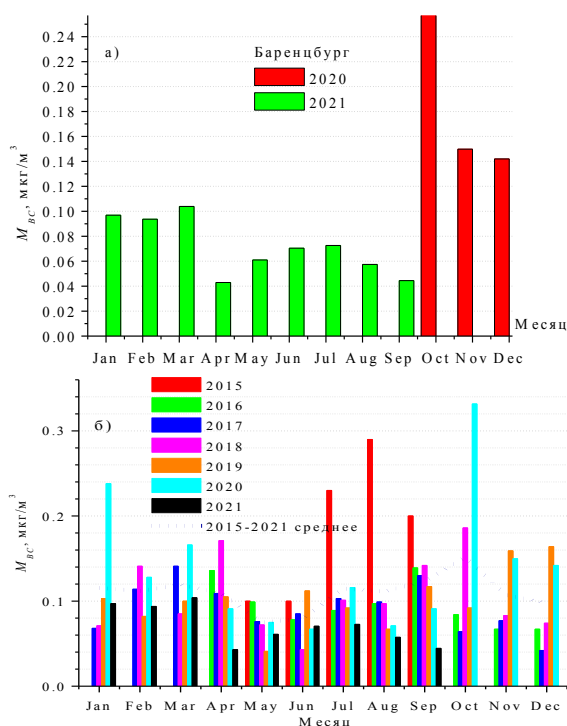


Рисунок 1.1 – Среднемесячные концентрации  $M_{BC}$  в Баренцбурге в периоды: (а) 2020-2021 гг.; (б) 2015-2021 гг.



В сентябре 2021 г. наблюдался минимум счетных концентраций ( $4,58 \text{ см}^{-3}$ ), а в остальной период концентрации находились практически на одном уровне ( $6,36 \div 7,65 \text{ см}^{-3}$ ) (рис. 1.2а). Близкие значения получены в измерениях концентраций счетчиком Grimm 1.109: среднее значение  $N_A$  за период 22 марта – 30 сентября составило  $7,16 \pm 11,1 \text{ см}^{-3}$ , а массовая концентрации  $M_A - 1,66 \pm 2,86 \text{ мкг} \times \text{м}^{-3}$ .

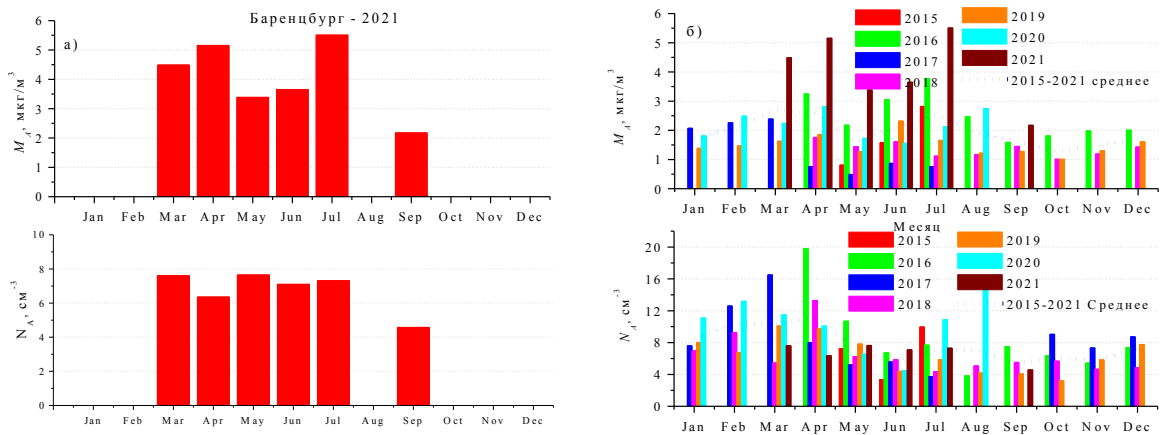


Рисунок 1.2 – Среднемесячные значения массовых (вверху) и счетных (внизу) концентраций аэрозоля в Баренцбурге (а) 2020-2021 гг.; (б) 2015-2021 гг.

### Характеристики изменчивости АОТ и влагосодержания атмосферы

В текущем году наблюдалась достаточно стабильная и высокая спектральная прозрачность толщи атмосферы. Впервые с 2014 г. значения  $\tau_{0.5}^a$  не превышали величину 0,2. Среднегодовое значение оказалось самым низким за период наблюдений АОТ в Баренцбурге (с 2011 г.):  $\bar{\tau}_{0.5}^a = 0,067 \pm 0,006$  (рис. 1.3).

Наиболее заметные всплески мелкодисперсной компоненты АОТ (более 0,1) наблюдались 9 и 16 мая. Анализ обратных траекторий движения воздушных масс (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) и спутниковых карт температурных аномалий на поверхности Земли (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) показал, что в эти дни наблюдался вынос дымового аэрозоля. Основные источники дыма 9 мая были расположены на севере Западной Сибири и Якутии (рис. 1.4). Повышение АОТ 16 мая связано, по-видимому, с переносом дымов с юга Западной Сибири (рис.1.5). Несмотря на эти два эпизода, среднемесячные значения  $\bar{\tau}_{0.5}^a$  в 2021 г. оказались ниже средних многолетних значений (Сакерин и др. 2020) на 14%. То есть, 2021 г. отличался меньшим влиянием выносов дымового аэрозоля.

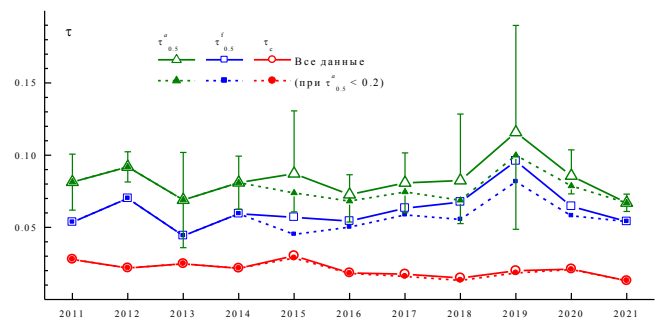


Рисунок 1.3 – Межгодовой ход  $\tau_{0.5}^a$ ,  $\tau_{0.5}^f$ ,  $\tau^c$

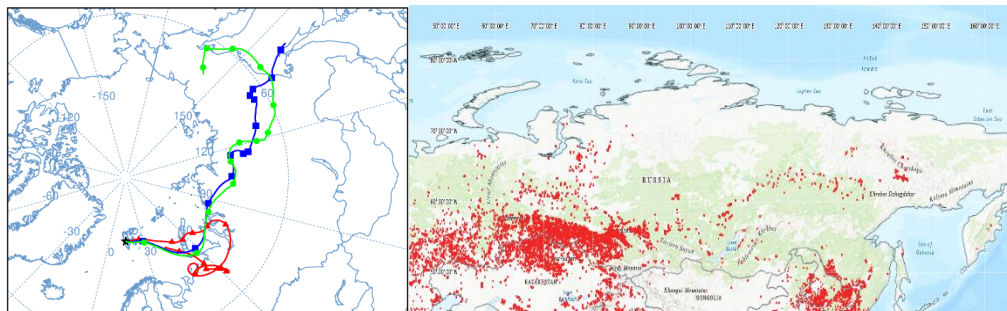


Рисунок 1.4 – Карты обратных траекторий движения воздушных масс с 27 апреля по 9 мая и температурных аномалий (пожаров) в период 30/04–09/05/2021 г.

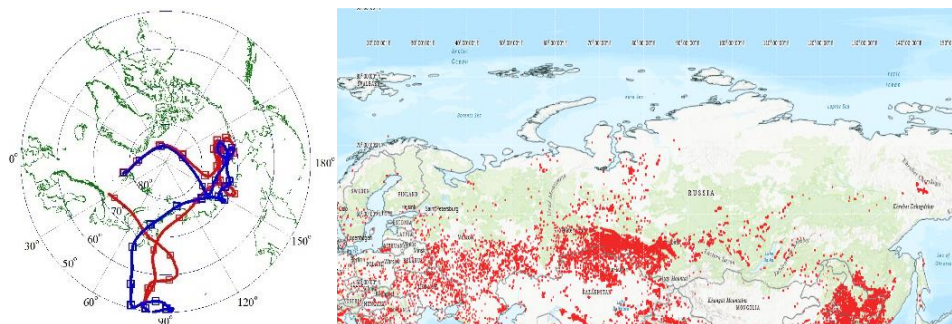


Рисунок 1.5 – Карты обратных траекторий движения воздушных масс с 21 апреля по 16 мая и температурных аномалий (пожаров) в период 24/04–03/05/2021 г.

Динамика влагосодержания, несмотря на межсуточные вариации, в основном, определялась сезонным ходом: увеличение  $W$  от весны к лету и снижение к осени. В качестве особенности 2021 г. можно отметить достаточно высокие, в сравнении с прошлыми годами, значения  $W$  в июне  $\bar{W}=1,07\pm 0,31$  г/см<sup>2</sup> (среднее для 2011-2020 гг.):  $\bar{W}=0,77\pm 0,18$  г/см<sup>2</sup>).

Предварительный анализ данных за период с 1 октября 2020 г. по 30 сентября 2021 г. позволяет сделать следующие выводы о содержании и характеристиках аэрозоля в п. Баренцбург:

- В период измерений АОТ в 2021 г. не было зафиксировано значительных ( $\tau_{0.5}^a > 0,2$ ) всплесков замутнения атмосферы, обусловленных выносом континентального (дымового) аэрозоля. Как следствие, среднегодовое значение ( $\bar{\tau}_{0.5}^a = 0,067$ ) в 2021 г. ниже, чем в предыдущие годы на ~20%.
- Незначительные повышения замутнение атмосферы ( $\bar{\tau}_{0.5}^f > 0,1$ ), наблюдавшиеся 9 и 16 мая 2021 г. были обусловлены выносом дымового аэрозоля с севера Западной Сибири и Якутии и юга Западной Сибири, соответственно.
- Влагосодержание атмосферы в 2021 г., в сравнении с прошлыми годами, отличалась более высокими летними значениями.
- Средние значения (и СКО) концентраций аэрозоля и «сажи» составили:  $N_A$  (AZ-10) =  $6,79 \pm 7,66$  см<sup>-3</sup>,  $N_A$  (Grimm) =  $7,16 \pm 11,1$  см<sup>-3</sup>,  $M_A$  (AZ-10) =  $4,08 \pm 4,37$  мкг×м<sup>-3</sup>,  $M_A$  (Grimm) =  $1,66 \pm 2,86$  мкг×м<sup>-3</sup>,  $M_{BC} = 110 \pm 330$  нг/м<sup>3</sup>.
- Второй сезон подряд в период полярной ночи наблюдаются повышенные значения концентраций сажи: среднее значение  $M_{BC}$  почти в 3 раза выше, чем в период полярного дня. Абсолютный максимум  $M_{BC}$  за отчетный период наблюдался в октябре 2020 г. Минимальные значения  $M_{BC}$ , отмеченные в апреле и в сентябре 2021 г., сопоставимы с абсолютным минимумом за все годы измерений (в мае 2019 г.).
- В годовом ходе счетной концентрации отмечен минимум в сентябре 2021 г.

#### Литература:

Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Результаты исследований общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч.1. Анализ методики и результатов калибровки. - Оптика атмосферы и океана. 1995. т.8. №6, с.852-860.

Кабанов Д.М., Сакерин С.М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосферы и океана. 1997, т. 10, №8, с. 866-874.

Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосферы и океана. 2001. т. 14, № 12, с. 1162-1169.

Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосферы и океана. 2009, Т. 22, №1, с. 61-67.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А. Солнечный фотометр SP-9 для аэрозольного мониторинга // Приборы и техника эксперимента, 2010, №5, с. 165-166.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Круглинский И.А., Лубо-Лесниченко К.Е., Радионов В.Ф., Сидорова О.Р. Сезонная и межгодовая изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в 2011-2019 гг. в Баренцбурге (арх. Шпицберген) // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVI Международного симпозиума. [Электронный ресурс]. Томск: Издательство ИОА СО РАН 2020, с. 418-422.

Турчинович Ю.С., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Программа расчета спектральной аэрозольной толщи и интегрального влагосодержания атмосферы «SPAOTcalc» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014614193 от 17.04.2014. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

### *Экспериментальные исследования теплового баланса и особенностей микроклимата снежно-ледниковых покровов*

Основной целью работ является исследование микроклиматических и теплобалансовых особенностей системы «поверхность ледника – атмосфера». Исследования велись в следующих направлениях:

- Изучение отражательных характеристик поверхности ледника Альдегонда и Западный Грэнфьорд в зависимости от особенностей рельефа и загрязнённости;
- Исследование радиационного баланса поверхности ледника Альдегонда;
- Исследование микроклиматических особенностей ледника Альдегонда.

В ходе выполнения полевых работ были решены следующие задачи:

- Выполнены маршрутные, подспутниковые измерения проходящей и отраженной солнечной радиации над различными типами поверхности ледников и экспериментальные исследования по оценке влияния микро - особенностей рельефа (криоконитов) на отражательные свойства поверхности.
- Осуществлена непрерывная регистрация составляющих радиационного баланса: коротковолновой проходящей и отраженной радиации и ИК-температуры поверхности и атмосферы с помощью теплобалансовой мачты (ТБМ);
- Получены данные о микроклимате ледника с помощью стационарных автоматических метеостанций (АМС) НОВО;
- Проведены специальные сравнительные метеорологические наблюдения за температурой и влажностью воздуха с помощью переносных АМС НОВО, для оценки влияния особенностей поверхности на показания стационарных АМС.

Полевые работы проводились на ледниках Альдегонда и Западный Грэнфьорд в период с 15.07.2021 – 11.09.2021, исполнитель – Прохорова У.В. (отдел взаимодействия океана и атмосферы ААНИИ).

В центральной части ледника Альдегонда была установлена временная ТБМ (рис. 1.6), состоящая из геодезического штатива и горизонтальной панели, на которой были установлены два пиранометра М-80 и два ИК-термометра АРОГЕЕ. Запись информации, поступающей с актинометрических датчиков, осуществлялась с помощью программируемого аналогово-цифрового преобразователя CR1000 Campbell Scientific. Наблюдения проводились в соответствии с РД. Для оценки отражательных свойств поверхности было произведено 13 маршрутных съемок альбедо на леднике Альдегонда (10) и на леднике Западный Грэнфьорд (3) (рис. 1.7).

Данные, получаемые с ТБМ, позволили оценить радиационный баланс в точке установки и в дальнейшем с привлечением модели рельефа и

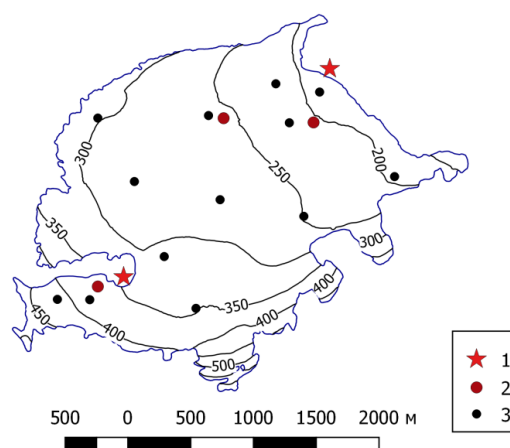


Рисунок 1.6 – Схема расположения оборудования: 1 – стационарные АМС, 2 – ТБМ и переносные АМС, 3 – гляциологические рейки

инсоляции, эти результаты можно экстраполировать на всю поверхность ледника (Прохорова и др. 2021).

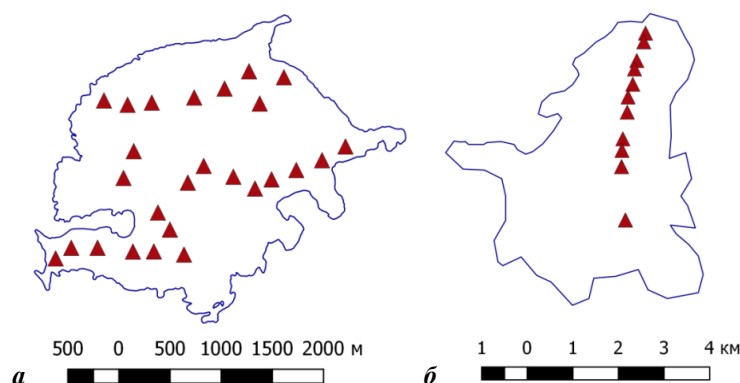


Рисунок 1.7 – Точки маршрутных съемок альbedo на ледниках (а) Альдегонда и (б) Западный Гренфьорд

В 2021 г. максимум приходящей солнечной радиации пришелся на последнюю неделю июля (22/07), а минимум на вторую неделю августа (11/08) (рис. 1.8). Интенсивность приходящей радиации определялась количеством облачности, а также изменением угла падения солнечных лучей в течение летнего сезона. Величина отражённой солнечной радиации определяется приходящим потоком, потому моменты минимумов и максимумов обеих составляющих совпадают. Отношение потоков – альbedo, в точке установки ТБМ изменялось от максимальных значений в начальный период измерений (0,3) до минимальных (0,2) в конце, что обусловлено изменением типа ледниковой поверхности в процессе таяния.

Длинноволновое излучение рассчитывалось по данным ИК-температуры поверхности и атмосферы. Поток нисходящего длинноволнового излучения зависит от облачности и влажности воздуха, поэтому значения максимумов в конце летнего сезона, обусловлены именно влиянием облачности (рис. 1.8).

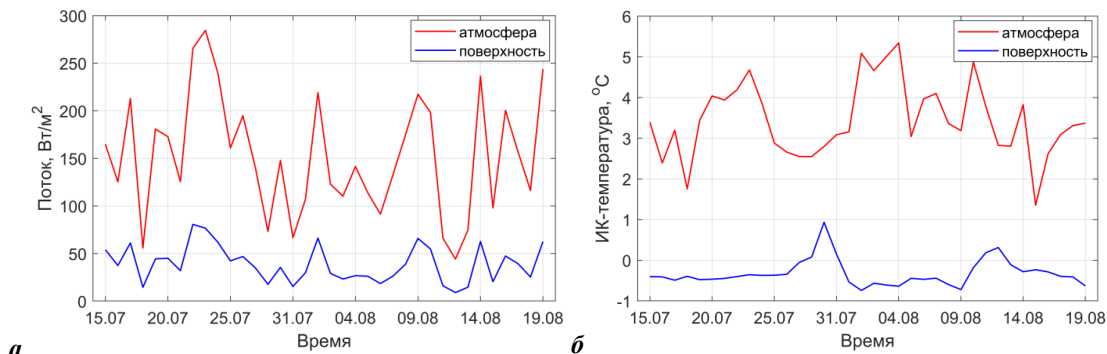


Рисунок 1.8 – Составляющие радиационного баланса поверхности ледника Альдегонда в районе ТБМ: (а) приходящая и отраженная солнечная радиация; (б) ИК-температура поверхности и атмосферы

Съемки альbedo проводились по одинаковым маршрутам, что позволило оценить временную изменчивость этого параметра (рис. 1.9), а также осуществить привязку спутниковых изображений и внести соответствующие поправки на реальные условия.

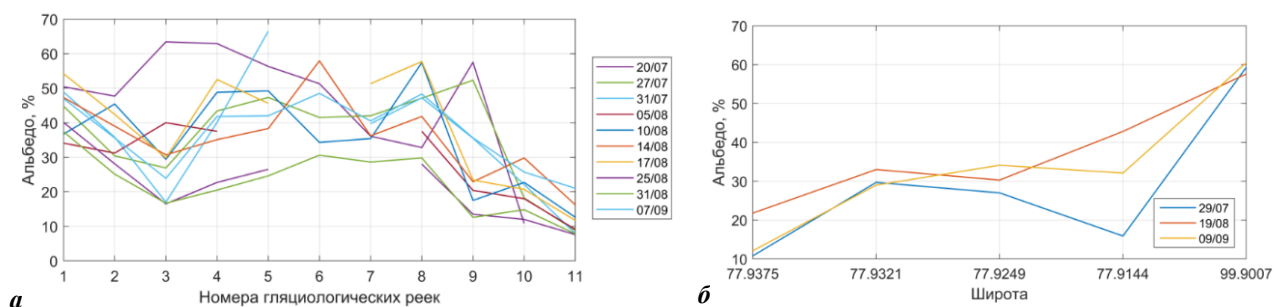


Рисунок 1.9 – Маршрутные профили альbedo за период проведения полевых измерений: (а) ледник Альдегонда и (б) ледник Западный Гренфьорд



Маршрутные съемки альbedo проводились в даты, привязанные к расписанию пролётов спутника Landsat8. По окончании полевых работ были скачаны все спутниковые снимки, по ним были рассчитаны значения отражательной способности ледников. По результатам сравнения данных спутника и маршрутных съемок были рассчитаны поправочные коэффициенты к спутниковым снимкам, которые позволят экстраполировать значения альbedo на всю поверхность ледников Альдегонда и Западный Грэнфьорд.

Исследования влияния подстилающей поверхности на данные автоматических метеорологических станций, установленных в верхней и нижней частях ледника на морене и ригеле, выявили расхождения между данными временной АМС, установленной на леднике (на той же высоте н.у.м.), и стационарной АМС на морене. Разница составила в среднем 1,3°C. На верхней части ледника влияние ригеля не столь ощутимо. Разница в значениях температуры воздуха между временной и постоянной АМС на ригеле составила в среднем 0,3°C. На основе полученных данных рассчитаны поправочные коэффициенты к стационарным АМС для более корректного использования данных при описании микроклиматических особенностей ледника Альдегонда и моделирования. Результаты микроклиматических наблюдений, проводимых на леднике Альдегонда, представлены на рисунке 1.10.

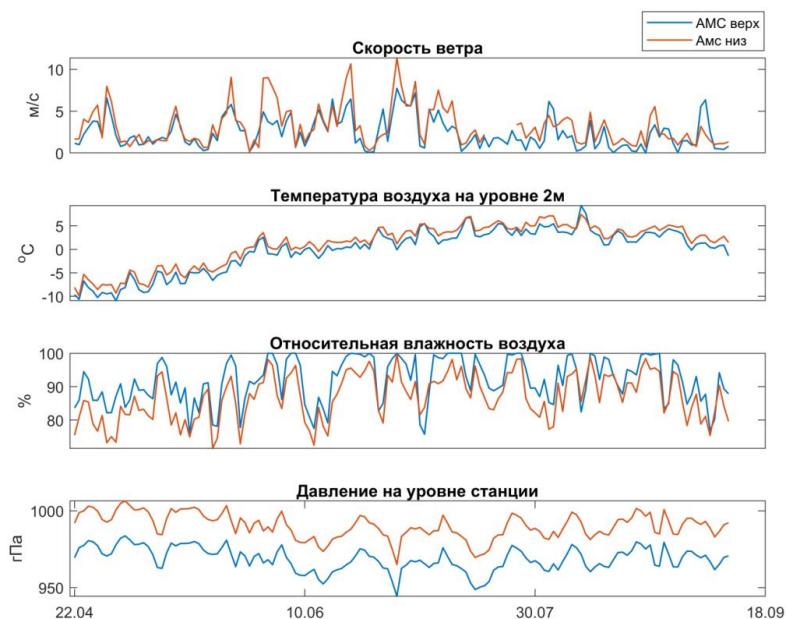


Рисунок 1.10 – Среднесуточные данные АМС, расположенных на ригеле и морене в верхней и нижней части ледника Альдегонда

После критического контроля данные АМС будут размещены на геопортале ААНИИ, а метеоданные – на портале RiS (Research in Svalbard) в раздел проекта №1083 «Organization and conducting of microclimatic observation on the glacier of Aldegonda 2015-2021» (<http://www.researchinsvalbard.no/project/8532>).

По результатам исследований опубликована статья:

Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли, 2021. Т. 25, № 3, с. 50-60 DOI: 10.15372/KZ20210305 <https://www.sibran.ru>

*Совершенствование описания процессов взаимодействия пограничного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью*

Целью работ на Западном Шпицбергене в 2020 г. явилось продолжение начатых в 2017 г. экспериментальных и теоретических исследований физических процессов энерго- и массообмена атмосферы с подстилающей поверхностью, определяющих промерзание/протаивание природных сред.

В 2021 г. выполнялись следующие задачи:

- Измерения характеристик атмосферы и подстилающей поверхности градиентным метеорологическим комплексом Campbell Scientific, установленным на криосферном полигоне;

- Изучение толщины ледяного и снежного покрова озера Линне для дальнейшей верификации модельных расчетов;
- Обработка данных и моделирование термодинамической эволюции снежно-ледяного покрова озера Стемме (Западный Шпицберген) на основе полученных в 2018-2019 г. натуральных данных.

В течение всего 2021 г. продолжались наблюдения с помощью установленного в 2017 г. в п. Баренцбург градиентного метеорологического комплекса Campbell Scientific (CS), оснащенного аппаратурой, обеспечивающей ежеминутную регистрацию атмосферного давления ( $P$ ), температуры ( $T_a$ ) и относительной влажности ( $RH_a$ ) воздуха на высотах 2 и 8 м, скорости ветра ( $V$ ) на высотах 2 и 10 м, составляющих радиационного баланса подстилающей поверхности (приходящей  $Q_{dn}$  и отраженной  $Q_{up}$  коротковолновой солнечной радиации, длинноволнового излучения атмосферы  $R_{dn}$  и подстилающей поверхности  $R_{up}$ ) и потока тепла в почве на глубине 10 см ( $F$ ), высоты снежного покрова, радиационной температуры подстилающей поверхности, температуры деятельного слоя грунта до глубины 0,5 м и растительного и снежного покрова до высоты 0,5 м. Данные с метеорологического комплекса проходят стадию обработки и подготовки для дальнейшего анализа.

Картирование снежно-ледяной толщи оз. Линне выполнялось в апреле методом георадарной съёмки с антенной 500 МГц совместно с прямыми измерениями толщины снежно-ледяной тощи и позволила оценить мощность льда и снега на всей доступной акватории озера (рис. 1.11). Полученные значения глубин будут использованы в качестве контрольных данных при моделировании эволюции снежно-ледяного покрова пресноводных водоёмов архипелага Шпицберген.

Исследование влияния меняющихся атмосферных условий на формирование и эволюцию снежно-ледяного покрова озера Стемме было начато в 2019 г. Особое внимание при этом уделялось образованию инфильтрационного (водно-снежного или снежного) льда на его поверхности - достаточно распространенному, но малоизученному явлению на акватории внутренних водоёмов архипелага Шпицберген.

Наличие непрерывных рядов метеонаблюдений позволяют рассчитать основные параметры зимней эволюции озёрного льда методами математического моделирования (Leppäranta 2015). Для этой цели применялась квазистационарная термодинамическая модель плавающего снежно-ледяного покрова (Булдович 2001), учитывающая возможность как конжеляционного (кристаллического), так и изостатического (инфильтрационного) льдообразования. В целях упрощения температура верхней границы системы в модели принимается равной температуре воздуха, нижней – температуре замерзания воды; уплотнением снега при пропитке водой и её капиллярным поднятием пренебрегается. Критическая, для начала процесса инфильтрации, высота снега  $h_s^*$  определяется из условия (Чижов, 1990).

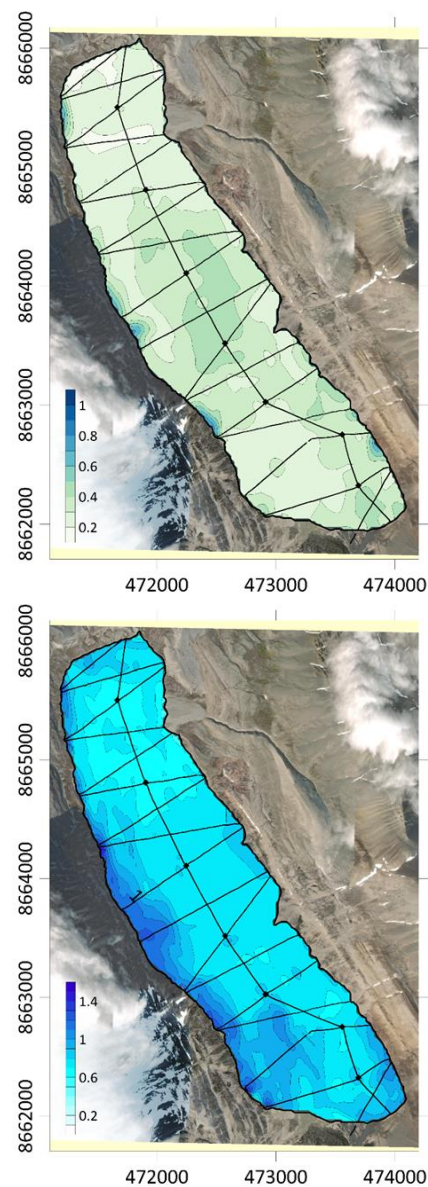


Рисунок 1.11 – Толщина снежного (вверху) и ледяного (внизу) слоёв в метрах на оз. Линне по данным георадиолокационной съёмки

$$h_s^*/h_i = (\rho_w - \rho_i)/\rho_s \cdot \quad (1)$$

Уравнения баланса тепла и массы имеют вид для конжеляционного

$$L\rho_i \frac{dh_i}{dt} = \frac{T}{h_s/k_s + h_i/k_i}, \quad (2)$$

и изостатического льдообразования

$$(\alpha + 1)L\rho_i \frac{dh_i}{dt} + L(\rho_i - \rho_s) \frac{dh_{si}}{dt} = \frac{\alpha T k_i}{h_i^{tot}}, \quad (3)$$

$$\frac{d(h_s \rho_s)}{dt} = (\rho_w - \rho_i) \frac{dh_i^{tot}}{dt}, \quad (4)$$

где  $T$  – температура воздуха;  $t$  – время;  $L$  – скрытая теплота льдообразования;  $\alpha = k_s \rho_s / k_i (\rho_w - \rho_i)$ ;  $\rho_s, \rho_i, \rho_w$  и  $k_s, k_i, k_w$  – плотности и теплопроводности снега, льда и воды, соответственно;  $h_i^{tot} = h_i + h_{si}$  – мощность ледяного покрова,  $h_i$  и  $h_{si}$  – толщины кристаллического и инфильтрационного (снежного) льда, соответственно.

Расчёты по модели (1)-(4) проводились для зимних периодов 2019-2020 и 2020-2021 гг., начало которых определялось по устойчивому переходу среднесуточной температуры воздуха через 0°C, окончание – по началу таяния снежно-ледяного покрова. В качестве атмосферного форсинга использовались осредненные по суткам величины температуры воздуха. Необходимая метеорологическая высота снега  $h_s^{met} = h_s + h_{si}$  рассчитывалась путём суммирования высоты твёрдых осадков на каждые сутки с коэффициентами потерь и снеготаяния в период оттепелей по данным измерений на озере и стандартных наблюдений метеостанции Баренцбург ([http://rp5.ru/archive.php?wmo\\_id=20107](http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=20107)) по алгоритму (Хаустов и др. 2018). Динамика плотности и коэффициент теплопроводности снега рассчитывались по упрощённым эмпирическим зависимостям  $\rho_s = 190 \exp(0,00112 t)$  (Gold 1958) и  $k_s = 10^{-3} \rho_s$  (Павлов 2008). Коэффициент теплопроводности и теплота плавления льда полагались постоянными и равными 2,22 Вт/(м°C) и  $3,33 \cdot 10^5$  Дж/кг, соответственно.

Вычисления показали, что при снежном льдообразовании динамика толщин системы, определяемая условиями статического равновесия, зависит от толщины и плотности снега и льда, темпы нарастания которого сверху и снизу определяются термическим сопротивлением снежного покрова. Таким образом, в системе функционирует обратная связь между процессом теплопереноса, обеспечивающая прирост ледяного покрова снизу и сверху и уменьшение высоты снега за счёт перехода его части в лёд, и скоростью снегонакопления, регулирующая интенсивность изостатического льдообразования и чувствительная к изменениям теплофизическим свойств составляющих её слоёв.

Наряду с плотностью снега, важную роль в сроках начала затопления льда, определяемых условием равенства нулю разности метеорологической и критической высоты снега  $\Delta h_s$ , играет плотность льда, обусловленная текстурой ледяного покрова. При её изменениях от 840 до 920 кг/м<sup>3</sup> (Донченко 1987) рост снежного льда за счёт уменьшения грузоподъёмности более плотного ледяного покрова для метеоусловий зимы 2019-2020 гг. начинается на 65 сут. раньше, на 95, а не 160 сут. с начала конжеляционного льдообразования (рис. 1.12а). При средней плотности льда 880 кг/м<sup>3</sup> погружение льда началось с резким увеличением высоты снега на 140 сут. (рис. 1.12б). С этого момента из-за постоянного равенства нулю температуры нижней поверхности кристаллического льда, изменение температуры верхней от нуля до некоторой отрицательной величины при непрерывном снегонакоплении, обеспечивал непрерывный рост всех слоёв системы (рис. 1.12в). Расчёты показали, что приращение льда на обеих границах происходило примерно

одинаково, хотя сверху несколько медленнее, за исключением короткого периода между 165 и 174 сут., обусловленного скачкообразным увеличением высоты снега (рис. 1.12г).

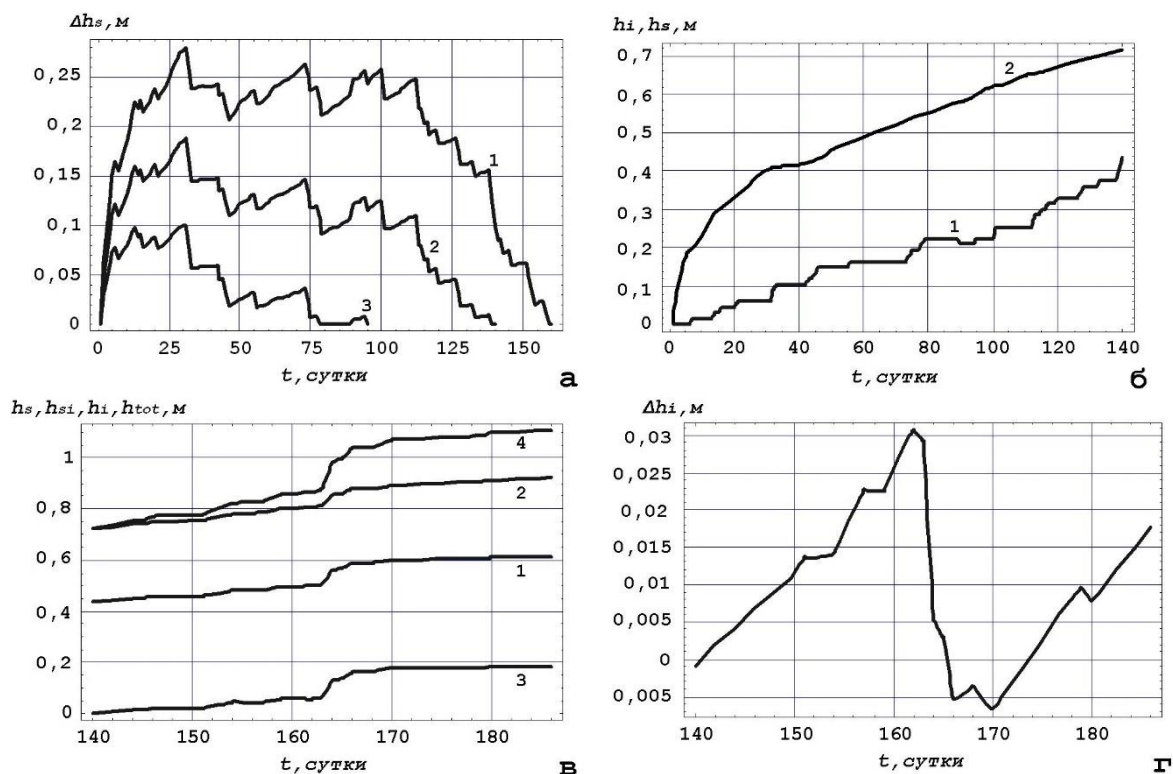


Рисунок 1.12 – Модельные оценки изменения разности толщин снега для плотностей льда 920 (1), 880 (2) и 840 (3)  $\text{кг/м}^3$  (а), толщин снега (1) и льда (2) до начала изостатического льдообразования (б), толщины снежного льда (1), высоты снега на льду (2) и на берегу (3), мощности кристаллического льда (4) и ледяного покрова (5) (в) и разности приращения льда на нижней и верхней границах (г) для атмосферных условий зимы 2019-2020 гг. и плотности льда 880  $\text{кг/м}^3$ . «0» на оси абсцисс соответствует началу льдообразования (10 октября 2019 г.)

Согласно результатам расчётов для двух последних зим, мощности снежного льда и снега близки друг к другу и достигают первых десятков сантиметров при толщине кристаллического льда порядка одного метра. Следует, однако, учитывать, что замерзание озёр является сложным процессом, характер которого может существенно различаться в зависимости от гидрологических и погодных условий от года к году не только по количественным, но и по качественным показателям. Это неминуемо приведёт к межгодовой изменчивости темпов нарастания и основных характеристик снежно-ледяного покрова.

По-видимому, в зависимости от мощности и температуры многолетнемерзлой толщи на территории, окружающей водоём, здесь располагается субаквальный талик, существование которого подтверждается направленным вверх потоком тепла. При этом происхождение озера, обязанное разгрузке подземных вод, не исключает возможности повышения подземного питания, связанного с возникновением криогенного напора, характерного для водоёмов криолитозоны (Булдович 2001), частично восполняющего расход.

Полученные оценки соответствуют данным радиолокационных измерений, выполненным сотрудниками сезонного состава РАЭ-Ш под руководством А.Л. Борисика, хотя и несколько занижают толщину снежного льда и завышают мощность снега и кристаллического льда. Основной причиной расхождений, помимо радиационного прогрева и внутреннего таяния ледяного покрова, является, прежде всего, принятое допущение о равенстве плотностей снега и шуги. Другой причиной, по-видимому, стало занижение плотности снега ( $190 \text{ кг/м}^3$  в начале льдообразования и  $237 \text{ кг/м}^3$  в конце) формулой (Gold 1958), рассматриваемого, с вычислительной точки зрения, как однослойная среда. В действительности, влияние внешних воздействий (ветра, оттепели, выпадения жидких и



твёрдых осадков) и процессов метаморфизма формирует плоскопараллельную структуру снежного покрова с различными физическими свойствами отдельных прослоек. На плотность снега на озере сильнее влияет ветер и из-за большей температуры на границе со льдом, чем с грунтом, он проходит ускоренную перекристаллизацию в глубинную изморозь (Павлов и др. 1987). Поэтому снежный покров арктических озёр, за исключением вдольбереговой зоны акватории, обычно имеет меньшую высоту, водный эквивалент и большую плотность по сравнению со снежным покровом суши, а его теплоизоляционная способность составляет около половины наземного (Sturm and Liston 2003). На плотность льда и снега могут влиять не поддающийся учёту тип осадков в период оттепелей, выпадение снега в воду до начала льдообразования, его скопления в сугробах на берегу и т.д. Эти эффекты делают невозможным моделирование процесса снежного льдообразования в рамках чисто тепловых задач и, следовательно, лучшее согласование его измеренных и рассчитанных характеристик.

В целом, результаты моделирования показали, что формирование и эволюция ледяного покрова оз. Стемме происходит в результате совместного действия механизмов конжеляционного и изостатического льдообразования при наличии выраженного уровня режима водоёма. В условиях интенсивного выпадения зимних осадков последнее может вносить существенный вклад в тепловой и массовый баланс снежно-ледяного покрова озёра и его донных отложений, который должен учитываться при его моделировании.

Несмотря на упрощённую постановку задачи, термодинамическая модель (1)-(4) удовлетворительно воспроизводит зимнюю эволюцию ледяного покрова оз. Стемме на качественном уровне. Её усовершенствование связано с использованием новых параметризаций теплофизических характеристик снега и снежного льда, учитывающих специфику фенологических процессов. Модифицированная модель будет использоваться для изучения расчётов льдообразования на других пресноводных водоёмах побережья и островов арктических архипелагов.

По результатам исследований опубликована статья:

Богородский П.В., Кустов В.Ю., Мовчан В.В., Ермохина К.А. Возникновение термической конвекции в мохово-снежном покрове побережья залива Грэнфьорд (Западный Шпицберген). *Лёд и Снег*, 2021, 61(2), с. 232-240. DOI 10.31857/S2076673421020084

Мероприятие 1 выполнено полностью.

Литература:

Булдович С.Н. Влияние водных покровов на температурный режим поверхности пород / В кн. Основы геокриологии. Ч.4. Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд. МГУ, 2001. С. 75-85.

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.

Павлов А. В. Термический режим озер равнинных районов севера // Криосфера Земли, 1999, т. III, No 3, с. 59-70.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2008. 229 с.

Семенов А.В., Давыдов А.А., Ипатов А.Н. Гидрологическое обследование озера Биенда-Стемме (архипелаг Шпицберген). В сб. Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты, 2003. С. 127- 136.

Хаустов В.А., Ромашова К.В., Хренов А.А. Оценка многолетних изменений максимальных снегозапасов и водоотдачи Северного края России // Сб. тез. Всеросс. научно-практич. конф. «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития РФ». СПб.: РГГМУ, 2019, с. 294–296.

Чижов А.Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 127 с.

Gold L.W. 1958. Changes in a shallow snow cover subject to a temperate climate // *J. Glaciol.* 3: 218–222.

Leppäranta, M. Freezing of lakes and the evolution of their ice cover. Springer-Praxis, Heidelberg, Germany, 2015. P. 301. DOI 10.1007/978-3-642-29081-7

Sturm M., Liston G.E. The snow cover on lakes of the Arctic Coastal Plain of Alaska, U.S.A. // *Journal of Glaciology*, Volume 49. No.166, 2003, pp. 370 – 380.

## Мероприятие 2. Комплексный мониторинг гидрологического цикла и состояния водных объектов архипелага Шпицберген

Гидрологические исследования водных объектов о-ва Западный Шпицберген, проводились в период с 17.04.2021 по 27.09.2021 и продолжили экспедиционные наблюдения ААНИИ, начатые в 2001 году.

Полевые работы выполнялись группой в составе руководителя отряда Ромашовой К.В. и ведущего инженера Василевича И.И. Химический анализ проб выполнялся сотрудником химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш Кириловой А.А.

Районами работ являлись бассейны рек вблизи п. Баренцбург: Грен, Гренфьорд, Бретьерна, Альдегонда, Брюде, Конгресс и Васстак, а также ледники: Восточный и Западный Гренфьорд, Альдегонда и озера: Конгресс, Стемме, Бретьерна (рис. 2.1).

Исследования осуществлялись в три этапа:

– Весенний. Основными целями весенней части гидрологических работ являлись: получение новых данных о распределении снегозапасов на водосборах исследуемых рек и химическом составе снега в рамках изучения изменений гидрометеорологического режима и состояния природной среды архипелага Шпицберген, исследования характера структуры и текстуры залегания снежно-ледяного покрова на водосборах.

– Переходный (весенне-летний) этап включал наблюдения за интенсивностью снеготаяния, испарением с поверхности снега, мониторинг состояния пресноводных объектов в период схода основной массы снегонакоплений, а также подготовку оборудования к летнему этапу.

– Летний. Целью летнего этапа гидрологических экспедиционных исследований являлся комплексный мониторинг гидрологического цикла и состояния водных объектов, проведение специализированных лимнологических наблюдений, включая наблюдения гидрохимических характеристик и элементов водного баланса речных водосборов архипелага Шпицберген.

### *Особенности снегонакопления на водосборах рек и ледниках залива Грэнфьорд*

Производство снегомерных работ и гидролого-гидрохимических наблюдений на озерах о. Западный Шпицберген, а также обработка полученных полевых материалов производилась в соответствии с общепринятыми методиками (Руководство 1958, Кузьмин 1963, Пикор-Лед 2018, Gallet et al. 2018). Однако, с учетом протяженности маршрутов снегомерных съемок, размера, рельефа и других особенностей исследуемых объектов, а также сокращения состава гидрологической группы вследствие пандемии коронавируса, такие регулируемые методиками параметры, как расстояния между точками измерения высоты снежного покрова и точками производства шурфа, были увеличены. Максимальное расстояние между точками измерения высоты снежного покрова не превышало 500 м (против 100 м в стандартных методиках), расстояние между шурфами могло достигать 4 км (против 1 км в стандартных методиках). Часть измерений высоты снежного покрова дублировалась при помощи георадара «Пикор-Лед» в режиме непрерывной записи профиля

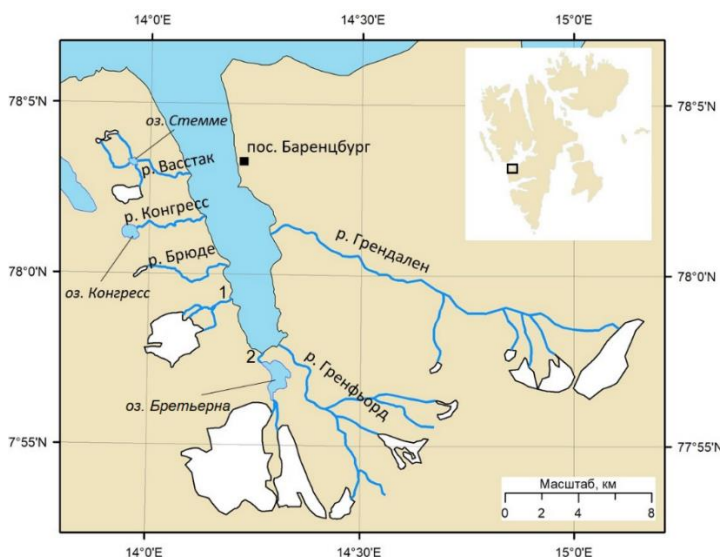


Рисунок 2.1 – Объекты исследований в 2021 г. 1 – р. Альдегонда, 2 – р. Бретьерна

в движении со снегохода с записью GPS координат, маршрут профиля измерения прибором в большинстве случаев совпадал со снегомерным профилем каждого отдельного исследуемого объекта.

По итогам весенних гидрологических работ рассчитан запас воды в снежном покрове на водосборах рек залива Гренфьорд, который напрямую зависит от количества осадков и оттепелей в зимний период. По данным метеостанции «Баренцбург» сумма осадков за зимний период была ниже средней за последние 20 лет на 40 мм. В среднем влагозапас в снежном покрове ледников оказался больше предыдущего года на 50 мм, величина запаса влаги в снежном покрове в долинах рек сопоставима с аналогичной величиной в 2019 г. (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты снегомерной съемки 2021 г.

Объект	Высота снега, см			Средняя плотность снега, г/см <sup>3</sup>	Запас воды в снеге, мм в. э.
	мин	макс	ср		
Ледник Альдегонда	89	255	159	0,38	616
Морена л.Альдегонда	24	231	139	0,36	496
Ледник Восточный Гренфьорд	67	250	140	0,40	558
Ледник Западный Гренфьорд	88	251	155	0,40	620
Долина р. Конгресс	27	217	84	0,34	293
Долина р. Брюде	37	164	92	0,30	281
Долина р. Грен	26	142	81	0,32	312
Долина р. Гренфьорд	42	250	108	0,37	411
Долина р. Васстак	29	250	102	0,28	289

Параллельно стандартным методикам выполнения снегомерной съемки произведено исследование снежного покрова в шурфах, которое позволяет определить вертикальное распределение плотности снежного покрова на водосборе, а также среднюю плотность разных видов снежного покрова на разных видах водосборов. Полученные результаты не значительно отличаются от результатов интегрального определения плотности, особенно при работах на ледниках. Однако на моренах и в долинах рек, где снег преимущественно рыхлый расхождения значительно увеличиваются. Хотя метод послойного определения плотности снежного покрова не требует дополнительных инструментов и физических усилий, он требует в 4-5 раз больше время, затраченного на интегральное определение плотности, и не рационален при рутинных работах.

Часть измерений высоты снежного покрова дублировалась при помощи георадара «Пикор-Лед», позволяющего получать меньшими усилиями больший объем данных о высоте и стратификации снежного покрова на водосборах рек. Несмотря на первый опыт применения в горных долинах и ледниках и трудности GPS-привязки, методика выполнения измерений была отработана до уровня устойчивого получения достоверных результатов. При использовании георадара необходимо учитывать особенности приема GPS-сигнала. Опыт коллег из Института географии РАН (Лаврентьев и др. 2018) показывает также возможность определения плотности снежного покрова с использованием георадара, однако с невысокой точностью. Внедрение георадиолокационной методики в снегомерные работы является перспективной методологической задачей для работ будущих экспедиций.

Химический анализ состава снежного покрова не выявил каких-либо отклонений от средних показателей с 2016 г. Основу минерализации снежного покрова по исследуемым объектам составляют ионы хлора и натрия, отражающие морское влияние.

В 2021 году начаты экспериментальные наблюдения за испарением с поверхности снежного покрова и снеготаянием. Испарение с поверхности снежного покрова составило в среднем 0,5 мм/сут. Рассчитано также снеготаяние посредством прямого измерения и расчета. Разработан протокол проведения наблюдений в условиях Шпицбергена, сформулированы рекомендации для проведения наблюдений в будущем.

### Особенности речного режима на водосборе залива Грэнфьорд

Наблюдения за речным стоком во время выполнения летнего этапа гидрологических работ осуществлялись с момента вскрытия рек и завершились с окончанием сезона навигации. Проведение исследований и обработка полученных полевых материалов производились в соответствии с Наставлением гидрометеорологическим станциям и постам (1972). Отбор и анализ проб воды – в соответствии с Р 52.24.353-2012, ГОСТ 17.1.5.04-81 и ГОСТ 31861-2012.

На гидрологических постах всех исследуемых рек выполнен монтаж и привязка рабочих реперов к высотной системе ГТ «Арктикуголь» с использованием GNSS-приемников, получены их высотные отметки. Выполнены сезонные нивелировки равномерных свай.

Измерения расходов воды и взвешенных наносов реках: Грен, Гренфьорд, Бретьерна, Альдегонда, Брюде, Конгресс и Васстак производились вблизи намеченных в предыдущие годы гидрометрических створов. Применялся сокращенный способ измерения расходов воды методом скорость–площадь. В таблице 2.2 представлены максимальные и минимальные измеренные расходы воды в 2021 году.

Таблица 2.2 – Максимальные и минимальные измеренные расходы воды рек залива Грэнфьорд в 2021 г.

Река	Дата измерения	рН	УЭП, мкСм/см	Расход воды (м <sup>3</sup> /с)	Площадь водн. сечения (м <sup>2</sup> )	Скорость течения (м/с)		Шир. реки (м)	Глубина (м)		Мутн., г/м <sup>3</sup>	Расход взвеш. наносов, кг/с
						ср	макс		ср	макс		
Грен	11.09	7,68	820	0,52	1,80	0,289	0,479	18,3	0,10	0,20	67	0,04
	21.06	6,83	160,4	10,9	13,3	0,820	1,186	46,2	0,29	0,63	698	7,60
Гренфьорд	13.09	7,81	576	0,43	0,99	0,434	0,557	8,3	0,12	0,18	0,38	0,0002
	23.09	7,35	401	9,37	7,86	1,192	1,572	22,8	0,34	0,51	985	9,23
Бретьерна	13.09	8,03	136,2	0,75	1,94	0,39	0,739	9,9	0,20	0,43	0	0,00
	23.09	7,53	106	12,4	12	1,03	1,315	28,5	0,42	0,85	80	0,99
Альдегонда	13.09	7,83	458	0,14	0,49	0,29	0,382	5,1	0,10	0,14	0,18	0,00
	19.07	-	-	2,95	2,47	1,19	1,573	7,2	0,34	0,50	-	-
Брюде	25.09	7,94	252	0,104	0,52	0,20	0,348	6,4	0,08	0,15	0	0,00
	23.06	6,51	104,6	2,33	2,56	0,91	1,461	7	0,37	0,52	34	0,08
Конгресс	09.06	6,34	654	0,32	0,53	0,60	0,813	6,3	0,08	0,22	13,1	0,00
	23.06	6,2	402	2,51	2,61	0,96	1,345	10	0,26	0,37	89	0,22
Васстак	13.09	7,86	448	0,08	0,36	0,22	0,275	5,65	0,06	0,10	0	0,00
	13.07	7,36	118,3	2,25	2,65	0,849	1,12	12,65	0,21	0,37	5	0,01

На всех исследуемых водотоках наблюдается смещение фазы меженного и осенне-паводочного периодов (рис. 2.2). Сроки вскрытия близки к норме последних 5-10 лет. На всех реках фиксировался экстремальный паводок после затяжных ливневых осадков с суточным максимумом 25 мм 19 сентября. Замерзание фиксировано не было из-за чего вычисленные объемы стока могут иметь значительную погрешность.



Рисунок 2.2 – Гидрографы стока рек Бретьерна, Альдегонда, Гренфьорд в 2021 г.

По результатам химического анализа проб речных вод, реки Грен, Гренфьорд, Альдегонда и Конгресс относятся к классу сульфатных вод, группа кальция второго типа (для Альдегонды характерен 3 тип). Реки Бретьерна, Брюде и Васстак относятся к классу гидрокарбонатных вод, группы кальция второго типа.

Углубленное изучение дренажной системы ледника Альдегонда и исследование источников питания одноименной реки не дало достоверных количественных оценок по причине потери уровнемера в одном из притоков после прохождения экстремального паводка. Тем не менее, осуществлен отбор проб воды для определения изотопного состава трех выходов ледниковых вод. Анализ изотопного состава (стабильные изотопы кислорода и водорода) будет проводиться в лаборатории ЛИКОС АНИИ.

#### Особенности режима озер

Наблюдения характеристик озер выполнены дважды в течение полевого сезона и показали, что минерализация исследуемых озер стабильно уменьшается в летний период по причине распреснения вод талым снегом. Водородный показатель слабо изменчив. По результатам химического анализа проб озерных вод, озера Стемме и Бретьерна относятся к гидрокарбонатному классу, группа кальция II типа, воды озера Конгресс к сульфатному классу, группа кальция II типа. Совместно с стандартными работами по зондированию и пробоотбору озерной воды, выполнены батиметрические съемки озер Стемме (рис. 2.3а) и Бретьерна (рис. 2.3б), которые позволили оценить морфометрические характеристики озер, включая площадь зеркала и объем воды в озере на момент съемки (табл. 2.3).

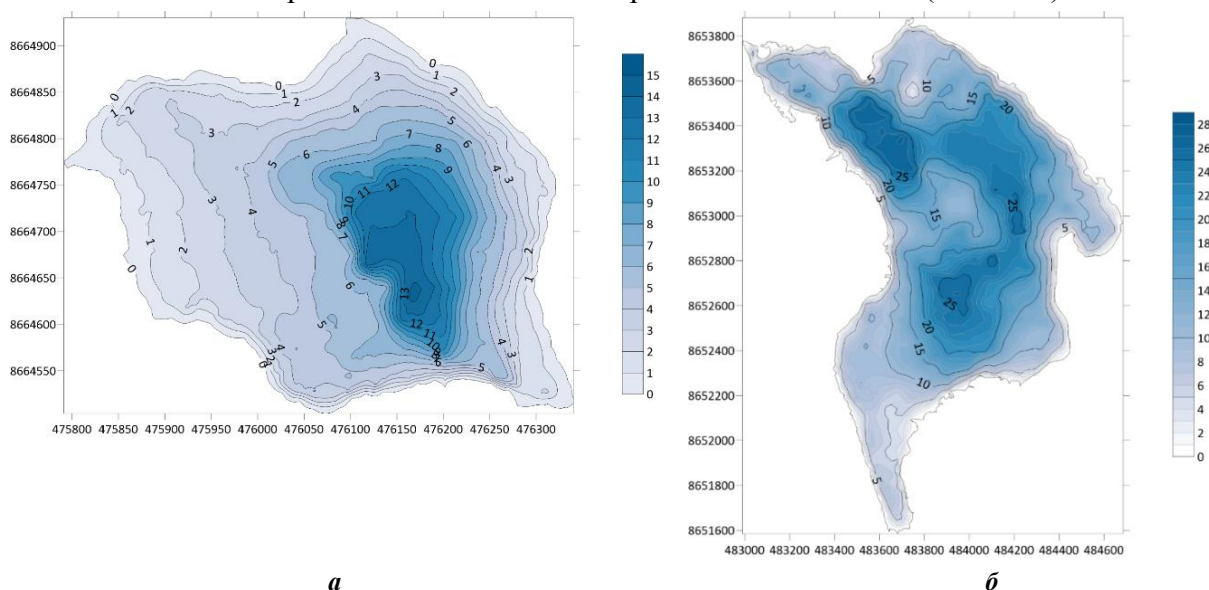


Рисунок 2.3 – Карты глубин озер Стемме 22.07.2021 (а) и Бретьерна 09.10.2021 (б)

Таблица 2.3 – Морфометрические характеристики озер Стемме (22.07.2021) и Бретьерна (09.10.2021)

Озеро	Глубина, м		Периметр, м	Площадь зеркала, м <sup>2</sup>	Объем, м <sup>3</sup>
	ср	макс			
Стемме	4,6	13,9	1 720	149 000	683 500
Бретьерна	13,8	28	9 108	1 610 000	22 350 000

По результатам исследований на арх. Шпицберген подготовлены статьи и доклады на конференциях:

Котова Е.И., Василевич И.И., Ромашова К.В., Красавина А.С. Состав снежного покрова островов Баренцева и Карского морей // Российская Арктика, 2021. № 15, с. 17–27. DOI 10.24412/2658-4255-2021-4-17-27

Nowak, A., Hodgkins, R., Nikulina, A., Osuch, M., Wawrzyniak, T., Kavan, J., Łepkowska, E., Majerska, M., Romashova, K., Vasilevich, I., Sobota, I., Rachlewicz, G. From land to fjords: The review of Svalbard hydrology from 1970 to 2019 (SvalHydro). In: Moreno-Ibáñez et al (eds)

SESS report 2020, Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System, Longyearbyen, pp 176-201. DOI 10.5281/zenodo.4294063

Nowak Aga, Hodgins Richard, Nikulina Anna, Osuch Marzena, Wawrzyniak Tomasz, Kavan Jan, Łepkowska Elżbieta, Majerska Marta, Romashova Ksenia, Vasilevich Igor, Sobota Ireneusz, Rachlewicz Grzegorz. What you always wanted to know about hydrological changes in Svalbard, but didn't know how to find out. Svalbard Science Conference 2021. 2-3 November 2021 Oslo.

Мероприятие 2 выполнено полностью, полевые исследования незначительно сокращены.

Литература:

ГОСТ 17.1.5.04-81 Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 6 с.

ГОСТ 31861-2012 Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартиформ, 2013. 36 с.

Кузьмин П.П. Метод контрольной (нормальной) снегосъемки// Труды ЗакНИГМИ, вып.13, 1963.

Лаврентьев И.И., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Мацковский В.В., Муравьев А.Я. Запасы льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) и их изменения за последние десятилетия // Лёд и Снег, 2019. 59(1), с. 23-38. DOI 10.15356/2076-6734-2019-1-23-38

Многофункциональный контрольно-измерительный прибор Пикор-Лед: Руководство по эксплуатации. URL: <http://uwbs.ru/texpodderzhka/> (дата обращения 08.01.2018).

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Часть II. Гидрологические наблюдения и работы на малых реках. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. 266 с.

Р 52.24.353-2012. Рекомендации. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. – Ростов-на-Дону, 2012. 36 с.

Руководство по снегомерным работам в горах - изд.: Гидрометеоздат, 1958.

Gallet, J. C., Björkman, M. P., Larose, C., Luks, B., Martma, T., Zdanowicz, C. Protocols and recommendations for the measurement of snow physical properties, and sampling of snow for black carbon, water isotopes, major ions and microorganisms., Norwegian Polar Institute, 2018.

### **Мероприятие 3. Мониторинг океанографических условий на внутренних акваториях архипелага Шпицберген**

Основная цель исследований – выявление закономерностей флуктуаций Западно-Шпицбергенской ветви Норвежского течения, как индикатора изменчивости поступления тепла в Северный Ледовитый океан на основе исследования вариации залива атлантических вод в заливы архипелага Шпицберген, совершенствование существующих представлений о механизмах формирования и развития мезомасштабных океанологических процессов в прибрежных водах архипелага. В рамках проведённых исследований решались задачи, связанные с получением новых данных о распределении океанографических характеристик в акваториях заливов о-ва Западный Шпицберген и их анализом. В 2021 г. работы выполнялись по направлениям:

– Термохалинное профилирование заливов Грэнфьорд, Диксонфьорд и Исфьорд в весенний период (18.03 – 06.04.2021).

– Термохалинное профилирование заливов Грэнфьорд, Биллефьорд и Исфьорд в осенний период (25.09 – 09.10.2021).

– Постановка притопленных буйковых станций в заливе Исфьорд (02.10.2021 и 04.10.2021).

Полевые работы выполняли в.н.с. зав. отделом океанологии Фильчук К.В., м.н.с. отдела океанологии Рыжов И.В., сотрудники зимовочного состава РАЭ-Ш Новиков А.Л., Бакланов А.В., Солодков С.Г. Аналитическая обработка материалов океанографических исследований выполнена м.н.с. отдела океанологии Блошкиной Е.В.

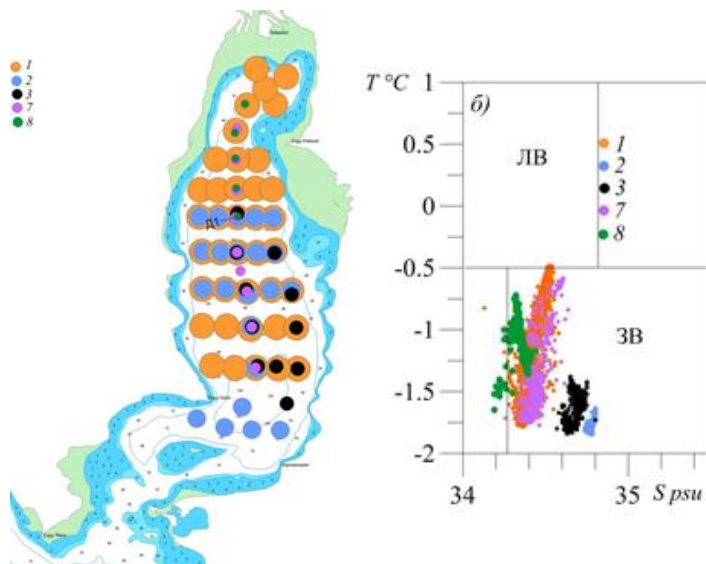


### Термохалинные характеристики вод заливов системы Исфьорда в весенний период

Условно по особенностям распределения термохалинных характеристик в весенний период исследуемые фьорды можно разделить на два типа. Фьорды первого типа (Диксонфьорд), не подвержены влиянию вод атлантического происхождения (АВ). Для Диксонфьорда это в первую очередь связано с его удаленностью от источника поступления АВ (трансформированной АВ – ТАВ) (горло Исфьорда).

В Диксонфьорде весной ежегодно наблюдается только одна водная масса – зимняя охлажденная вода (ЗВ), формирующаяся непосредственно внутри фьорда в результате процессов осенне-зимней конвекции и процессов ледообразования, характеризующаяся отрицательными значениями температуры и солёностью выше 34,3‰. Расположение точек на TS-диаграмме (рис. 3.1) позволяет сделать вывод, что для этого фьорда в весенний период характерным является квази-однородное распределение температуры и солёности по вертикали. В весенние месяцы для вод Диксонфьорда характерны отрицательные значения температуры поверхностного слоя. Межгодовая изменчивость солёности в нём незначительна: от 34,33 до 34,75‰. Теплосодержание поверхностного слоя мало, что связано с близостью значения температуры воды к температуре замерзания при данной солёности.

Ко второму типу относятся фьорды, находящиеся под влиянием вод атлантического происхождения — Исфьорд и Грэнфьорд. Для них характерна межгодовая изменчивость водных масс, преобладающих в весенний период (рис. 3.2).



1 – апрель 2012 г, 2 – апрель 2013 г, 3 – апрель 2014 г., 7 – март 2020 г., 8 – март 2021 г.

Рисунок 3.1 – Положение океанографических станций в Диксонфьорде (слева) и TS-диаграмма по данным измерений (справа)

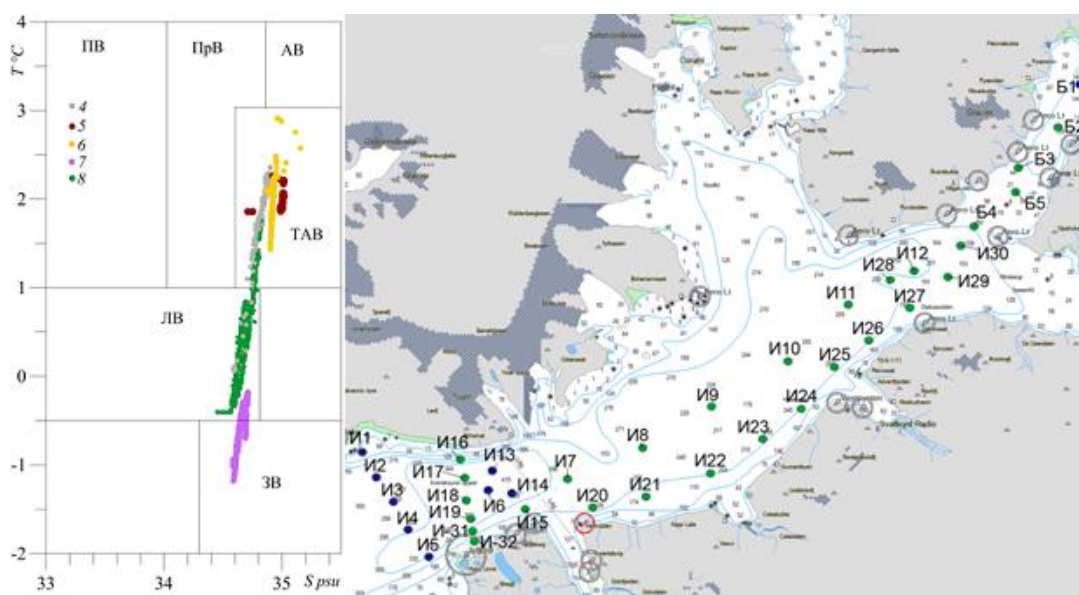


Рисунок 3.2 – Положение океанографических станций в Исфьорде и Биллефьорде (справа) и TS-диаграмма по данным измерений (слева)

На карте зеленым показаны точки, в которых были выполнены измерения в 2021 г.

- 4 – март 2016 г.
- 5 – март 2017 г.
- 6 – май 2019 г.
- 7 – март 2020 г.
- 8 – март – апрель 2021 г.

В 2017 и 2019 гг. в районе горла Исфьорда (точка И15) преобладали водные массы атлантического происхождения, вертикальное распределение температуры (выше 1,5°C) и солёности (выше 34,9‰) было квазиоднородным от поверхности до дна. В марте 2021 г. в точке И15 верхний слой занимала локальная водная масса – ЛВ (от поверхности до глубины 60 м), под ней была зарегистрирована ТАВ. Схожая ситуация наблюдалась в этой точке и весной 2016 г., при этом в соседних точках И13-И14 ЛВ отсутствовала. В них также наблюдалось гомогенное распределение термохалинных характеристик по вертикали. Поэтому можно предположить, что и в 2021 г. к северу от И15 распределение температуры и солёности от поверхности до дна было другим.

По результатам расчёта характеристик поверхностного слоя в Исфьорде самыми тёплыми стали март 2017 г. и май 2019 г., что связано с тем, что фьорд были заполнены водами атлантического происхождения. Значения температуры и солёности весной 2021 г. в точке И15 были близки к значениям весны 2016 г. В целом, в весенние месяцы для Исфьорда характерны более высокие средние значения температуры, солёности и теплосодержания поверхностного слоя по сравнению с Диксонфьордом.

#### *Термохалинные характеристики вод заливов системы Исфьорд в осенний период*

Съёмки вдоль оси Биллефьорда в летний период выполнялись ежегодно с 2014 г. по 2021 г., за исключением 2015 г. На основе измерений были рассчитаны средние вертикальные профили для фьорда за каждый год. Распределение термохалинных характеристик во фьорде осенью 2021 г. было типичным для этого сезона. Наблюдались 4 водные массы: поверхностная – ПВ, промежуточная – ПрВ, ЛВ и ЗВ. От глубины 40 м до дна располагались водные массы, формирующимися здесь в осенне-зимний период: ЛВ (40-50 м) и ЗВ (50 м – дно). Для Биллефьорда помимо средних значений температуры, солёности и теплосодержания было рассчитано содержание пресных вод. В 2021 г. содержание пресных вод составляло 1,3 м. В остальные годы, за исключением 2014 г., оно варьировалось от 0,7 м (2019 г.) до 1,8 м (2016 и 2018 гг.). Важно отметить, что ежегодные съёмки в Биллефьорде проводились в разные месяцы: от июня, когда поверхностный слой еще достаточно не прогрелся, а ледники только начинают таять, до октября, когда уже начинается процесс охлаждения залива и материковый сток уменьшается. Поэтому в данном случае сложно интерпретировать средние значения характеристик поверхностного слоя с точки зрения межгодовой изменчивости, так как они включают в себя особенности сезонного цикла.

Летние съёмки в Исфьорде проводились ежегодно с 2014 по 2021 гг. Осенью 2021 г. в Исфьорде были зарегистрированы 4 водные массы: ПВ, ПрВ, ТАВ и ЛВ (рис. 3.3). При этом ТАВ наблюдалась только в районах, прилегающих к горлу фьорда, не проникая в его внутренние части. ЛВ присутствовала в небольших объёмах. В среднем температура вод Исфьорда в 2021 г. изменялась от –0,5 до 3,5 °C, солёность была выше 33‰.

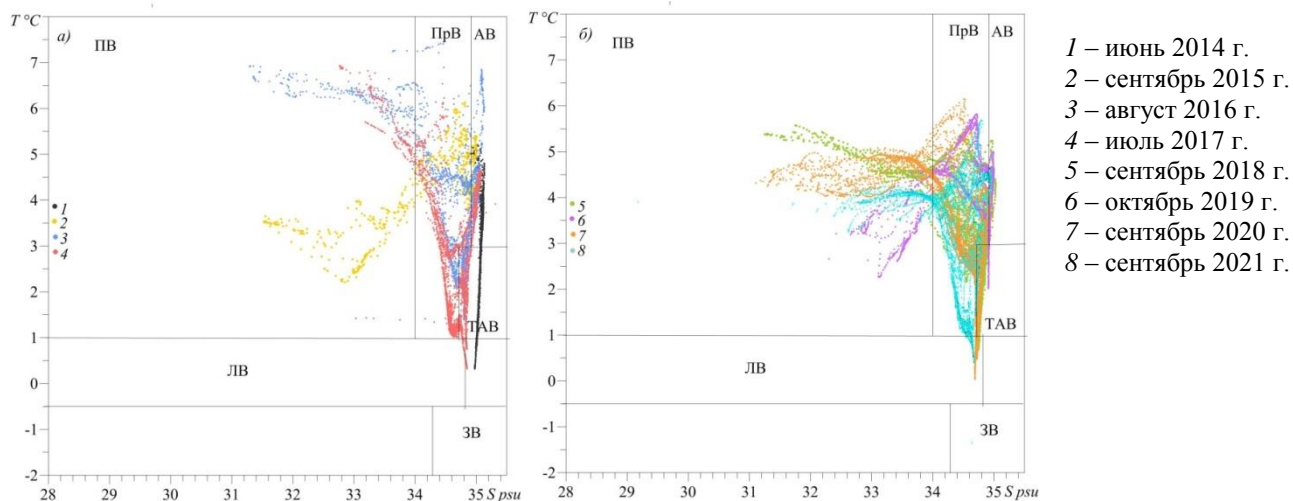
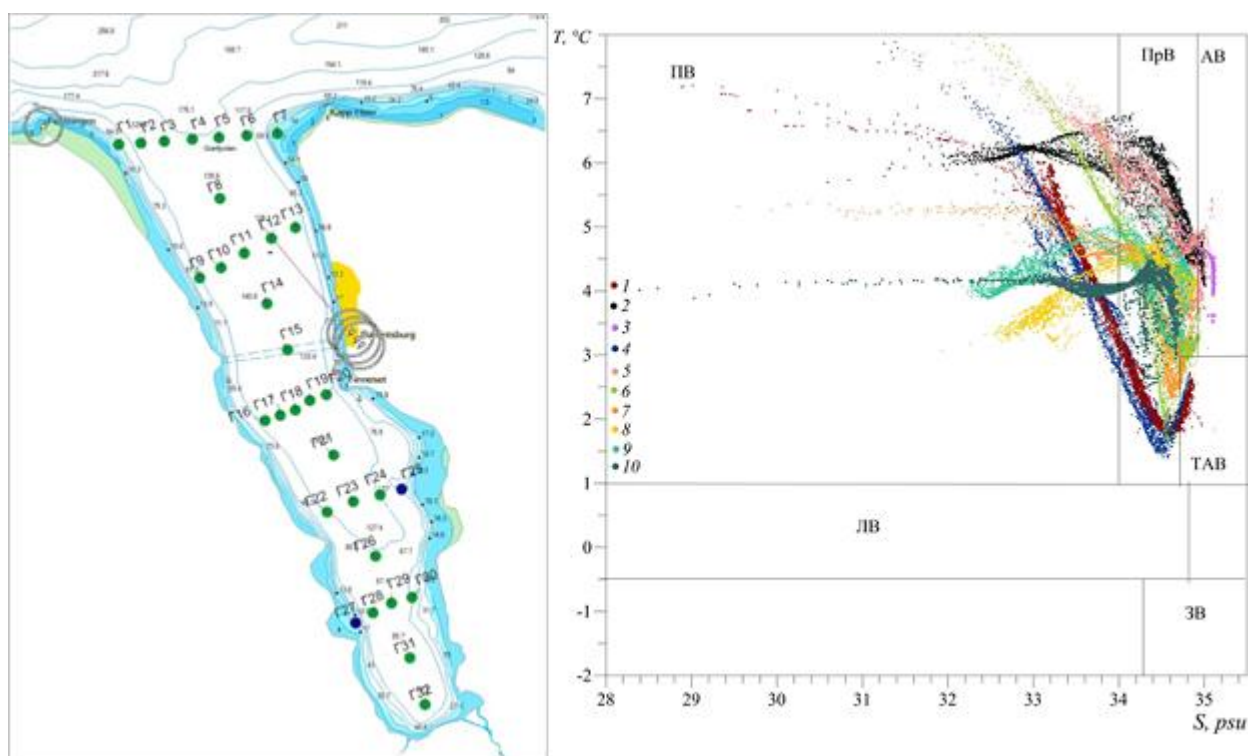


Рисунок 3.3 – TS-диаграммы для станций, выполненных в Исфьорде



Средние значения температуры и солёности поверхностного слоя составили  $3,94^{\circ}\text{C}$  и  $33,25\text{‰}$ , соответственно, что наиболее близко к показателям октября 2019 г. Максимальные значения средней солёности  $35,02\text{‰}$  – верхнего слоя 3-20 м в Исфьорде были зафиксированы в 2014 г. Также, как и в Биллефьорде, содержание пресных вод в 2014 г. было 0 м. В остальные годы их содержание изменялось в пределах от 0,4 до 1,0 м, в 2021 г. оно составило 0,85 м.

В Грэнфьорде летние съёмки, покрывающие всю акваторию фьорда, выполнялись ежегодно с 2012 по 2021 г. По результатам съёмки в сентябре 2021 г. во фьорде были зафиксированы только 2 водные массы ПВ и ПрВ, воды атлантического происхождения не наблюдались (рис. 3.4). Для точек Г14 и Г29, измерения в которых производились ежегодно за исключением 2014 г., были построены вертикальные профили термохалинных характеристик. Для 2021 г. в этих точках характерным являлось квазиоднородное распределение температуры по вертикали от поверхности до дна (около  $4^{\circ}\text{C}$ ). Верхний распределенный слой располагался от поверхности до 5-10 м.



1 — август 2012 г., 2 — сентябрь 2013 г., 3 — июнь 2014 г., 4 — сентябрь 2015 г., 5 — август 2016 г., 6 — июль 2017 г., 7 — сентябрь 2018 г., 8 — октябрь 2019 г., 9 — сентябрь 2020 г., 10 — сентябрь 2021 г.

Рисунок 3.4 – Положение океанографических станций в Грэнфьорде (слева) и TS-диаграмма по данным измерений (справа)

Средние характеристики поверхностного слоя 3-20 м были рассчитаны по результатам измерений в нескольких точках, расположенных вдоль оси Грэнфьорда. В сентябре 2021 г. средние значения температуры и солёности в поверхностном слое были равны  $4,1^{\circ}\text{C}$  и  $33,47\text{‰}$  соответственно. Теплосодержание составило 436 мДж, что близко к показателям за последние 3 года.

В последние два года характерным являлось незначительное присутствие вод атлантического происхождения в Исфьорде по сравнению с 2011-2016 гг. В Грэнфьорде в 2021 г. эти воды вообще не наблюдались, что также является нетипичным. Продолжение данного ряда наблюдений позволит ответить на вопрос: наблюдаемое в последние два года снижение доли вод атлантического происхождения во фьордах — это небольшая аномалия или новая тенденция.

В ходе океанографического зондирования на станциях отбирались образцы морской воды из поверхностного и придонного слоев воды для оценки сезонной динамики компонентов цикла углерода в водах фьордов архипелага. Образцы проанализированы на

содержание различных форм углерода в химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш в п. Баренцбург. Полученные данные анализируются.

### *Постановка притопленных буйковых станций в заливе Исфьорд осенью 2021 г.*

В целях реализации комбинированного подхода, заключающегося в совместном использовании методов непрерывной регистрации гидрофизических параметров на нескольких горизонтах в течение продолжительного периода в реперных точках акватории и выполняемой в режиме рейдовых наблюдений полигонной термохалинной съёмки на сети разрезов в октябре 2021 г. в Исфьорде были установлены две притопленные буйковые станции (ПАБС). Постановка ПАБС была выполнена в соответствии с договорённостями, достигнутыми в ходе совещания «SIOS Workshop on Marine system in Svalbard» 19.11.2020. Специалистами NPI и UNIS в октябре также были установлены две ПАБС (рис. 3.5). Анализ синхронных рядов наблюдений, который планируется выполнить в рамках сотрудничества, позволит уточнить описание условий возникновения, развития и затухания процесса заполнения системы заливов Исфьорда АВ, оказывающего глубокое влияние на структуру и функционирование экосистемы фьордов.



Рисунок 3.5 – Пункты постановки ПАБС в октябре 2021 г.: I-SM, I-SE – станции, установленные UNIS; I-NM, I-NE – станции, установленные ААНИИ

### *Сравнительные испытания автоматизированных средств измерений (совместно с Мурманским УГМС)*

Одной из задач в области методологии океанографических измерений является поддержание испытательного полигона на базе морского поста Гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» для отработки методик выбора, установки и эксплуатации автоматизированных средств измерений совместно с ФГБУ «Мурманское УГМС».

Проанализированные ряды данных с уровнемера Solinst 3001 LT Levellogger Edge M10/F30 и поплавкового мареографа СУМ в 2019 г. показали незначительное расхождение значений уровня моря после поправки на атмосферное давление. В дополнение к уже установленным инструментам в уровнемерном колодце 4 декабря 2020 г. был установлен регистратор гидростатического давления и температуры воды НОВО U20-001-02-Ti производства Onset Computer Corporation (США).

Регистрируемые автономным уровнемерным комплексом Solinst данные передаются в режиме реального времени с использованием специально разработанного программного обеспечения, реализующего функции автоматического опроса датчиков, трансляции по спутниковому каналу связи и ассимиляции информации об уровне моря в пункте установки комплекса. В отчётный период данные в целом стабильно передавались в ААНИИ посредством блока связи автономного комплекса по спутниковому каналу, отдельные пропуски связаны с имевшими место в течение непродолжительного периода перебоями в энергообеспечении уровнемерного поста (май, сентябрь 2021 г.).

Регистратор НОВО был полностью деинсталлирован 08.10.21. Данные измерений были выгружены из прибора посредством предоставляемого производителем программного обеспечения и сохранены в форме таблиц MS Excel. Ряд значений гидростатического

давления, зарегистрированный датчиками измерителя НОВО в период с декабря 2020 г. по октябрь 2021 г., представлен на рис. 3.6.

Уровенные данные, полученные с использованием приборов Solinst и НОВО, прошли стадию предварительного контроля и подготовлены к сравнительному анализу. По получении от ФГБУ «Мурманское УГМС» после соответствующего согласования синхронных рядов значений уровня моря, зарегистрированных мареографом СУМ, и атмосферного давления с АМК ГМО «Баренцбург», необходимых для введения барокомпенсации, будет выполнен постпроцессинг с целью исследования инерционных характеристик сенсорных блоков уровнемеров и мареографа, определения значений и выявления причин взаимной невязки регистрируемых значений. В дальнейшем планируется привлечение ФГБУ «ГОИН» к анализу результатов с целью выработки рекомендаций по использованию уровнемеров различного типа на наблюдательной сети Росгидромета.

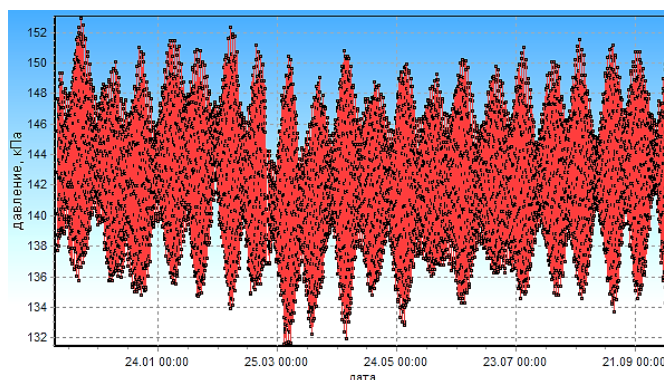


Рисунок 3.6 – Ряд значений гидростатического давления, зарегистрированный прибором НОВО® U20 Water Level Logger в период с декабря 2020 г. по октябрь 2021 г.

По результатам океанографических исследований фьордов опубликована статья:

Bloshkina, E., Pavlov, A.K., Filchuk, K. Warming of Atlantic water in three West Spitsbergen fjords: recent patterns and century-long trends. Polar Research 2021. 40:5392. DOI 10.33265/polar.v40.5392

Мероприятие 3 выполнено полностью. Не проводились факультативные наблюдения реакции ледяного покрова на ветро-волновые воздействия в прикромочной зоне льда для оценки изменений структуры льда и определения характеристик перераспределения энергии волн в прикромочной зоне в сотрудничестве с UNIS и Университетом Мельбурна в связи с невозможностью участия партнеров.

#### **Мероприятие 4. Наблюдения за динамикой баланса массы ледников Западного Шпицбергена**

В 2021 г. сотрудниками ФГБУ «ААНИИ» выполнялись комплексные исследования и наблюдения, нацеленные на определение балансовых характеристик, внутреннего строения ледников Западного Шпицбергена. Задачи полевых гляциологических и георадиолокационных работ заключались в:

- определении бюджета массы, изменений высоты сезонной снеговой линии ледников Альдегонда и Западный Гренфьорд (рис. 4.1),
- определении мощности, термического состояния и изучении подледного ложа ледников Вёринг, Пассфьель, Слакбрин, Восточный Гренфьорд, Эрдман, Фритьоф,
- изучении дренажной сети ледника Альдегонда и поиске возможных подледниковых водоёмов.

Исследования выполнялись с марта по сентябрь 2021 г. в ходе весеннего этапа (Борисик А.Л., Новиков А.Л.) и летне-осеннего этапа (Демидов В.Э., Прохорова У.В.) экспедиционных работ.

##### *Расходная составляющая бюджета массы ледника Альдегонда*

Измерения поверхностной абляции на леднике Альдегонда осуществлялись по сети уровнемерных реек, установленных в сентябре 2020 г. (14 точек), в ходе 13 маршрутов на



ледник с 15 июля по 27 сентября 2021 г. С момента начала наблюдений снег присутствовал на

леднике с абсолютных отметок около 230 м и выше, а затем полностью стаял. Результаты измерений свидетельствуют о неравномерном таянии ледниковой поверхности при соблюдении основной тенденции уменьшения абляции с увеличением высоты. Отклонение от этой зависимости связано с затенением южного правого борта долины. В целом, максимальное таяние на леднике пришлось на вторую половину июля – первую половину августа, как и в предыдущие годы.

Для измерения общих объемов поверхностной абляции в ArcGis с использованием снимков со спутника Sentinel-2 была рассчитана общая площадь ледника Альдегонда и доли площадью его различных высотных уровней (исполнитель А.В. Терехов). Высоты рек были пересчитаны исходя из данных GNSS-топосъемки 2018 г. На основании данных по усредненной абляции в пределах разновысотных уровней, была составлен расчет объемов поверхностной абляции (таблица 4.1). Перевод измеренных значений стаявшего льда в слой воды (мм в.э.) производился путём умножения измеренных значений стаявшего льда (в см) на плотность чистого льда, равной 0,9167 г/см<sup>3</sup>.

Итоговый общий объем абляции на леднике Альдегонда в период с сентября 2020 г. по сентябрь 2021 г. составил 7,98 млн. м<sup>3</sup> в.э. Это в полтора раза меньше, чем за аналогичный период прошлого года, но не выходит за рамки объемов абляции последних лет: 2020 – 12,7 млн. м<sup>3</sup> в.э.; 2019 – 6,72 млн. м<sup>3</sup> в.э.; 2018 – 9,87 млн. м<sup>3</sup> в.э.; 2017 – 10,53 млн. м<sup>3</sup> в.э.

#### *Расходная составляющая бюджета массы ледника Западный Гренфьорд*

Измерения поверхностной абляции на леднике Западный Гренфьорд осуществлялись по сети уровневых рек (5 точек), установленных в сентябре 2020 г., в ходе 5 маршрутов на ледник с 14 июля по 23 сентября 2021 г. Снег на момент начала наблюдений присутствовал на леднике выше абсолютных отметок около 240 м, а затем стаял практически на всей поверхности. Как и на леднике Альдегонда, максимальное таяние на леднике Западный Гренфьорд пришлось на вторую половину июля – первую половину августа. Результаты наблюдений свидетельствуют о четком линейном соблюдении основной тенденции уменьшения абляции при увеличении высоты с коэффициентом зависимости 0,97. Такая упрощенная картина по сравнению с регистрируемым характером абляции на леднике Альдегонда вызвана, в первую очередь, методикой наблюдений – линейным, а не площадным расположением рек. Дополнительный вклад вносит ориентировка ледника Западный Гренфьорд по оси север-юг, исключая затенение с бортов долины средних и нижних высотных уровней. Итогом наблюдений стал расчет суммарного объема поверхностной абляции (табл. 4.2).

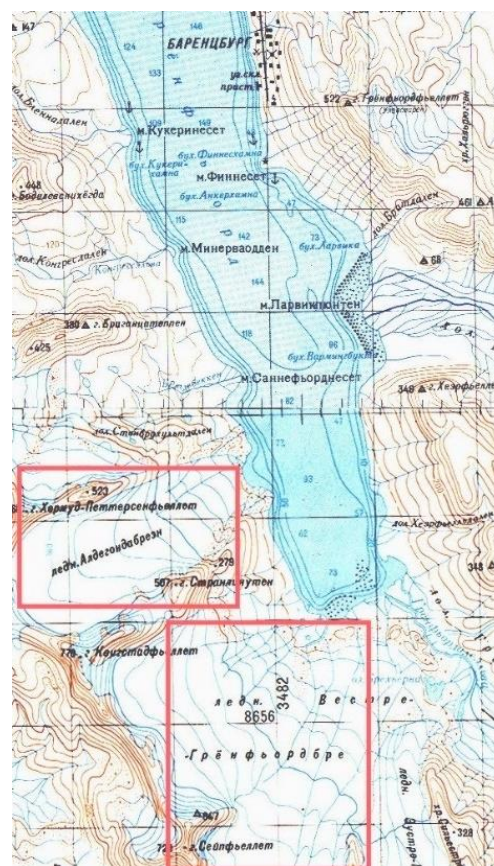


Рисунок 4.1 – Районы проведения гляциологических наблюдений, ледники Западный Гренфьорд и Альдегонда

Таблица 4.1 – Расчётные объёмы поверхностной абляции (W), ледник Альдегонда, 2021 г.

Высота, м	Ср. абляция, мм в.э.	Площадь, км <sup>2</sup>	W, 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> в.э.
100-200	1540	0,591	1,76
200-250	2493	1,104	2,02
250-300	1380	1,994	2,44
300-350	1011	0,909	0,80
350-400	1082	0,574	0,62
400-450	1091	0,298	0,34
>450	1173	0,109	0,00
Сумма		5,579	7,98

Суммарная абляция с сентября 2020 г. по сентябрь 2021 г. составила 14,46 млн. м<sup>3</sup> в.э., что более чем в два раза меньше, чем за аналогичный период прошлого года, но не выходит за рамки объемов абляции последних лет: 2020 – 30,75 млн. м<sup>3</sup> в.э.; 2019 – 12,56 млн. м<sup>3</sup> в.э.; 2018 – 18,79 млн. м<sup>3</sup> в.э.; 2017 – 16,45 млн. м<sup>3</sup> в.э.

Значительное снижение скоростей абляции на ледниках в 2021 г. по сравнению с рекордным 2020 г. объясняется снижением средней температуры воздуха за период абляции. Согласно данным АМС НОВО U30, расположенной в нижней части ледника Альдегонда, средняя температура воздуха за период с 1 июля по 21 августа 2021 г. составила 3,51°C, тогда как за аналогичный период 2020 г. она составила 4,72°C.

#### *Гляциологические исследования ледников с применением георадиолокации*

Полевые георадиолокационные измерения выполнялись в марте-апреле 2021 г. с использованием комплекта георадиолокационной и геодезической аппаратуры, включающего георадар Pulse Ekko Pro с антеннами 50, 200 и 500 МГц и GNSS-систему Sokkia GRX2 с внешним модемом SATELLINE-Easy Pro. Совместные с ИГ РАН исследования ледников Земли Норденшельда направлены на построение сети долгосрочных наблюдений за их внутренним строением: на ледниках Вёринг, Пассфьёл и Слакбрин наблюдения были выполнены впервые; на ледниках Восточный Гренфьорд, Эрдман и Фритьоф велась детализация имеющихся данных.

Предварительная обработка полученных данных показала, что ледники Вёринг, Пассфьёл и Слакбрин в основном состоят из холодного льда, а отмеченные внутренние отражения связаны с элементами внутренней дренажной сети (ледники Вёринг, Слакбрин) или с наличием большого количества моренного материала в теле ледника (ледник Пассфьёл, рис. 4.2). Дальнейшее сопоставление новых данных с результатами исследований 2010–2013 гг. позволит проследить динамику изменения мощности и гидротермического состояния ледников.

В 2018–20 гг. были определены гидротермическое строение и положение внутренней дренажной сети ледника Альдегонда. В 2021 г. в местах переуглубления ложа ледника были выполнены измерения (с антеннами 50 и 200

Таблица 4.2 – Расчётные объёмы поверхностной абляции (W), ледник Западный Гренфьорд, 2021 г.

Высота, м	Ср. абляция, мм в.э.	Площадь, км <sup>2</sup>	W, 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> в.э
0-100	2932	0,89	2,60
100-200	2180	1,95	4,26
200-300	1585	4,14	6,56
300-400	110	5,24	0,58
>400	110	4,20	0,46
Сумма		16,42	14,46

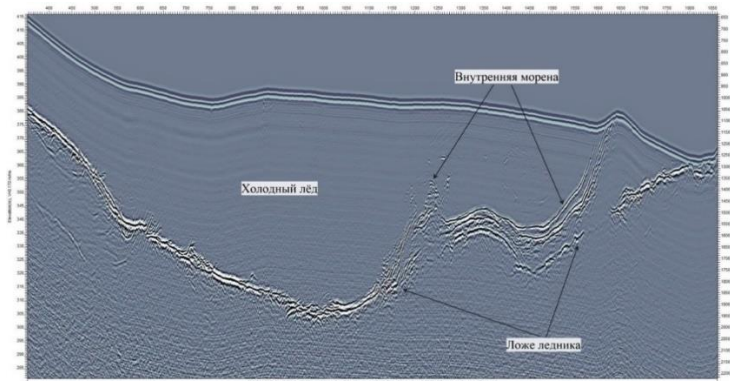


Рисунок 4.2 – Обработанный георадиолокационный разрез через ледник Пассфьёл

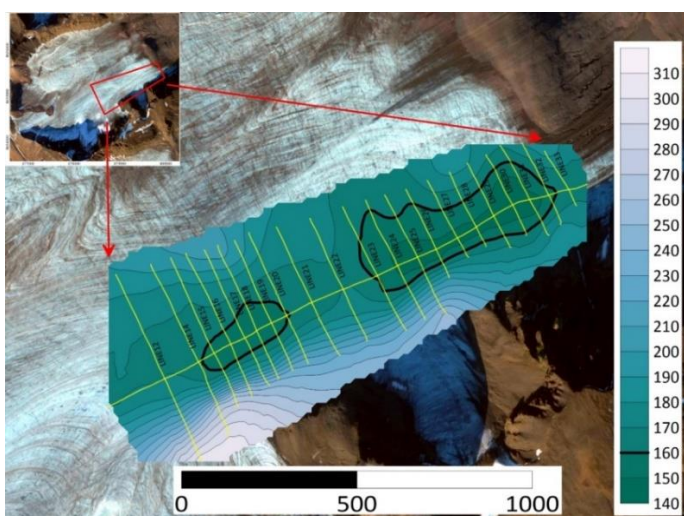


Рисунок 4.3 – Детальный участок георадиолокационных исследований на леднике Альдегонда. Жёлтыми линиями обозначены профили наблюдений, черные контуры – места переуглублений ложа

МГц) для уточнения их геометрии (рис. 4.3). В результате были оконтурены места переуглубления и рассчитаны их площадь и объём, составившие для двух выделенных участков вместе 0,15 км<sup>2</sup> и 0,00104 км<sup>3</sup>, соответственно, при максимальной глубине переуглублений 20 м.

В 2021 г. были опубликованы и сданы в редакции журналов следующие статьи:

Борисик А.Л., Демидов В.Э., Ромашова К.В., Новиков А.Л. Внутренняя дренажная сеть и характеристики подледникового стока ледника Альдегонда (о. Западный Шпицберген). Проблемы Арктики и Антарктики, 2021. 67(1), с. 67-88. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88>

Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р. Расчёт составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли, 2021. Т. XXV, № 3, с. 50-60. DOI 10.15372/KZ20210305

Terekhov A., Verkulich S., Borisik A., Demidov V., Romashova K., Anisimov M., Sidorova O., Tarasov G. Mass balance, ice volume, and flow velocity of Western Grønfyord glacier (Nordenskiöld land, Spitsbergen) in 2013/14–2019/20. Polar Research, 2021 (на рецензии).

Попов С.В., Боронина А.С., Борисик А.Л., Новиков А.Л., Ромашова К.В., Демидов В.Э., Пряхина Г.В. Моделирование донного таяния ледника Альдегонда, архипелаг Шпицберген. Лёд и снег, 2021 (на рецензии).

Мероприятие 4 выполнено полностью.

## **Мероприятие 5. Палеогеографические исследования**

Целью палеогеографических исследований является реконструкция хронологии и условий изменения компонент природной среды (климат, уровень моря, рельеф, ландшафты и растительность) на о. Западный Шпицберген в конце позднего неоплейстоцена – голоцене (около 20 последних тысяч лет). Для достижения этой цели, в 2015 – 2019 гг. на нескольких участках Земли Норденшельда и Земли Веделя Ярлсберга изучался рельеф и четвертичные отложения, отбирались образцы в естественных обнажениях отложений, керны мерзлых отложений и колонки донных осадков озер. Предварительные результаты аналитических исследований этого материала показали его высокую палеогеографическую информативность (Окунев и др. 2020, Соловьева и др. 2020а,б, Verkulich et al. 2018), позволили выявить особенности развития природной среды районов исследования в позднем плейстоцене – голоцене.

В связи с тем, что экспедиционные наблюдения и отбор материала в 2021 г. не состоялись из-за ограничений в связи с пандемией коронавируса и трудностей в организации полевых работ со стороны ФГБУ «ВНИИОкеангеология», палеогеографические исследования были ограничены аналитическими работами (исполнитель – Соловьева Д.А.). Они включали радиоуглеродное датирование возраста отложений, спорово-пыльцевой анализ образцов четвертичных отложений и проб аэропалинологического мониторинга, биоиндикационные исследования, интерпретацию полученных данных.

*Геохронологическая привязка изученных отложений по результатам радиоуглеродного датирования*

Для получения геохронологической привязки геоморфологических, литолого-стратиграфических и микропалеонтологических данных было использовано радиоуглеродное датирование. Радиоуглеродные датировки возраста изученных отложений были выполнены в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» г. Москва и в научной лаборатории «Геоморфологические и палеогеографические исследования полярных регионов и Мирового океана» им. В.П. Кеппена, СПбГУ. В течение 2017 – 2021 гг. было проведено датирование более 40 образцов из разрезов морских, речных и болотных образований (рис. 5.1).



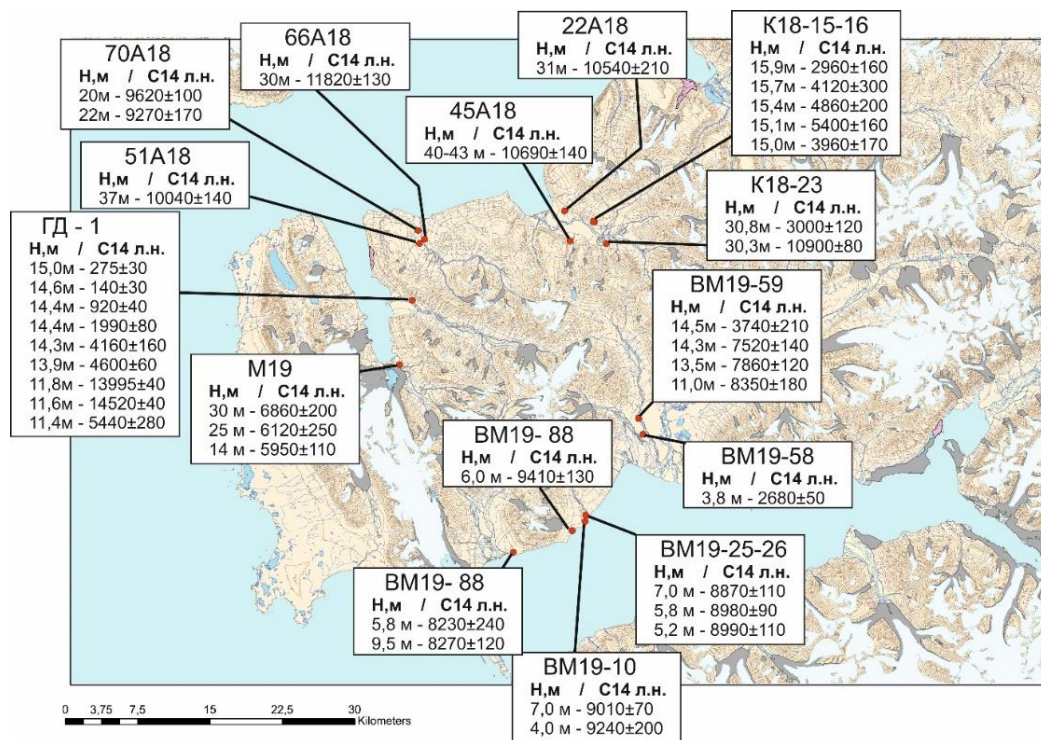


Рисунок 5.1 – Результаты радиоуглеродного датирования, полученные при изучении отложений на Земле Норденшельда

Новые данные по геохронологии изученных четвертичных образований позволили определить возраст изученных образований и существенно дополнить имеющиеся представления об эволюции ландшафтов изученного региона в прошлом.

#### *Спорово-пыльцевой анализ проб четвертичных отложений*

В 2021 г. был выполнен спорово-пыльцевой анализ образцов речных отложений разрезов BM19-59 (анализ первичных данных, полученных в 2020 г.), ГД-19-1-2 (27 проб) и BM19-112 (14 проб), отобранных в долинах Семмельдален и Грендален (рис. 5.2) в ходе полевых исследований 2019 г.

Обработка проб выполнялась в лаборатории Геоморфологические и палеогеографические исследования полярных регионов и Мирового океана СПбГУ по стандартной методике – сепарационным методом с использованием тяжелой жидкости (ПД-2, концентрированного водного раствора цинка йодистого с удельным весом 2,29 г/см<sup>3</sup>). Для удаления пылеватых минеральных частиц проводилась дополнительная обработка ультразвуком (Свунгар 1979). В каждом образце насчитывалось около 300 пылин. Пыльца и споры были идентифицированы при увеличении 400x с помощью пылевых атласов (Moore et al. 1991, Savelieva et al. 2013 и др.) и современной эталонной коллекции пыльцы растений центральной части о. Западный Шпицберген, созданной в рамках палеогеографических исследований. Также проводился подсчет минеральных частиц палеогеновых пород (сланцы, аргиллиты), дочетвертичных микрофоссилий и водных непыльцевых палиноморф (*Zygnema* type, *Dinoflagellata*).

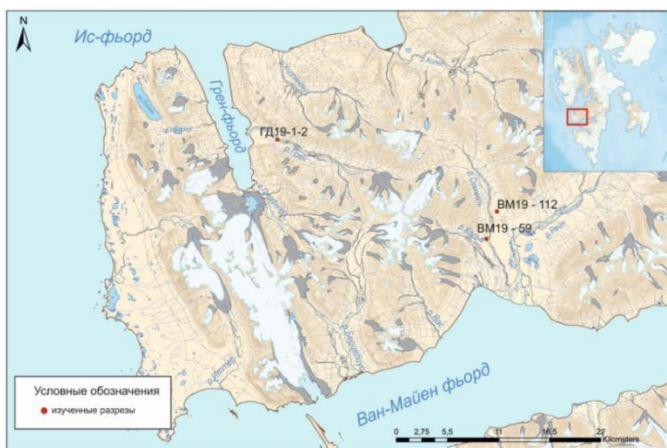


Рисунок 5.2 – Местоположение разрезов, изученных методом спорово-пыльцевого анализа

По результатам спорово-пыльцевого анализа построены диаграммы (пример диаграммы для разреза BM19-59 – рис. 5.3). Процентное содержание каждого таксона рассчитано от общей суммы пыльцы наземных растений. В изученных пробах присутствует пыльца как местных растений (*Betula sect. nanae*, *Salix*, *Cyperaceae*, *Poaceae*, *Caryophyllaceae*, *Ranunculaceae*, *Polemonium* sp., *Rumex* sp. и др.), так и дальнезаносная (*Pinus*, *Alnus fruticosa*).

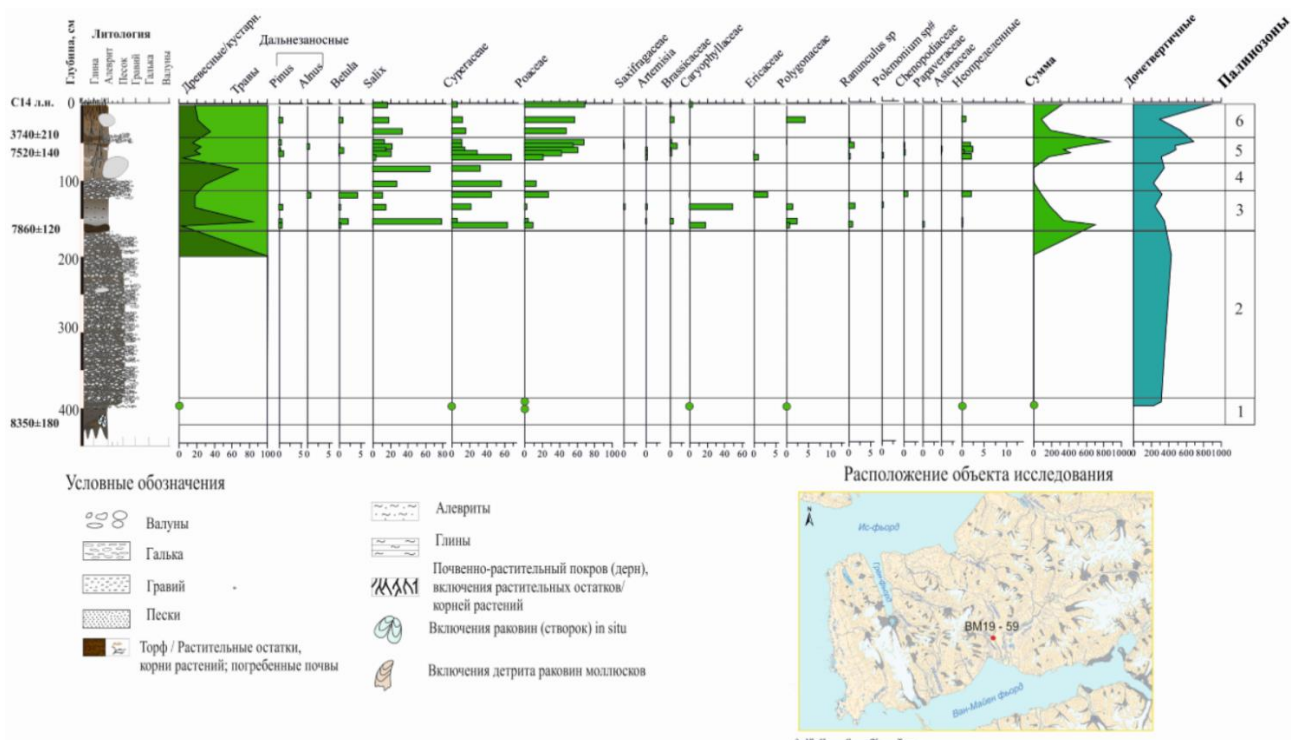


Рисунок 5.3 – Спорово-пыльцевая диаграмма, разрез BM19-59, долина Семмельдален

По характерным изменениям в составе спорово-пыльцевых спектров и соотношению основных доминантов на диаграммах выделялись пыльцевые зоны, соответствующие этапам развития растительности в точках исследования. Так, для разреза BM19-59 палинозона 1 соответствует этапу осадконакопления в неглубоком морском заливе при относительно благоприятных условиях среды. В отложениях встречаются редкие микрофоссилии кустарничковых форм (плохой сохранности). Палинозона 2 выделяется по практически полному отсутствию ископаемых пыльцы и спор, соответствует этапу высокой динамики среды – изменению уровня моря и интенсивному стоку талых вод. Палинозона 3 фиксирует развитие кустарничково-осоковой тундры при относительно теплом и влажном климате. В палинозоне 4, соответствующей ивово-осоковой тундре, низкое содержание микрофоссилий является свидетельством увеличения стока реки и, вероятно, увеличением количества атмосферных осадков. Палинозона 5 – ивово-разнотравная тундра. Палинозона 6 отражает этап развития современной растительности – ивово-злаковую тундру.

Палинологические исследования в 2021 г. были также направлены на изучение речных отложений, что позволило сделать выводы как об изменении растительности и климата в точках исследования, так и об особенностях фоссилизации пыльцы в аллювии центральной части Земли Норденшельда. Пыльца и споры сохраняются в условиях мелководных заливов с высокой степенью деформации микрофоссилий. Практически полное отсутствие пылинок характерно для отложений, накапливающихся при высокой динамике среды, например, при увеличении стока, в русловой фации аллювия. Хорошая сохранность и высокая концентрация микрофоссилий характерна для отложений заболочиваемой поймы.

#### Аэропалинологический мониторинг

Для выявления закономерностей воздушного переноса спор и пыльцы, и их распределения на земной поверхности в районе поселков Баренцбург и Колсбей в 2017–2020



гг. проводился аэропалинологический мониторинг, включающий установку краткосрочных пылевых ловушек, круглогодичного улавливателя (2018-2019 гг.) и отбор твердых атмосферных осадков (2019-2020 гг.). В 2021 г. была выполнена химическая подготовка и микроскопирование 36 полученных проб, начат сопряженный анализ полученных мониторинговых данных.

#### Биоиндикационные исследования

Для изучения субрецентных спорово-пыльцевых спектров и выявления релевантности отражения в них современного растительного покрова и содержания дальнезаносной пыли в ходе полевых работ 2017 – 2019 гг. отбирались поверхностные пробы. Работы 2021 г. включали в себя спорово-пыльцевой анализ 34 проб (рис. 5.4) и сопоставление полученных спорово-пыльцевых спектров с данными о современной растительности в точках исследования.

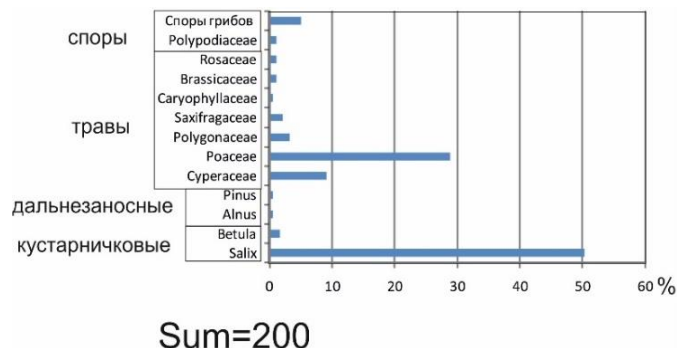


Рисунок 5.4 – Пример результата спорово-пыльцевого анализа поверхностной пробы

По результатам исследований сделан доклад и вышла публикация:

Соловьева Д.А., Савельева Л.А., Веркулич С.Р. Развитие растительности в долине Колесдален (центральная часть о. Западный Шпицберген) в голоцене по результатам спорово-пыльцевого анализа Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов: Материалы науч. онлайн-сессии, 19–22 апреля 2021 г. [электронный ресурс] / Под ред. Н.К. Лебедевой, А.А. Горячевой, О.С. Дзюба, Б.Н. Шурыгина. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2021, с. 392–396.

Мероприятие 5 полностью выполнено в части аналитических исследований; полевые работы в рамках мероприятия не проводились по объективным причинам.

#### Литература:

- Гричук В.П., Заклинская Е.А. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М., 1948. 223 с.
- Окунев А.С., Соловьева Д.А., Куприянова Н.В., Полещук К.В., Петров А.Ю. Условия формирования морских отложений на южном побережье Земли Норденшельда (бассейн Ван-Мейен-фьорда) в раннем голоцене // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: Тез. докл. XV Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Мурманск, 28–30 октября 2020 г.). Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020, с. 79–81. DOI: 10.37614/978.5.91137.435.8
- Соловьева Д.А., Окунев А.С., Веркулич С.Р. Новые геохронологические данные о строении покрова четвертичных отложений в центральной части острова Западный Шпицберген и их место в реконструкции изменений природной среды в позднем неоплейстоцене – голоцене // Рельеф и четвертичные отложения Арктики, Субарктики и северо-запада России. Материалы ежегодного семинара по результатам экспедиционных исследований. Выпуск 7. Санкт-Петербург. 2020б, с. 20–31. DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10731.
- Соловьева Д.А., Савельева Л.А., Веркулич С.Р. Особенности развития растительности Земли Норденшельда в голоцене на основе данных спорово-пыльцевого анализа // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: Тез. докл. XV Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Мурманск, 28–30 октября 2020 г.). Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020б, с. 94–96. DOI: 10.37614/978.5.91137.435.8
- Cwynar L.C., Burden E., McAndrews J.H. An inexpensive sieving methods for concentrating pollen and spores from fine-grained sediments. // Canadian journal of Earth Sciences, 1979. Vol. 16, p. 111-1120.
- Moore P. D., Webb J. A., Collinson M. E. Pollen Analysis. Oxford: Blackwell Scientific, 1991. 216 p.
- Savelieva, L. A., Raschke, E. A., Titova, D. V. Photographic Atlas of Plants and Pollen of the Lena River Delta. St.-Petersburg State University, St. Petersburg 2013. 114 p.
- Verkulich S., Zazovskaya E., Pushina Z., Savelieva L., Soloveva D., Demidov N., Dercon G. The postglacial environmental changes in vicinity of the Barentsburg settlement (West Spitsbergen) // EGU Assembly. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-7729, 2018.

## Мероприятие 6. Современное состояние и динамика многолетней мерзлоты

Мерзлотные исследования на Шпицбергене в 2021 г. В 2021 г. работы проводились в ходе весеннего (исполнители Демидов Н.Э., Демидов В.Э.) и летне-осеннего (исполнители Демидов В.Э., Новиков А.Л., Василевич И.И., Прохорова У.В.) экспедиционных этапов с целью продолжения начатых в 2016 г. изучения и мониторинга геокриологических условий на Земле Норденшельда (о. Западный Шпицберген). Ответственный исполнитель проекта Н.Э. Демидов (nikdemidov@mail.ru).

### *Термометрические исследования в скважинах и выполнение программы CALM*

Задача термометрических работ в п. Пирамида заключалась в восстановлении созданной в советские годы сети наблюдений за температурным состоянием мерзлых грунтов в основании зданий. В ходе весеннего и летне-осеннего этапов в пределах поселка были расконсервированы и обследованы 19 скважин (рис. 6.1). В скважинах, в зависимости от их состояния, устанавливались термокосы GeoPrecision (Германия) с логгерами (запрограммированы на снятие четырех отсчетов в сутки), выполнялись разовые замеры температуры, измерялась щупом глубина до ледяных пробок.



Рисунок 6.1 – Расположение расконсервированных скважин п. Пирамида. Желтый – скважины, оснащенные стационарными термокосами, зеленый – скважины с разовыми замерами температуры, синий – скважины с измерением щупом мощности сезонно-талого слоя

Измерения показывают, что температурное поле мерзлых пород в п. Пирамида характеризуется значительной пространственной неоднородностью (рис. 6.2), на отдельных участках произошло повышение температуры грунтов с момента первых наблюдений в 1970-х годах. Термометрические промеры выявили глубину сезонно-талого слоя (СТС) на середину сентября 2021 г. под крупными строениями п. Пирамида 1,5–1,7 м, на открытых локациях 2,5–3,0 м. Температуры на глубине затухания сезонных колебаний (15 м) в скважинах отмечены в пределах от  $-2,75^{\circ}\text{C}$  до  $-3,43^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, в п. Пирамида были возобновлены термометрические наблюдения по широкой сети скважин спустя 35–40 лет после завершения бурения 1980-х годов. Работы проводились в сотрудничестве с ФГУП ГТ «Арктикуголь».

В летне-осенний сезон 2021 г. были продолжены термометрические наблюдения в опорных скважинах №2 и №12 на мерзлотном полигоне п. Баренцбург. Температура в скважине №12 на глубине 14,25 м 25 сентября 2020 г. составила  $-2,62^{\circ}\text{C}$ . В скважине №2 на площадке CALM температура на глубине 5,5 м на 21 сентября 2021 г. составила  $-2,62^{\circ}\text{C}$ . Термометрический замер в скважине №13, пробуренной в долине Грёндален для мониторинга состояния ледяного ядра бугра пучения Норри, показал 3 сентября 2021 г. температуру  $-3,06^{\circ}\text{C}$  на глубине 14,25 м.

Замеры мощности сезонно-талого слоя (СТС) были выполнены 21–26 сентября 2021 г. на площадке CALM Баренцбург. По сравнению с предыдущими годами наблюдений, в 2021 г. мощность СТС показала минимальные величины, сравнимые с измерениями 2019 года (табл. 6.1).

### Геофизические исследования

Задача геофизических работ методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) состояла в изучении мерзлотного строения речных долин и покрытых морским льдом участков фьордов. Профили ЗСБ удалось вывести на припай в трех долинах (Мимердален, Грендален, Браганцаваген), где данные ЗСБ показали отсутствие субмаринных мерзлых пород во фьордах. Эти исследования являются первым опытом изучения субмаринной мерзлоты на Шпицбергене. Дополнительно для оценки влияния температуры морской воды на донные осадки в бухтах Петунья и Агард продолжительностью на один год были установлены придонные автономные STD-регистраторы.

В речных долинах по данным ЗСБ талые породы под маломощным покровом мерзлоты прослеживаются на удалении в первые километры от моря, что объясняется недавним выходом долин из-под уровня моря, наличием здесь засоленных морских осадков с температурой около 0°C и их гидродинамической связью с морскими водами. Нижняя граница мерзлоты в верхних частях долин находится на глубине более 60 м.

### Минерализация и ионный состав водотоков

В летне-осенний период в нескольких районах Земли Норденшельда отбирались пробы воды для определения минерализации водотоков (рис. 6.3). Замеры электропроводности водотоков выявили широкое распространение относительно высокоминерализованных (свыше 1600-2000 мкСм/см или 1-1,5 г/л) поверхностных водотоков. В долинах Линне и Конгресс эти водотоки сульфатно-кальциевого состава связаны с выходами круглогодичных подземных источников. В долинах Крокдален, Грендален, Холлендардален, Мимердален и на мысе Ольхорн минерализованные водотоки сульфатно-кальциевого и гидрокарбонатно-кальциевого состава привязаны к склонам южной экспозиции и, вероятно, связаны с сильной протайкой пролювиально-

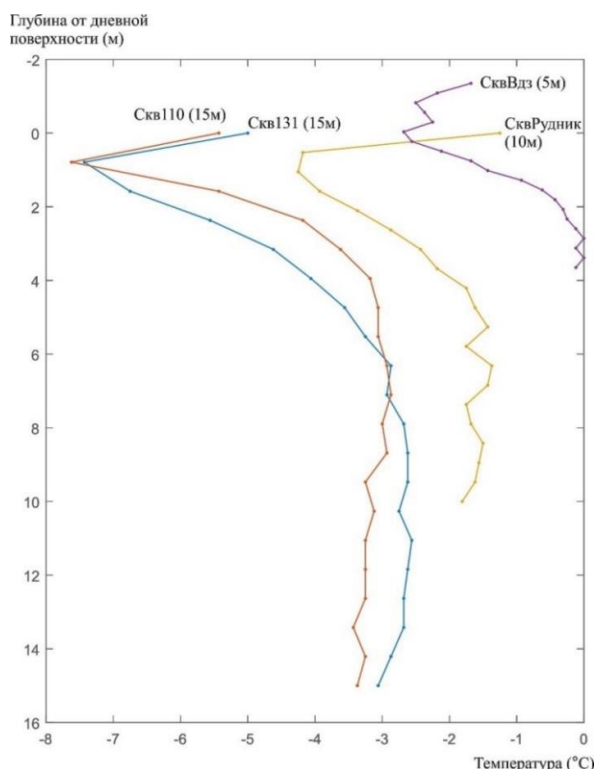


Рисунок 6.2 – Термометрические кривые по скважинам в п. Пирамида (март 2021 г.)

Таблица 6.1 – Мощность СТС на площадке CALM Баренцбург

Год измерений	Средняя величина СТС, см
2016	156
2017	137,6
2018	144,6
2019	133,5
2020	142,7
2021	134,7

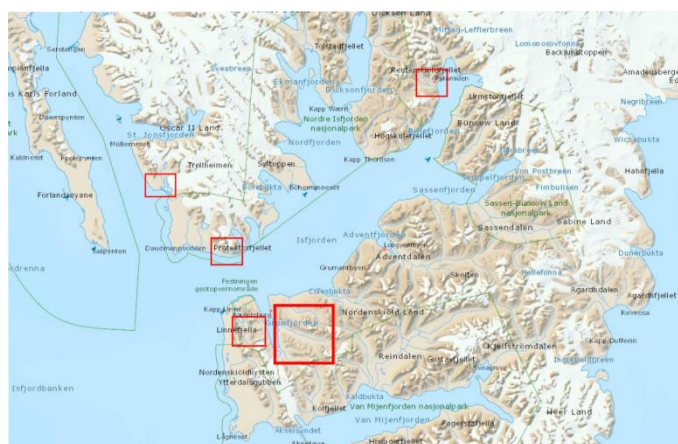


Рисунок 6.3 – Районы маршрутного картирования минерализации водотоков 2021 г.



коллювиальных конусов, где рост минерализации воды происходит во время длительной задержки в присклоновых таликах.

#### *Мониторинг криогенных процессов в районе п. Баренцбург*

Появления свежих оползней и селей за летне-осенний период 2021 года не отмечено. В долине Холлендардален зарегистрировано появление и развитие крупного термоцирка с обнажением мощных толщ подземного льда и возникновение нескольких свежих термокарстовых воронок в русле р. Холлендардаленэльва (рис. 6.4).



Рисунок 6.4 – Термоцирк в правом борту русла реки Холлендардаленэльва (вверху слева), обнажение пластового льда и ледогрунта в стенке термоцирка (вверху справа), термокарстовая воронка в русле реки Холлендардаленэльва (внизу слева), расположение термоцирка (изогнутая линия), термокарстовых воронок (спирали) и предполагаемого простираения пластов льда (штриховка) в долине Холлендардален (внизу справа)

В термоцирке отмечено наличие выходов монолитных слоистых пластов льда мощностью до 3,5 м, уходящих под урез реки Холлендардаленэльва, а также активное поглощение и дренаж речного потока в основании некоторых воронок. Предположительно, развитие воронок и поглощение поверхностных водотоков происходит в подрусловом талике по линии Холлендардаленского разлома, что теоретически может сказаться на увеличении водопритоков в шахту п. Баренцбург, отдельные выработки которой находятся вблизи зоны Холлендардаленского разлома.

#### *Георадиолокационные исследования строения бугров пучения*

По результатам георадиолокационных исследований 2018-2019 гг. на булгуннях долины реки Грэн, стало очевидно, что метод позволяет идентифицировать и оконтуривать положение ледяного ядра бугров пучения только при небольшом перекрытии его осадочными породами. Таким благоприятным объектом явился булгуннях Кили, где удалось проследить ледяное ядро на глубину более 30 м. В 2021 г. была проведена дополнительная обработка всего массива георадиолокационных данных, которая позволила не только обозначить положение его границ, но и построить объёмную модель ледяного ядра. Для этого, обработанные с сохранением информации об амплитудах сигнала георадиолокационные разрезы, были экспортированы в текстовый формат для последующей интерпретации в программе Voxler. Полученные значения амплитуд сигнала были использованы для построения объёмной модели ледяного ядра, имеющего повышенные, относительно вмещающих пород, параметры отражения (рис. 6.5). Дополнительно, по

полученной замкнутой изоповерхности, был оценён объём ядра, который составил около 162 тыс. м<sup>3</sup>.

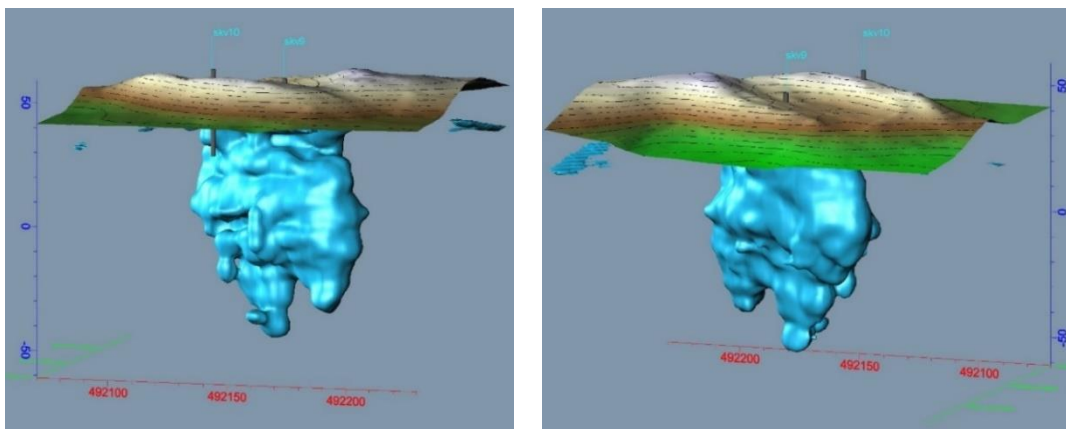


Рисунок 6.5 – Объёмная модель ледяного ядра булгуньяха Кили с нанесённым рельефом поверхности и положением пробуренных скважин

В 2021 г. на основе результатов изучения и мониторинга состояния и динамики многолетней мерзлоты опубликованы следующие статьи:

Веркулич С.Р., Демидов Н.Э., Анисимов М.А. Разработка проекта организации мониторинга многолетнемерзлых грунтов высокоширотной Арктики на базе наблюдательной сети Росгидромета // Российские полярные исследования. 2021. № 1, с. 23-27. (ISSN 2618-6705)

Караевская Е.С., Демидов Н.Э., Казанцев В.С., Елизаров И.М., Калошин А.Г., Петров А.Л., Карлов Д.С., Ширрмайстер Л., Белов А.А., Веттерих С. Бактериальные сообщества мерзлых четвертичных пород морского генезиса на побережье о. Западный Шпицберген // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 2, с. 75–98. DOI 10.21455/GPB2021.2-5

Караевская Е.С., Демидов Н.Э., Казанцев В.С., Елизаров И.М., Калошин А.Г., Петров А.Л., Карлов Д.С., Ширрмайстер Л., Белов А.А., Веттерих С. Архейные сообщества мерзлых четвертичных пород морского генезиса на побережье о. Западный Шпицберген // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 3, с. 20–38. DOI 10.21455/GPB2021.3-2

Christiansen NH, Gilbert GL, Neumann U, Demidov N, Guglielmin M, Isaksen K, Osuch M, Boike, J. Ground ice content, drilling methods and equipment and permafrost dynamics in Svalbard 2016-2019. In: Moreno-Ibñez et al (eds) SESS report 2020, Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System, Longyearbyen, 2021, p 258-275. DOI 10.5281/zenodo.4294095

Demidov V., Wetterich S., Demidov N., Schirrmeister L., Verkulich S., Koshurnikov A., Gagarin V., Ekaykin A., Terekhov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium-chloride dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // Permafrost and Periglacial Processes. 2021. Vol. 32, p. 572-586. DOI 10.1002/ppp.2124

Demidov N.E., Verkulich S.R., Demidov V.E., Solovyeva D.A., Vatterikh The permafrost of Spitzbergen and its monitoring at the cryospheric testing area in Barentsburg / In: The current state of the natural environment on Spitzbergen archipelago (2020). Ed. L.M. Savatyugin. St. Petersburg: AARI. 2021, p. 126–140.

Karlov, D., Sazanova, A., Kuznetsova, I., Tikhomirova, N., Popova, Zh., Osledkin, Yu., Demidov, N., Belimov, A., and Safronova, V. Rhizobial isolates in active layer samples of permafrost soil of Spitsbergen, Arctic. Bio. Comm, 2021. 66(1), p. 73–82. DOI 10.21638/spbu03.2021.109

Мероприятие 6 выполнено полностью.

## Мероприятие 7. Спутниковый мониторинг акватории и побережья Северного ледовитого океана и арктических морей

Важнейшим элементом инфраструктуры РАЭ-Ш ААНИИ является выносной пункт приема-передачи спутниковой информации (ВППИ), размещенный в п. Баренцбург. Он представляет собой комплекс технических и программных средств и функционирует в круглосуточном режиме с целью получения, обработки и передачи потребителям данных дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ), акваторий и побережья Северного Ледовитого океана и арктических морей.

Выгодное географическое положение обеспечивает преимущество ВППИ на Шпицбергене по сравнению с другими отечественными пунктами приема спутниковой информации (Санкт-Петербург, Обнинск, Новосибирск, Хабаровск), так как зона его обзора в Баренцбурге почти полностью охватывает акваторию Северного Ледовитого океана (рис. 7.1). Кроме того, над ВППИ находится точка схождения орбит спутников ДЗЗ, так что спутники попадают в зону прямой радиовидимости ВППИ на всех витках. Этим обеспечивается прием максимально возможного количества информации. Отсутствие радиопомех и зон закрытия обеспечивает высокое качество снимков.



Собираемая ВППИ информация предназначена для мониторинга ледовых и гидрометеорологических условий на акватории СЛО, обеспечения безопасности мореплавания на трассе СМП, а также акваториях Баренцева, Белого и Балтийского морей, обеспечения безопасности деятельности по освоению месторождений углеводородного сырья на шельфе и побережье арктических морей.

Основу комплекса составляют 3 станции MEOS 3,8 м производства норвежской компании Kongsberg Spacetec AS, установленные на отроге горы Улаф (рис. 7.2):

- станция meos-bg1 для приема данных L-диапазона со спутников серии NOAA, METOP, FY-3;
- станция meos-bg2 для приема данных X-диапазона со спутников TERRA, AQUA, Suomi-NPP, JPSS-1, а также со спутников серии FY-3;
- станция meos-bg3 (резервная) для приема данных L-диапазона и X-диапазона со спутников серии NOAA, METOP, FY3, а также со спутников TERRA, AQUA, Suomi-NPP, JPSS-1.





Рисунок 7.2 – Спутниковые антенны ВППИ в п. Баренцбург

ВППИ в п. Баренцбург обеспечивает круглосуточный прием и передачу в ААНИИ плановой ледовой и гидрометеорологической информации, которая используется в целях:

- мониторинга ледовых и гидрометеорологических условий на акватории СЛО и арктических морей;

- обеспечения безопасности мореплавания на трассе СМП, а также акваториях Баренцева, Белого и Балтийского морей;

- обеспечения безопасности деятельности по освоению месторождений углеводородного сырья на шельфе и побережье арктических морей.

ВППИ в п. Баренцбург обеспечивал в течение 2020-2021 гг. прием, первичную обработку и передачу в ААНИИ и систему ЕСИМО спутниковой информации. Объем переданной информации приведен в соответствии с таблицей 7.1. Передача спутниковой информации осуществлялась через широкополосный интернет-канал, предоставляемый норвежским оператором Telenor ASA по контракту с ААНИИ.

Таблица 7.1 – Объем переданной ВППИ информации за период IV кв. 2020 г. – III кв. 2021 г.

Количественные показатели информации	2020 г.				Всего
	IV кв.	I кв.	II кв.	III кв.	
Количество сеансов приема информации с ИСЗ	10898	10312	6994	7944	36148
Количество подготовленных и переданных в ААНИИ tif - файлов	23237	27879	88570	114011	253697
Объем переданной информации, Гб	60,2	345,8	0	313	719

ВППИ работал круглосуточно, серьезных сбоев в его работе допущено не было, за исключением единичных случаев кратковременных плановых и внеплановых отключений электричества в п. Баренцбург, а также при обновлении программного обеспечения. Работу ВППИ в период с 16.04.2021 г. по настоящее время обеспечивал ведущий инженер Н.В. Друба.

В период с 14 по 15 июня 2021 г. работу ВППИ инспектировала комиссия Государственного департамента связи Норвегии (НКМ). Все необходимые сведения и данные были подготовлены по форме самодекларации и высланы в указанный срок инспектирующей стороне. Проверка работы спутниковых станций проводилась в соответствии с Предписанием от 21 апреля 2017 года № 493 о создании, эксплуатации и использовании наземных станций спутниковой связи на Шпицбергене, § 9 (<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-04-21-493>). Каких-либо нарушений в документах самодекларации не было выявлено. Расчеты показывают, что прохождения спутников хорошо совпадают с записями в журналах станции.

Мероприятие 7 выполнено полностью.

## Мероприятие 8. Экологические исследования

Экологические исследования на базе химико-аналитической лаборатории в 2021 г. велись по нескольким направлениям: мониторинг состояния приземного воздуха автоматическими станциями контроля качества атмосферы (СККАВ), накопление тяжелых металлов в трофической цепи (бентосных организмах) заливов Исфьорда (совместно с

ММБИ РАН), разработка методик анализа и поиск новых загрязняющих веществ на архипелаге Шпицберген.

*Мониторинг состояния приземного воздуха автоматическими станциями*

С 2016 г. в п. Баренцбург работают две станции контроля качества атмосферного воздуха, непосредственно в самом поселке и на плато г. Улаф. Оборудование станций анализирует содержание оксидов азота, диоксида серы, сероводорода, озона, углекислого газа, угарного газа, газообразной ртути и пыли в приземном воздухе, одновременно регистрируя метеорологические параметры (табл.8.1). Получаемые результаты измерений накапливаются на компьютере с установленной системой обработки данных «Агат» в химико-аналитической лаборатории и в конце каждого месяца выкладываются на сервер института.

Таблица 8.1 – Комплектация станций контроля качества атмосферного воздуха, установленных в п. Баренцбург, и количество замеров, произведенных оборудованием за январь-октябрь 2021 г.

Измеряемый показатель	Оборудование	Производитель оборудования	Количество измерений, ед.	
			Ст. «Гора»	Ст. «Поселок»
NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, NH <sub>3</sub>	Хемиллюминесцентный анализатор оксидов азота AC32M + внешний доп. модуль NH <sub>3</sub> → NO	Environnement S.A. (Франция)	77256	86112
SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	Флуоресцентный анализатор двуокиси серы AF 22 УФ	Environnement S.A. (Франция)	43302	43012
CO <sub>2</sub> , CO	Анализатор содержания оксида и диоксида углерода CO12 с корреляцией по газовому фильтру CO12M	Environnement S.A. (Франция)	43344	43122
O <sub>3</sub>	УФ фотометрический анализатор озона O342M	Environnement S.A. (Франция)	21744	21528
Взвешенное вещество <10мкм	Бета-измеритель взвешенных частиц MP101M	Environnement S.A. (Франция)	43488	43056
Hg <sup>0</sup>	Воздушный ртутный монитор RA-915 AM	Люмэкс (Россия)	21384	21606
Температура, давление, влажность, скорость, направление ветра, осадки	Преобразователь метеоданных WXT520	Vaisala (Финляндия)	NA	NA

С января по ноябрь 2021 г. станции работали непрерывно, однако с июля 2021 г. был отключен модуль определение аммония (CNH3S2) на ст. «Гора», в связи с тем, что вышла из строя термопара, ожидается поступление новой. Также периодически происходило отключение системы сбора данных «Агат» вследствие ее общей нестабильности. В 2021 г. в ходе проверки было выявлено, что анализатор содержания оксида и диоксида углерода CO12 работает некорректно, так как его показания напрямую зависят от температуры воздуха внутри балка, которые значительно повышаются летом и понижаются зимой. На текущий момент регулировка температуры в балках станций осуществляется в ручном режиме (проветривание помещения в летний сезон и нагрев обогревателем в зимний). Планируется установка кондиционера с автоматическим регулированием температуры, однако это представляет технические сложности. В связи с этим часть данных, полученных анализатором диоксида углерода (CO12), нельзя использовать для анализа закономерностей содержания газа в атмосфере.

В непрерывных рядах концентраций газовых примесей отражается сезонная динамика состава приземного воздуха, вклад локальных, удаленных и антропогенных источников загрязнений. Сравнение рядов данных по оксидам азота и серы, полученных в процессе работы станций, дает представление об экологической ситуации в поселке Баренцбург. Местные метеорологические особенности (сильные ветры, температурные инверсии, резкая смена температуры, туманы, низкая облачность) также оказывают большое влияние на содержание и распределение газовых примесей.



С 2019 по 2021 г. годовая динамика оксидов азота оставалась сравнительно неизменной: в летнее время с открытием навигации в п. Баренцбург возрастала концентрация оксида и диоксида азота, что связано с заходом и стоянкой кораблей в порту и на рейде (рис.8.1). В 2020 г. в связи с закрытием границ и временным запретом на туристическую деятельность на арх. Шпицберген, концентрации оксидов азота в летний период повысились незначительно. В 2021 г. судоходство возобновилось, что привело к росту концентраций оксидов азота, наиболее заметному в августе-сентябре. Это подтверждает предположение, что основным источником оксидов азота на архипелаге является транспорт, в частности судоходный.

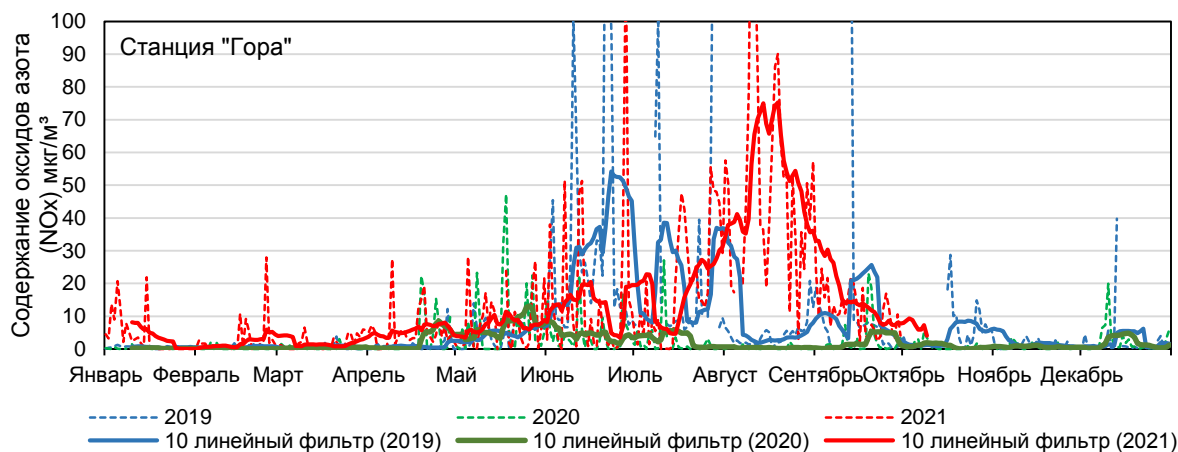


Рисунок 8.1 – Содержание оксидов азота (суммарное) в воздухе на станции «Гора» за весь год 2019 и 2020 и с января по октябрь 2021 гг. Сплошные линии – сглаживание с шагом 10

Временной ход содержания диоксида серы в приземном воздухе практически не изменяется по годам (рис. 8.2), так как несмотря на влияние выхлопов транспорта, его основным локальным источником является работающая на угле ТЭЦ, которая обеспечивает поселок электроэнергией и теплом. Резкие кратковременные повышения концентрации диоксида серы, вероятно, объясняются нестабильностью работы ТЭЦ и недостаточной фильтрацией газов и твердых частиц на выходе. Также этот эффект может усиливаться в зимний период во время интенсивного отопительного периода и частого установления инверсий, препятствующих рассеиванию шлейфа загрязнения. Фоновые концентрации диоксида серы очень низкие по сравнению с населенными пунктами российской Арктики.

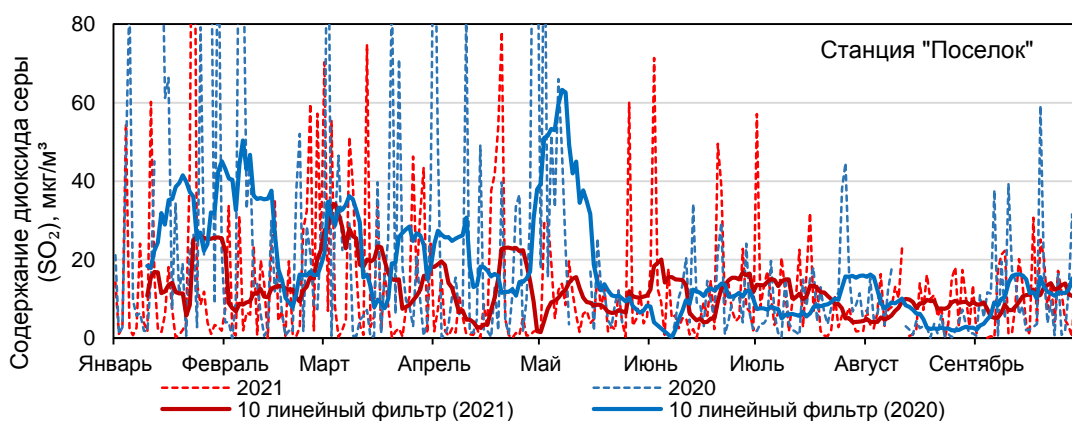


Рисунок 8.2 – Содержание диоксида серы в приземном воздухе на станции «Поселок» с января по сентябрь 2020 и 2021 гг. Сплошные линии – сглаживание с шагом 10

Консервативные газы (озон и углекислый газ) имеют сравнительно постоянную концентрацию в воздухе п. Баренцбург, небольшие колебания их содержания обуславливаются атмосферной циркуляцией. Например, концентрация озона незначительно колеблется в течение суток, и изменяется в зависимости от атмосферного давления (в противофазе), что в свою очередь связано с интенсивностью ветровых переносов.

Максимальные концентрации озона наблюдаются ранней весной, а минимальные – в конце лета (рис. 8.3).

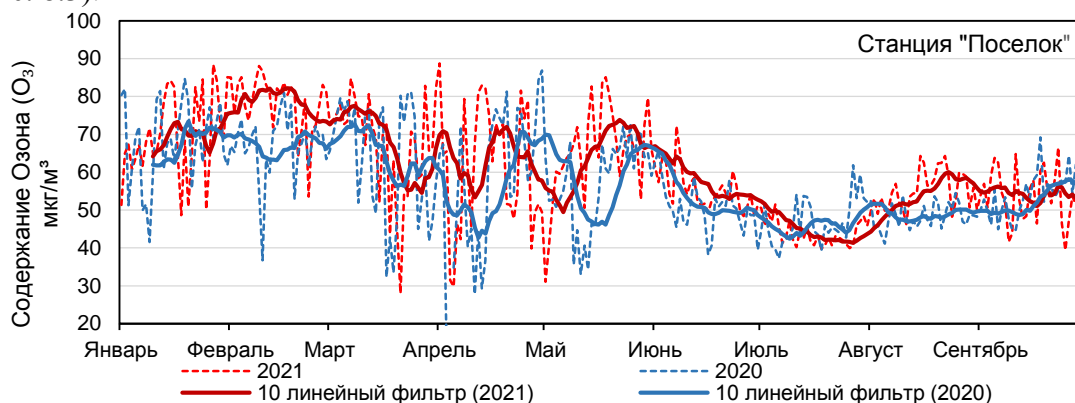


Рисунок 8.3 – Содержание озона в воздухе на станции «Поселок» с января по сентябрь 2020 и 2021 гг. Сплошные линии – сглаживание с шагом 10

Содержание газообразной ртути в приземном воздухе Баренцбурга находится на фоновом уровне (пределе регистрации прибором), что связано с отсутствием источников ртути за исключением многолетнемерзлых пород в период оттаивания.

Сбор данных со станций ККАВ продолжается, однако требуется доработка программного обеспечения системы сбора информации для более эффективного слежения за состоянием оборудования и оценки и отбраковки получаемых данных. Кроме того, требуется налаживание терморегуляции балков с целью обеспечения бесперебойной правильной работы анализаторов газовых примесей.

#### *Накопление тяжелых металлов в трофической цепи (бентосных организмах) заливов Исфюрда и береговых экосистемах (совместно с ММБИ РАН)*

Несмотря на видимую ненарушенность природной среды, загрязняющие вещества поступают в наземные экосистемы арх. Шпицберген не только из других районов Земли (Расуна et al. 2010), но и от локальных источников (Granberg et al. 2010). На арх. Шпицберген представлены различные виды антропогенного влияния на природные экосистемы: поселки с развитой инфраструктурой, угледобывающие шахты, теплоэлектростанции на угольном топливе, свалки и полигоны, растущие потоки туристов и грузов (АМАР 2005). В морские экосистемы экотоксиканты, в частности тяжелые металлы, поступают в основном с поверхностным стоком, а также из атмосферных выпадений, с аэрозолем и напрямую от источников загрязнения (морской транспорт). Тяжелые металлы и в особенности их органические формы (например, метилртуть) являются опасными экологическими токсикантами (Furness et al. 1990, Wiener 2013).

В 2021 г. был продолжен анализ содержания тяжелых металлов и ртути в образцах бентоса, отобранных сотрудниками ММБИ РАН с борта НИС «Дальние Зеленцы» осенью 2019 г. в целях оценки аккумуляции тяжелых металлов на разных уровнях трофической цепи, а также в различных частях организмов. Всего в лабораторию было передано 97 проб биоты, 29 из которых были проанализированы в 2020 г. Из оставшихся 68 проб были сформированы 248 образцов и проанализированы в 2021 г. на содержание 13 тяжелых металлов в два этапа:

- подготовка образцов методом микроволнового разложения с использованием установки TopWave Jena Analytik;
- анализ атомно-адсорбционным спектрофотометром Shimadzu AA7000 методами электротермической атомизации и атомизации в пламени.

Всего сотрудниками химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш было проведено 3224 измерения. Данные, полученные в результате анализа, переданы ММБИ РАН в виде стандартного протокола. Анализ данных ведется совместно сотрудниками ММБИ РАН и ААНИИ.

Литература:

- AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic, 2005.
- Furness R., Thompson D., Walsh P. Evidence from biological samples for historical changes in global metal pollution// Heavy metals in the marine environment, 1990. P. 219–226.
- Granberg M. E., Ask A., Gabrielsen G. W. Local contamination in Svalbard: overview and suggestions for remediation actions. – NorskPolarinstitutt, 2017. – 49 p.
- Пасына Е.Г., Пасына J.M., Sundseth K., Munthe J., Kindbom K., Wilson S. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020// Atmospheric Environment, 2010. V. 44(20), p. 2487–2499.
- Wiener J.G. Mercury exposed: advances in environmental analysis and ecotoxicology of a highly toxic metal// Environ. Toxicol. Chem, 2013. V. 32, p. 2175–2178.

*Разработка методик анализа и поиск новых загрязняющих веществ на архипелаге Шпицберген. Изучение факторов, влияющих на распределение и разложение сложных органических загрязняющих веществ*

В 2019–2020 гг. в лаборатории РАЭ-Ш в п. Баренцбург были начаты исследования по поиску новых загрязняющих веществ в природных средах арх. Шпицберген. В качестве исследуемых веществ были выбраны перфторированные кислоты (PFAS), которые широко используются в промышленных масштабах в качестве поверхностно-активных веществ, пенообразователей и замасливателей и попадают в арктическую среду как в результате трансграничного переноса, так и из локальных источников. Перфторированные кислоты устойчивы к трансформации под воздействием окружающей среды и обладают способностью к биомагнификации в живых организмах.

В 2020 г. была начата работа по стандартной практике валидации аналитической методики с использованием хромато-масс-спектрометра LCMS-8040 Shimadzu с тройным квадруполом. Первичная валидация аналитической методики для перфторированных соединений в биоте проводилось по критериям: повторяемость, прецизионность, линейность, правильность, предел обнаружения, предел количественного определения и влияние эффекта природной матрицы.

Анализ результатов работы за 2020 г. выявил ряд технических недочетов, связанных как с работой оборудования, так и интерпретацией полученных данных. В 2021 г. было проведено техническое обслуживание хромато-масс-спектрометра LCMS-8040 Shimadzu силами сотрудников химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш при удаленной поддержке сервис-инженеров официального дистрибьютера оборудования ООО «Аналит продактс». По окончании технического обслуживания прибор был проверен по критериям оптимизации, чувствительности и воспроизводимости по стандарту резерпин. Полученные результаты проверки чувствительности можно считать приемлемыми.

С использованием новых стандартов PFAS: PFAC-MXC/3,7-diMePFOA/MPFAC-C-ES были проведены процедуры:

- расчетным способом получено теоретическое значение квантора и спецификаторов новых перфторированных соединений в составе стандартного образца;
- оптимизация в проточно-инжекционном режиме с подтверждением теоретических расчетов;
- оптимизация инъекции стандартных образцов по объему и длительности времени прохода через хроматографическую колонку;
- определение времен удержания новых PFAS в составе стандартных образцов;
- построение калибровочных кривых для 35 PFAS;
- по результатам построения калибровочной кривой определен рабочий диапазон концентраций, а также время хранения калибровочных растворов;
- создано руководство оператора для калибровки и оптимизации LCMS-8040 Shimadzu для определения перфторированных кислот.

Анализ международного опыта изучения перфторированных кислот в Арктике показал, что проведение экологического мониторинга перфторированных соединений оправдано только для анализа матриц, отобранных в областях антропогенной деятельности (питьевая вода, сточные воды, продукты питания, воздух, плазма крови и т.п.). Фоновый мониторинг интересен с точки зрения сбора статистических данных, поиска новых видов PFAS и рутинных измерений для участия в межлабораторных испытаниях.

Первоначальный мониторинг PFAS можно ограничить выбранным ранее направлением длинноцепочечных перфторированных кислот и сульфокислот с дополнительным акцентом на поиск короткоцепочечных реагентов, в частности PFAS и PFOS (FOSAs и FOSEs), разветвленные изомеры PFOS. В дальнейшем акцент следует смещать в сторону поиска таких соединений как перфторалкансульфонамидоэтанола (FASEs), фтортеломерные акрилаты (FTAs), фтортеломерные карбоновые кислоты (FTCAs), фтортеломерные сульфоновые кислоты (FTSAs), фтортеломерные иодиды (FTIs), фтортеломерные спирты (FTOHs). Так как временное расхождение развития методик определения и последующего экологического мониторинга соединений на материковой части и в арктических широтах составляет 4–6 лет, такой подход позволит готовиться к вводу новых методик в числе одной из первых лабораторий, расположенных непосредственно в Арктике.

Перфторированные соединения имеют тенденцию к накоплению в биоте, а доля известных PFAS в абиотических образцах окружающей среды находится на уровне обнаружения современных аналитических методик. Поэтому среди исследуемых матриц следует выбрать направление в порядке увеличения весомости исследований: сточные воды < воздушные экстракты < плазма крови (в т.ч. животных). С точки зрения анализа морских биоресурсов интерес представляют целевой мониторинг продукции рыболовного промысла и фоновый мониторинг пищевой цепочки в прибрежной области.

Мероприятие 8 выполнено полностью.

## **Мероприятие 9. Работы по линии международного сотрудничества на арх. Шпицберген**

### *1. ААНИИ: Участие в работе международных форумов*

- Участие во регулярном форуме SSF (Svalbard Science Forum) представителей научных организаций, работающих на Шпицбергене 28 апреля и 6-7 октября 2021 г. (ВКС);
- Участие в международном междисциплинарном семинаре «Исследования снега на Шпицбергене» (Multidisciplinary workshop on snow research on Svalbard) о состоянии изученности снежного покрова архипелага Шпицберген и перспективах развития дальнейших исследований 1-5 февраля 2021 г. В режиме ВКС. Участники совместно формировали координированную программу будущих исследований снежного покрова (как для исследователей, регулярно присутствующих на архипелаге, так и не имеющих опыта работ на архипелаге) исходя из современной изученности и наиболее актуальных научных направлений.
- Участие в международной «Конференции по исследованию Шпицбергена» (SSC-2021), которая прошла в г. Осло 2-3 ноября 2021 г. сотрудников российских организаций не состоялось в связи с действием ограничительных мер на въезд в Норвегию. Всего на участие в конференции было принято 7 заявок от российских участников первыми авторами и 6 в качестве соавторов в международных докладах. Сотрудник ФГБУ «ААНИИ» Никулина А.Л. входила в научный комитет конференции. Представители ИФА им. А.М.Обухова РАН, ПАБСИ КНЦ РАН и ММБИ РАН удаленно участвовали в сопутствующем семинаре по исследованию Шпицбергена, организованной Ассоциацией молодых полярных исследователей (APECS).



*2. UNIS (Норвегия), Технологический университет Гданьска (Польша), Геофизический институт (Польша), Центральная школа Лиона (Франция), ААНИИ (Россия), Институт исследования воздуха (Норвегия), Университет Познани (Польша): Гармонизация экологических исследований и мониторинга приоритетных загрязняющих веществ в воздухе Шпицбергена*

Первый семинар по проекту состоялся в режиме ВКС 6-7 октября 2021 г. На семинаре участниками из Норвегии, Польши, Германии, Италии, Чехии, Франции, Японии обсуждались текущее состояние изученности загрязнения воздушного аэрозоля на архипелаге Шпицберген, методики отбора аэрозоля для определения содержания различных загрязняющих вещества и анализа отобранных образцов с целью выработки единого протокола отбора и анализа для унификации и оптимизации исследований на архипелаге и в Арктике в целом. Начат сбор материалов для обзорной статьи в отчет о состоянии природной среды Шпицбергена. Второй практический семинар на базе химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш в п. Баренцбург запланирован на август 2022 г.

*3. СЗФ «НПО «Тайфун», Норвежский институт водных исследований (NIVA): Гармонизация методов оценки микропластика в морской среде в Арктике (HAMPSTER)*

Основная цель проекта заключается в обмене сторонами опытом в области анализа микропластика и создании исходных условий для согласования методов оценки, количественной оценки и идентификации морских микропластиков, а также создания условий для будущего сотрудничества Норвегии и России в области морских исследований в Арктическом регионе.

В рамках выполнения проекта сотрудники СЗФ ФГБУ «НПО «Тайфун» приняли участие в экспедиционных работах, направленных на исследования загрязнения микропластиком природной среды Шпицбергена, которые проводились в заливах Адвентфьорд, Гренфьорд и Исфьорд в период с 1 по 6 июля 2021 г. на базе Университетского Центра на Шпицбергене.

Мероприятие 9 выполнено частично.

## ФГБУ «Мурманское УГМС»

### Мероприятие 10. Проведение регулярных наблюдений на базе гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург»

В период с 01.01.2021 года по 31.12.2021 года наблюдения за гидрометеорологическими параметрами окружающей среды выполнялись специалистами ФГБУ «Мурманское УГМС» на базе гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» круглогодично. Общее количество человеко-дней, проведенных сотрудниками ФГБУ «Мурманское УГМС» на архипелаге Шпицберген в 2021 году составило 2631 ч/дней.

Основные результаты наблюдения за гидрометеорологическими параметрами окружающей среды в 2021 году:

#### 1. Метеорологические наблюдения

Метеорологические наблюдения проводились 8 раз в сутки в стандартные сроки. Наблюдения проводились за температурой воздуха и подстилающей поверхности, метеорологической дальностью видимости, количеством, формой и высотой облачности, атмосферным давлением, влажностью воздуха, атмосферными явлениями, высотой снежного покрова. Всего по программе станции было выполнено 2920 комплексных наблюдений.

*Климатические особенности 2021 года на архипелаге Шпицберген по данным ГМО Баренцбург:*

В архивном фонде данных Мурманского УГМС накоплен огромный объем первичной информации о состоянии окружающей среды на архипелаге Шпицберген. Длительные ряды регулярных метеорологических наблюдений позволяют наиболее точно оценивать тенденции происходящих климатических изменений. Анализ данных изменения аномалий средней годовой температуры воздуха на архипелаге Шпицберген подтверждает увеличение скорости повышения средней температуры воздуха в последние десятилетия. Наибольшее повышение средней месячной температуры воздуха отмечается в зимние месяцы. Не стал исключением и 2021 год.

#### Температура воздуха

По данным метеорологических наблюдений на гидрометеорологической обсерватории Баренцбург отклонение средней месячной температуры воздуха за девять месяцев 2021 года составило 3,3 °С (рис. 11.1), что выше прошлогоднего значения на полтора градуса.

Наибольшие отклонения средней месячной температуры воздуха от климатической нормы отмечались в холодный период с января по апрель включительно. В целом зима 2020-2021 (период с октября 2020 года по апрель 2021 года) была выше климатической нормы на 5,5°С. Наибольшее отклонение средней месячной температуры воздуха отмечалось в феврале и составило плюс 8,3°С.

Такие высокие значения средней сезонной температуры воздуха в Баренцбурге стали отмечаться чаще в последние десятилетия. В XXI веке повторяемость теплых зим со средней сезонной аномалией 5°С и более составила 38%.

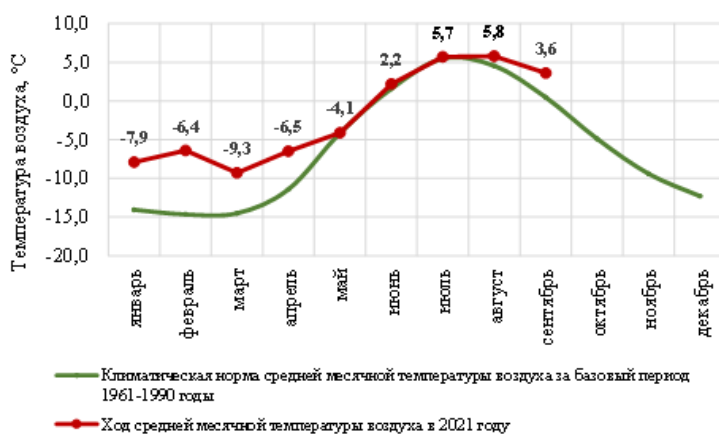


Рисунок 11.1 – Ход средней месячной температуры воздуха (°C) в 2021 году в сравнении с климатической нормой

В 2021 году положительная аномалия средней сезонной температуры воздуха отмечалась во все сезоны года, только весна (май) – соответствовала климатической норме, лето – выше климатической нормы на 0,7°С, осень (сентябрь) – на 3,1°С.

(Период с октября по апрель включительно полностью относится к сезону – зима; май был отнесен к сезону – весна; период июнь – август относится к сезону – лето; сентябрь – осень).

#### Осадки

За девять месяцев 2021 года количество выпавших осадков в Баренцбурге составило 73% от своей годовой нормы (рис.11.2).

Наименьшее месячное количество осадков отмечалось в мае (17 мм или 63% от климатической нормы) и в августе (24 мм или 62% от климатической нормы). Наибольшее количество осадков – в сентябре, когда за месяц выпало более 90 мм осадков или 175% от климатической нормы.

#### Опасные явления

За 9 месяцев 2021 года наблюдалось 8 случаев с очень сильным ветром (25 м/с и более). 5 января 2021 года отмечался ветер в порывах до 33 м/с.

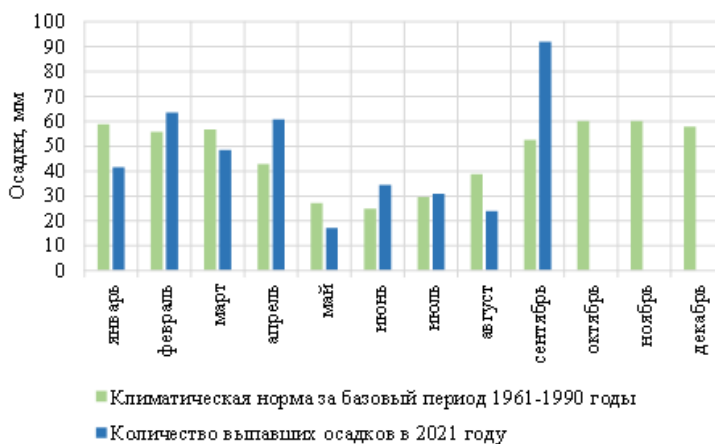


Рисунок 11.2 – Количество выпавших осадков (мм) в 2021 году в сравнении с климатической нормой

### 2. Морские гидрометеорологические наблюдения и работы

На станции проводились:

- наблюдения над уровнем моря по футштоку в 06, 12, 18 ВСВ и по мареографу ежечасно;
- наблюдения над волнением визуально в 06, 12, 18 ВСВ;
- ледовые наблюдения в заливах Гренфьорд и Исфьорд с измерением характеристик ледяного покрова в постоянной точке (толщина льда, глубина его погружения, высота и плотность снежного покрова на льду);
- наблюдения за видимостью в сторону моря - ежедневно в 06, 12, 18 ВСВ.
- определение плотности и солёности морской воды ареометрированием 1 раз в сутки в 12 ВСВ;
- измерение температуры воды ежедневно в 06, 12, 18 ВСВ.

Всего проведено 1095 комплексных наблюдений.

### 3. Радиационный мониторинг

В п. Баренцбург производилось ежедневное измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) на расстоянии 1 м от поверхности – выполнено 365 измерения.

Данные передавались в МТ АСКРО – Мурманскую территориальную автоматизированную систему контроля радиационной обстановки. По данным наблюдений ГМО Баренцбург радиационный фон (мощность экспозиционной дозы на местности) изменялся в пределах колебаний природного фона от 0,08 до 0,14 мкЗв/час.

### 4. Геофизические наблюдения

Актинометрические наблюдения производились ежедневно в светлое время суток по пиранометру М-80 (измерение суммарной солнечной радиации) с записью на интегратор Х-607. Было проведено 365 наблюдений.

Измерения общего содержания озона в атмосфере выполнялись в светлое время суток озонометром М-124. Количество телеграмм с результатами измерений составило 365.

Производство измерений часовой амплитуды изменения горизонтальной компоненты геомагнитного поля – 8760 часов.

Измерение трехчасового К-индекса возмущенности геомагнитного поля – 2920 часов.

Регистрация уровня космического радиоизлучения на частоте 30 МГц с оперативной передачей данных в прогностические организации Росгидромета для диагностики и прогнозирования условий коротковолновой радиосвязи в Арктическом регионе – 8760 часов.

Определение периодов аномального поглощения радиоволн – 365 сроков.

Зарегистрировано 110 магнитных бурь.

Учитывая, что архипелаг Шпицберген расположен в области активного взаимодействия земной атмосферы с частицами солнечного ветра, где происходит зарождение ионосферно-магнитных бурь, ценность оперативной геофизической информации велика. Геофизические данные Баренцбурга входят составной частью в диагностические и прогностические материалы МЦ МГФО.

Ежесуточная геомагнитная и риометрическая информация передавалась в Гелиогеофизический Центр Росгидромета, Мурманский Центр мониторинга геофизической обстановки, отдел геофизики ФГБУ «ААНИИ».

#### *5. Прочее*

Материалы наблюдений ГМО Баренцбург обработаны, результаты занесены в климатическую базу данных. Объем полученной информации за 2021 год составил 0,1 Гб.

Осуществлялась оперативная передача метеорологических данных ГМО Баренцбург в прогностические организации Росгидромета.

ГМО Баренцбург включена в публикацию ВМО № 9 Том С1 для международного обмена.

Проведенные регулярные гидрометеорологические наблюдения на базе ГМО Баренцбург актуальны для обеспечения безопасности мореплавания. Продолжалось изучение климатических изменений в арктической зоне и развитие научных исследований по изучению климатических изменений арктического бассейна.

Оперативная гидрометеорологическая информация ГМО Баренцбург использовалась специалистами Гидрометцентра ФГБУ «Мурманское УГМС» для составления прогнозов и предупреждений о неблагоприятных и опасных (ОЯ) гидрометеорологических явлений по всей зоне ответственности Мурманского УГМС (как морской, так и материковой). Наибольшее число ОЯ (сильный снег, метель, штормовой ветер, быстрое обледенение судов) связано с циклонами, формирующимися в Гренландском море и углубляясь стремительно смещающимися на юго-восток Баренцева моря.

#### *Предложения*

В целях изучения и прогнозирования гидрометеорологических и геофизических процессов, происходящих в атмосфере и океане, климатических изменений Арктического региона; укрепления позиции российского присутствия на архипелаге Шпицберген продолжить в 2022 году проведение регулярных наблюдений на базе гидрометеорологической обсерватории Баренцбург.

Мероприятие 11 выполнено полностью.



## ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ФГБУ «ААНИИ»

### Мероприятие 11. Фоновый и локальный экологический мониторинг в районах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген

В рамках реализации задач мероприятия Северо-Западным филиалом ФГБУ «НПО «Тайфун» в 2021 г. выполнялись исследования на архипелаге Шпицберген, включающие работы по фоновому и локальному экологическому мониторингу загрязнения объектов природной среды в районе поселка Баренцбург и его окрестностях, в том числе акватории и побережья залива Грэнфьорд и обследование состояния загрязнения природной среды в районе п. Пирамида.

Исследования проводятся в соответствии с планом НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг., тема 4.3.3 «Оценка состояния и тенденций изменения загрязнения природных сред Арктической зоны Российской Федерации».

Результаты работ могут быть использованы государственными и коммерческими организациями, ведущими и планирующими работы, связанные с добычей ресурсов и транспортными перевозками, а также в информационных обзорах, связанных с исследованием изменений климата в Арктическом секторе Северо-Атлантического региона.

Цели работы:

- оценка состояния загрязнения компонентов окружающей природной среды (атмосферного воздуха, снежного покрова, морских вод и донных отложений, вод и донных отложений водоёмов суши, почвенных вод, почв и растительного покрова) на территориях и в ближайших окрестностях посёлков Баренцбург и Пирамида, других объектов инфраструктуры, включая сопредельные территории и акватории заливов.
- выявление источников загрязнения природной среды на территории действующих и ликвидированных производственных объектов, локализация, паспортизация, оценка их степени опасности.

К основным задачам относились:

- организация и проведение отбора проб компонентов природной среды в районе п. Баренцбург и п. Пирамида с прилегающими акваториями залива Грэнфьорд и бухты Петунья, соответственно;
- выполнение химико-аналитических и других лабораторных исследований отобранных образцов и проб компонентов природной среды в химико-аналитической лаборатории РАЭ-III ФГБУ «ААНИИ» (п. Баренцбург) и базовой лаборатории Северо-Западного филиала ФГБУ «НПО «Тайфун» (г. Санкт-Петербург).

*Полевые работы*

Полевые работы включали отбор проб атмосферного воздуха и атмосферного аэрозоля; снежного покрова на территории п. Баренцбург и Пирамида и фоновых районов; морских поверхностных и придонных вод; морских водных взвесей на акватории залива Грэнфьорд и бухты Петунья (залив Исфьорд), поверхностных вод озера Стемме и реки Грендалсельва, долина которой расположена южнее поселка Баренцбург, почвенных вод, почв, растительного покрова.

На всех точках опробования выполнялись сопутствующие метеорологические наблюдения, включавшие измерение следующих метеопараметров: скорости и направления ветра, атмосферного давления, температуры воздуха, видимости, количества и формы облачности, наличия и количества осадков.

На водных станциях дополнительно проводились наблюдения за состоянием водной поверхности, включающие визуальные наблюдения за наличием и интенсивностью плавающих пятен и пленок, скоплений отмирающих водорослей, появления повышенной мутности воды, пены и др.

Производились маршрутные визуальные наблюдения за состоянием поверхностного слоя почвы, размерами и характером зон нарушенности, наличием и месторасположением свалок мусора, и другими нарушениями компонентов природной среды.

Работы выполнялись специалистами Северо-Западного филиала ФГБУ «НПО «Тайфун»:

- Кропотов М.Ю. – начальник отряда;
- Рыбалко И.А. – вед. инженер- эколог;
- Голяков А.М. – вед. инженер- химик.

#### *Зимне-весенний этап*

Полевые работы проведены в период с 17 апреля по 25 мая на 14 наземных и 1 водной точке геоэкологического опробования в районах п. Баренцбург и его окрестностях, оз. Стемме, р. Грендалсельва, мыса Дрессельхус, восточном склоне г. Стурхеда, северо-восточном склоне г. Гренфьордфьеллет, районе вертолетной площадки, на которых произведен отбор проб (образцов) для определения содержания загрязняющих веществ:

- 14 проб снежного покрова;
- 2 пробы озерной воды;
- 42 фильтра для определения содержания твердых частиц в снежном покрове;
- 6 фильтра для определения содержания водных взвесей в озерной воде;
- 9 проб атмосферного аэрозоля на фильтрах АФА.

#### *Летний этап*

Летние полевые работы проведены с 10 июня по 8 июля на 20 наземных и 16 водных точках геоэкологического опробования в районе п. Баренцбург, п. Пирамида, оз. Стемме, заливах Гренфьорд и Биллефьорд, на которых произведен отбор проб (образцов) для определения содержания загрязняющих веществ:

- 40 проб почвы;
- 20 проб растений;
- 16 проб донных отложений;
- 24 пробы морской воды;
- 5 пробы озерной воды;
- 2 пробы речной воды;
- 9 проб почвенной воды;
- 144 пробы водной взвеси;
- 12 проб атмосферного аэрозоля на фильтрах АФА.

В лаборатории были произведены следующие анализы:

Определение массовой концентрации ртути, основанное на перманганатной минерализации пробы с последующим восстановлением ртути раствором хлорида олова (II) до металла, переносе паров ртути в аналитическую кювету анализатора РА-915М током воздуха (метод «холодного пара») и измерении атомного поглощения ртути на резонансной длине волны 253,7 нм.

Определение общего содержания нефтепродуктов выполнялось флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02-3М» фирмы «Люмэкс». Пробы экстрагировали 10 мл гексана в делительной воронке объемом 250 мл, экстракты переносили в измерительную кювету и производили измерения.

Определение содержания компонентов минерального состава (нитраты, хлориды, сульфаты, натрий, калий, кальций, магний, аммоний) выполнялось с помощью

аналитической системы на базе высокоэффективного жидкостного хроматографа Shimadzu LC-20 с кондуктометрическим детектором. Пробы для проведения анализа предварительно фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм.

Определение содержания общего азота и общего углерода выполнялось с помощью анализатора общего углерода TOC- Lcsh с приставкой TNM-L (TN, TC, IC, NPOC).

Определение содержания растворенной кремниевой кислоты, нитритов, фосфатов, общего фосфора проводилось с помощью спектрофотометра «Shimadzu» UV-1800 с проточной и непроточной кюветами.

Определение удельной электропроводимости, солености и минерализации проводилось на кондуктометре Seven Compact S220 Mettler Toledo, щелочность измерялась методом титрования с помощью автоматического титратора T70 Mettler Toledo.

Подготовлены к транспортировке в лабораторию Северо-Западного филиала ФГБУ «НПО «Тайфун» (г. Санкт-Петербург):

- пробы воды для определения содержания ПАУ, ХОС, ТМ: Итого 192 образца.
- пробы почвы и донных отложений. Итого 56 образцов.
- пробы наземной растительности. Итого 20 образцов.
- фильтры с водными взвешьями. Итого 192 фильтра.
- фильтры с пробами атмосферного аэрозоля. Итого 21 фильтр.

По окончании лабораторных исследований, полученные данные будут обобщены и представлены в аналитическом обзоре о состоянии природной среды в районе деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген.

В рамках выполнения международного проекта «Harmonization of methods of marine microplastic assessment in the Arctic (HAMPSTER)» сотрудники СЗФ ФГБУ «НПО «Тайфун» приняли участие в экспедиционных работах, направленных на исследования загрязнения микропластиком природной среды Шпицбергена, которые проводились в заливах Адвентфьорд, Гренфьорд и Исфьорд в период с 1 по 6 июля 2021 г.

За 2021 год Северо-Западным филиалом ФГБУ «НПО «Тайфун» опубликована статья:

Frumin G.T., Demeshkin A.S. Environmental and toxicological assessment of the quality of water in the lake Bienda-Stemme (Western Spitsbergen) // Russian Journal of General Chemistry. 2020. Т. 90. № 13. С. 2619-2621.

Готовится к печати статья в рецензируемом журнале «Арктика: экология и экономика».

Мероприятие 12 выполнено полностью.

**Мероприятия Роснедр**  
**ФГБУ «ВНИИОкеангеология»**

**Мероприятие 12. Региональные геолого-геоморфологические исследования в рамках программы по составлению комплекта карт и схем геологического содержания масштаба 1:1 000 000 архипелага Шпицберген**

Основная цель исследований состоит в оценке среднемасштабной геологической изученности архипелага Шпицберген, сборе материалов и подготовке к созданию комплекта актуализированных карт и схем геологического содержания масштаба 1:1 000 000 архипелага Шпицберген. Заказчик – ФГБУ «ВНИИОкеангеология», исполнитель – АО «ПМГРЭ». Специалисты, принимавшие участие в работах: Милославский М.Ю., начальник партии (m.miloslavskiy@mail.ru), Сироткин А.Н., главный геолог (pechenga-67@yandex.ru), Окунев А.С., геолог 1 категории (geoalex26@gmail.com), Шарин В.В., ведущий геолог (sharin\_v@mail.ru).

Основные геологические задачи летних полевых исследований 2021 года:

- составление предварительных карт геологического содержания масштаба 1:100 000 на ключевые опорные участки в пределах северного побережья Исфьорда
- создание эталонной коллекции горных пород разновозрастных структурно-формационных и магматических комплексов Шпицбергена.

Полевая группа в составе 6 человек работала на Шпицбергене с 31 июля по 21 сентября 2021 года на следующих природных объектах: а) восточная часть Земли Диксона; б) район Экманфьорда; в) участок Тундры Богемана; г) район Эйдембухты. Доставка полевых групп к месту полевых работ осуществлялась морским транспортом (катер «Баренцбург» и баржа «Пирамида» ГТ «Арктикуголь») (рис.12.1). Полевыми исследованиями руководил Сироткин А.Н. (pechenga-67@yandex.ru). В районе Экманфьорда исследования проводились совместно со специалистами ИА РАН.

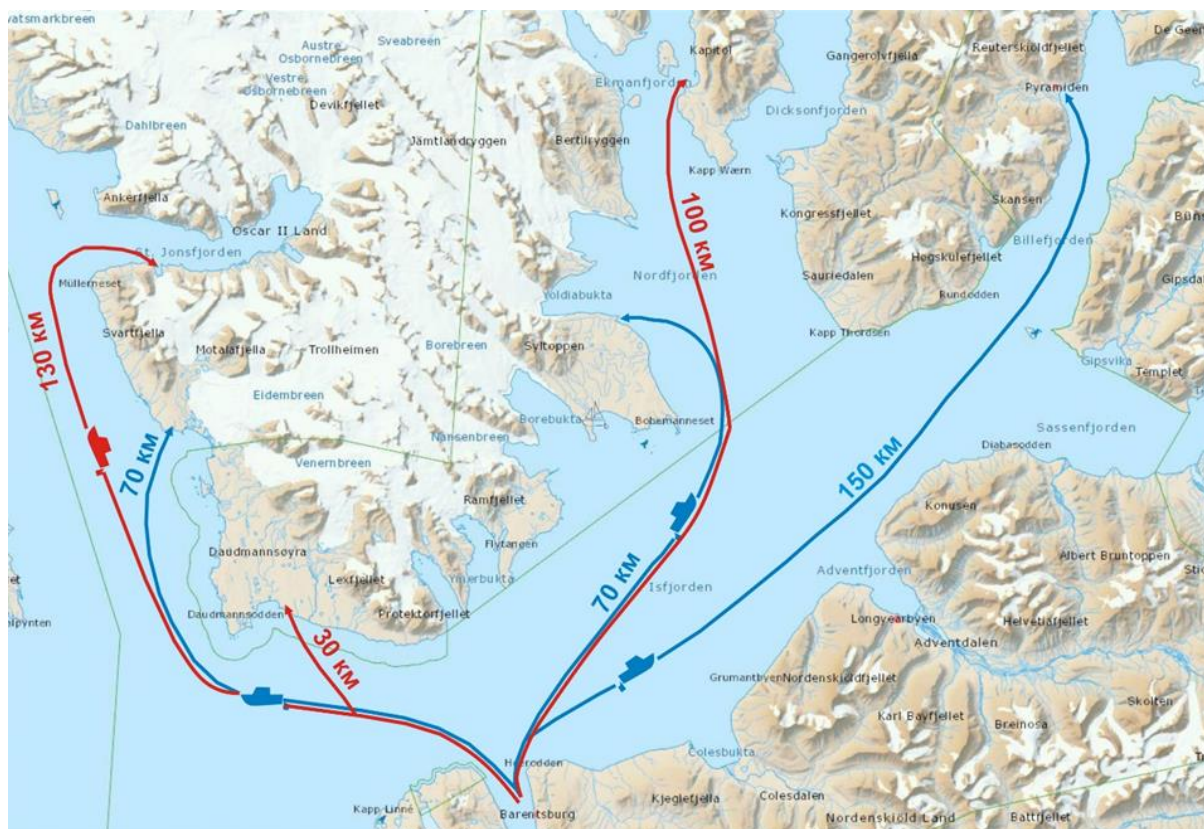


Рисунок 12.1 – Схема организации полевых работ 2021 года полевой партии ФГБУ «ВНИИОкеангеология»

Полевые исследования проходили в виде наземных и лодочных маршрутов и включали: геологические ревизионно-увязочные маршруты, шлиховые маршруты, специализированные геолого-геоморфологические исследования, комплекс опробования (геохимическое, минералогическое, шлиховое, палеонтологическое, геохронологическое). Во время полевых работ составлялась предварительная эталонная коллекция образцов горных пород Шпицбергена.

Основные полученные результаты:

1. Составлены предварительные карты геологического содержания масштаба 1:100 000 для ключевых районов Шпицбергена:

- геологическая, геоморфологическая карты и карта четвертичных отложений восточной части Земли Диксона;
- геологическая, геоморфологическая карты и карта четвертичных отложений юго-восточной части Земли Оскара II;
- геологическая карта района Эйдембухты.

2. Собран материал для уточнения особенностей геологического строения архипелага Шпицберген, в том числе:

- реконструкции условий формирования, времени и степени метаморфизма, тектонической позиции метаморфических серий Атомфьелла (восточная часть Земли Диксона) и Вестготабреен (район Эйдембухты, гора Мотала);
- петрологических характеристик и абсолютного возраста магматических комплексов изученных районов: среднепалеозойского субщелочных гранитоидов и лампрофиров (восточная часть Земли Диксона); ранне-среднерифейского метагабброидов (восточная часть Земли Диксона) и позднепротерозойского метабазитов (район Эйдембухты);
- внутреннего строения и кинематических характеристик Биллефьордской зоны глубинных разломов;
- генетических типов четвертичных осадков и их возраста;
- минерагенической характеристики изученных районов архипелага.

3. Определены характер, особенности и возраст рельефообразующих процессов в пределах изученных районов.

4. Сформирована предварительная (начальная) эталонная коллекция горных пород архипелага и составлен её предварительный каталог.

Помимо полевых исследований сотрудники «ВНИИОкеангеология» провели экскурсию по геологическому музею (находится в здании бывшей базы ПМГРЭ) и прочитали лекцию по геологии Шпицбергена для жителей п. Баренцбург.

Мероприятие 12 выполнено полностью.



## Мероприятия организаций Минобрнауки

### ФГБУН Институт географии Российской академии наук (ИГ РАН)

#### Мероприятие 13. Исследование изменчивости природных и антропогенных ландшафтов архипелага Шпицберген в условиях современного климата

Основной целью исследований является оценка современной изменчивости природных и антропогенных ландшафтов архипелага Шпицберген. В 2021 г. основные цели и задачи исследования были следующие:

1. Изучение абляции на реперных ледниках Земли Норденшельда (о. Западный Шпицберген) для количественной оценки реакции оледенения Западной Арктики на современные климатические условия;

2. Влияние метеорологических условий на теплоперенос в системе атмосфера-поверхностный покров-грунт на разных высотных уровнях и при разных погодных условиях;

3. Исследование свойств почв, формирующихся на криоконитовом материале в перигляциальной зоне быстротающих ледников оценка вклада углерода «ледникового» происхождения в почвообразование;

4. Дендрохронологические работы по сбору образцов плавника в юго-западной части архипелага на побережье и в пределах морских террас (в юго-западной части архипелага, в том числе в пределах Гренфьорда, Адвентдален (район Лонгйирбюена), мыса Старостина (Исфьорд).

5. Обследование приледниковых озер для изучения возможности образования прорывных паводков при дальнейшем потеплении и оценки получения палеолимнологических данных.

Полевые исследования выполняли семь сотрудников ИГ РАН, включая 3-х молодых специалистов. Работы проводились с 10 августа по 27 сентября 2021 г. Исследования выполняли: руководитель работ Осокин Н.И. (osokin@igras.ru), снс кгн Чернов Р.А., (chernov@igras.ru), снс кгн Мавлюдов Б.Р. (bulatrm@bk.ru), нс кгн Александрин М.Ю. (anothergeometry@gmail.com), нс кгн Кузнецова В.В. (kuznetsova@igras.ru), инж-исследователь Лукьянов К.В., инж. Насыров А.Н.

Основные результаты исследований в 2021 г.:

1. Измерение величины абляции на леднике Восточный Гренфьорд показало, что даже в прохладное лето (2021 г.) среднее таяние ледника достигает 2 м льда в год (рис. 13.1).

2. На основе натурных измерений и экспериментальных работ дана оценка влияния величины солнечной радиации, жидких осадков и параметров мха, включая его влажность, на термический режим сезонно-талого слоя грунта, что позволит уточнить математическую модель взаимодействия «атмосфера – снежный и моховый покровы – многолетняя мерзлота».

Исследование особенностей пространственной изменчивости величины сезонно-талого слоя и высотной динамики температурного режима грунта на криосферном полигоне (г. Улаф) для оценки условий деградации многолетней мерзлоты на архипелаге Шпицберген на основе анализа круглогодичных измерений температуры грунта на разных глубинах в точках на разной абсолютной высоте показало, что на абсолютных высотах до 70 м над у.м. при максимальной толщине снежного покрова более 1,5 м, многолетняя мерзлота находится в неустойчивом состоянии и не каждую зиму происходит промерзание сезонно талого слоя.

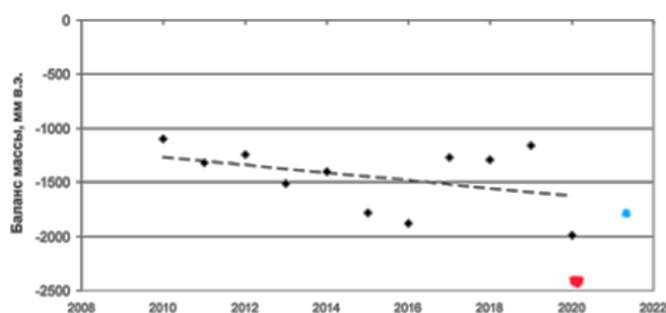


Рисунок 13.1 – Величина абляции на леднике Восточный Гренфьорд (красная точка – 2020 г., голубая – 2021 г.)

3. Выполнен анализ образцов криоконитов, отобранных на леднике Альдегонда и на моренах. Содержание органического углерода в образцах криоконита с поверхности ледника варьирует от 1,47 до 4,64%, азота – от 0,13 до 0,23%. В почвах на морене 16–18-летнего возраста содержание углерода достаточно монотонно по всему профилю в пределах от 1,90 до 2,54 %, азота – от 0,12 до 0,14%. Для почвы на морене 70-летнего возраста содержание углерода заметно меньше и меняется от 1,27 до 1,82%, содержание азота – от следовых концентраций до 0,14%. Почва на морене столетнего возраста и почва на морской террасе содержат 2,77 и 2,20% углерода в верхней части профиля и около 1% глубже по профилю, при этом содержание азота варьирует от 0,07 до 0,12%.

В целом, как содержание углерода, так и обеспеченность азотом в криоконитовом материале и в почве, формирующейся на молодой морене, больше, чем в почвах, развивающихся вне современной перигляциальной зоны (на столетней морене, на морской террасе). Также проведен отбор образцов криоконитов на леднике Восточный Гренфьорд на разных высотных уровнях для оценки высотной изменчивости их параметров.

4. Дендрохронологические исследования включали отбор 95 образцов древесины для построения хронологий по северу европейской территории России. Предварительное сканирование и анализ 60 образцов, отобранных ранее, позволили составить 2 плавающие хронологии S03A (198 лет) и S07A (219 лет). Это говорит о достоверном сходстве прироста древесины или о произрастании древостоя в похожих климатических условиях (Cook and Kairiūkštis 1990; Шиятов и др. 2000).

Известно, что для строительства на архипелаге зачастую использовали плавник, так как деревья, выброшенные арктическими течениями на берег, хорошо сохраняются и могли быть использованы в хозяйственных нуждах (Shumilov et al. 2020). Однако, предварительные результаты датирования хронологии S03A, составленной из образцов короба трубопровода в поселке Баренцбург, показывают, что древесина для его строительства, вероятнее всего, была завезена в середине 20 века (полученная дата – 1945 г.) из русской Арктики (бассейн реки Северная Двина) на корабле.

Результаты датирования плавника, отобранного на мысе Финнесет (S07A) показывают, что образцы с надежными коэффициентами датируются друг относительно друга и позволяют построить плавающую хронологию (рис. 13.2). Относительно хронологии Solovki (1185-2017 гг.) образцы датируются 1572 г. с наиболее высоким коэффициентом ( $t_{test}=4,6$ , общий период 219 лет), но датировку необходимо уточнять из-за ее низкой степени достоверности.

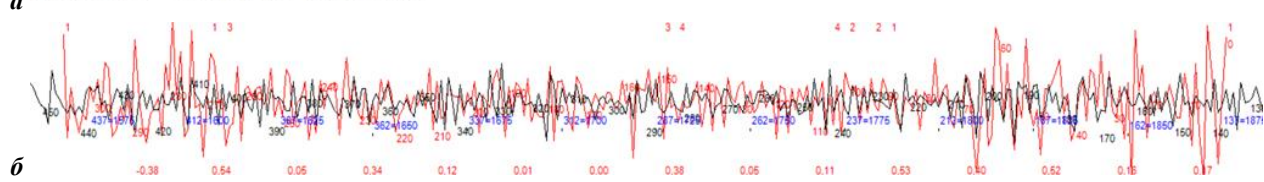
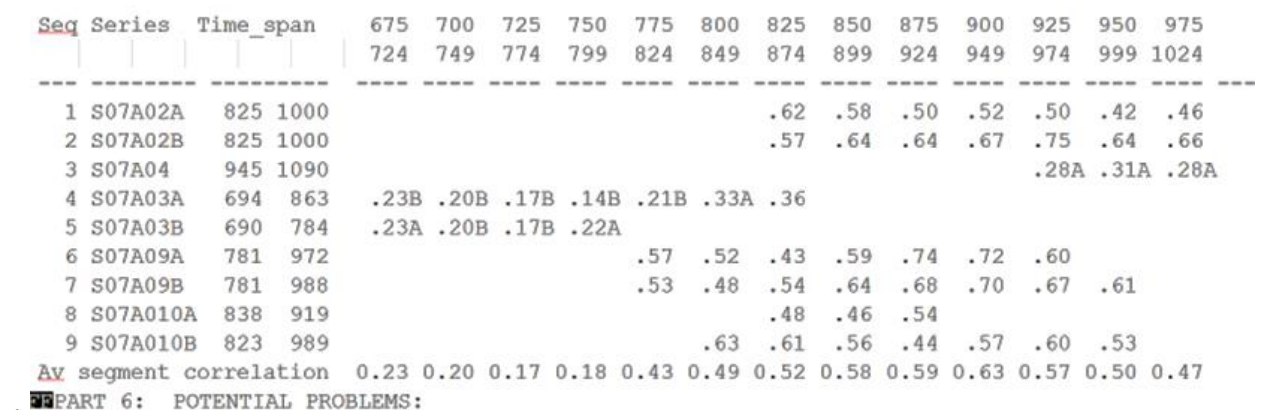


Рисунок 13.2 – (а) результаты датирования плавника в программе COFESHA, плавающая хронология S07A, (б) результаты датирования плавающей хронологии S07A (мыс Финнесет) по хронологии, составленной на основании образцов древесины хвойных пород Соловецкого архипелага

4. Измерение геометрических характеристик ряда приледниковых озер Земли Норденшельда позволило построить статистическую зависимость глубины озера от его площади. Эта зависимость характерна только для архипелага Шпицберген (рис. 13.2).

Дальнейшие результаты исследований на архипелаге Шпицберген в 2021 г. будут получены позднее после обработки всех собранных материалов.

По результатам исследований опубликованы следующие работы:

Singh, G., Lavrentiev, I.I., Glazovsky, A.F., Patil, A., Mohanty, S., Khromova, T.E., Nosenko, G., Sosnovskiy, A., Arigony-Neto, J. Retrieval of Spatial and Temporal Variability in Snowpack Depth over Glaciers in Svalbard Using GPR and Spaceborne POLSAR Measurements. *Water* 2020, 12, 21. DOI 10.3390/w12010021

Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка интенсивности замерзания капель соленой воды при зимнем дождевании // *Криосфера Земли*, 2021. Т.25, №1, с. 35-44 DOI 10.15372/KZ20210102

Котляков В.М., Сосновский А.В. Оценка термического сопротивления снежного покрова по температуре грунта. *Лёд и Снег*. 2021. 61(2). с. 195-205. DOI 10.31857/S2076673421020081

Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние метеорологических условий на теплоизоляционные свойства мохового покрова по данным измерений на Шпицбергене // *Криосфера Земли*, 2021, Т.25, №4, с. 17-25. DOI 10.15372/KZ20210402.

Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние снежного покрова на охлаждение поверхностного слоя ледника Восточный Грэнфьорд (Шпицберген). *Лёд и Снег*. 2021. 61(1). с. 75-88. DOI 10.31857/S2076673421010072

Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I. Mass balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, estimated by glaciological, geodetic and modeling approaches // *Geosciences* 2021. Vol.11, No2. P. 78–88. DOI 10.3390/geosciences11020078

Чернов Р.А., Ромашова К.В. Современное состояние приледниковых озер Шпицбергена // *Криосфера Земли* (в печати).

Зазовская Э.П., Мергелов Н.С., Шишков В.А., Долгих А.В., Добрянский А.С., Лебедева М.П., Турчинская С.М., Горячкин С.В. Криокониты как факторы развития почв в условиях быстрого отступления ледника Альдегонда, Западный Шпицберген // *Почвоведение*, 2022 (в печати).

#### Литература:

Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

Cook, E.R. and Kairiukstis, L.A. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences.* International Institute for Applied Systems Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990. 394 p. DOI 10.1007/978-94-015-7879-0.

Shumilov, O. I., Kasatkina, E. A., Krapiec, M., Chochorowski, J., Szychowska-Krapiec, E. Tree-ring dating of Russian Pomor settlements in Svalbard // *Dendrochronologia*, 2020. 62, 125721. DOI 10.1016/j.dendro.2020.125721

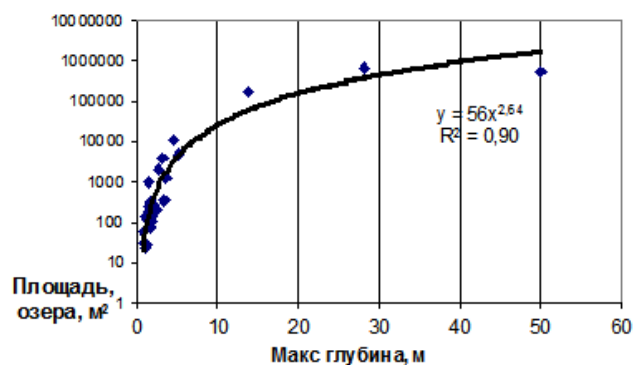


Рисунок 13.2 – Статистическая зависимость глубины озера в метрах от его площади в кв. метрах

**ФГБУН ФИЦ Кольский научный центр Российской академии наук (ФИЦ КНЦ РАН)**

**Мероприятие 14. Изучение минералогического разнообразия и минеральных фаз-концентраторов редких, радиоактивных и рассеянных элементов архипелага Шпицберген**

Мероприятие не выполнено в связи с невозможностью провести отбор полевого материала вследствие сохраняющихся ограничительных мер по предотвращению распространения коронавирусной инфекции.

**ФГБУН Мурманский морской биологический институт Российской академии наук  
(ММБИ РАН)**

**Мероприятие 15. Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген**

Фундаментальные научные и прикладные исследования на архипелаге Шпицберген в 2021 г. проводились согласно темы госзадания «Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген», а также в рамках Межведомственной программы научных исследований и наблюдений на архипелаге Шпицберген в 2021 году.

В рамках комплексных экосистемных исследований в 2021 гг. ученые ММБИ проводили исследования по следующим направлениям:

1. Анализ данных о состоянии водных масс на акваториях архипелага.
2. Закономерности пространственного распределения вирио-, бактерио-, фито- и зоопланктона в прибрежных водах Шпицбергена.
3. Получение новых данных по экологии донных организмов, разнообразию, динамике и функциональных особенностях зообентоса в прибрежных экосистемах архипелага.
4. Оценка распространения и запасов макрофитов в прибрежной зоне Шпицбергена.
5. Выявление основных экологических факторов, влияющих на состав, структуру и динамику разнообразия птиц и морских млекопитающих.
6. Оценка роли модельных видов мигрирующих птиц в формировании разнообразия почвенных микроартропод на Шпицбергене
7. Анализ уровней химического и радиоактивного загрязнения в среде и биоте архипелага
8. Подготовка баз данных компонентов морских экосистем как основы оптимального планирования мероприятий по охране окружающей среды на архипелаге Шпицберген.

В ходе реализации темы научно-исследовательская деятельность осуществлялась по трем блокам:

- сбор научного материала в морских экспедициях в районе архипелага Шпицберген;
- аналитическая обработка полевого материала в лабораториях ММБИ в Мурманске;
- публикация научных статей в российских и зарубежных изданиях, а также популяризация проводимых на архипелаге исследований.

Обзор научных работ, проведенных ММБИ РАН в 2021 гг. в рамках каждого блока, представлен в настоящем материале.

Экспедиционные работы в районе архипелага Шпицберген в 2021 г. выполнялись по двум основным направлениям:

*Сбор научного материала в морских экспедициях в районе архипелага Шпицбергене*

Одним из важнейших направлений в исследованиях окружающей среды является экспедиционный сбор научного материала. Полевые работы ММБИ в районе архипелага Шпицберген в 2021 г. проводились на НИС «Дальние Зеленцы» в ноябре-декабре.

*Морские исследования.*

Экспедиция на НИС «Дальние Зеленцы» состоялась в конце ноября – начале декабря 2021 г. (рис. 15.1). Морские научные работы в территориальных водах Шпицбергена велись в течение 12 дней. В экспедиции принимали участие сотрудники ММБИ и МГТУ. В связи с распространением коронавируса на архипелаге заходы судна в порты Баренцбурга и Лонгйирбюена разрешены не были. Экспедиционные исследования носили комплексный экосистемный характер и охватили акватории системы залива Исфьорд на нескольких разрезах и полигонах.



Комплекс работ включал STD-зондирования для измерения температуры и солености морской воды от поверхности до дна, отбор проб на макрозообентос, радиоактивное загрязнение и гранулометрический состав донного осадка. Будет производиться сетной лов зоопланктона.

В ходе экспедиции отобраны образцы планктона по совместной с Университетским центром на Шпицбергене программе Мониторинга системы Исфьорда (IMOS)

Непосредственно в морских исследованиях в районе Шпицбергена в 2021 году приняли участие семь научных сотрудников ММБИ, включая 6 молодых ученых: начальник экспедиции Зимина О.Л., радиоэколог Валуйская Д.А., океанолог Водопьянов Д.А., бентолог Гарбуль Е.А., гидрохимик Ишкулова Т.Г., альголог Салахов Д.О., планктонолог Човган О.В.

*Аналитическая обработка полевого материала в лабораториях ММБИ в Мурманске*

В течение января-октября 2021 г., главным образом, проводилась обработка полевого материала и подготовка публикаций в лабораториях ММБИ в Мурманске.

*Публикация научных статей в российских и зарубежных изданиях, популяризация проводимых на архипелаге исследований:*

Сотрудники ММБИ участвовали в международных конференциях:

Лебедева Н.В. Гнездование обыкновенного чистика в антропогенном ландшафте на Шпицбергене. Устный доклад на XV Международной орнитологической конференции Северной Евразии, посвященной памяти академика М.А. Мензбира (165-летие со дня рождения), Иркутск, август, 2021 г. (онлайн)

Моисеев Д.В. Панельные выступления. Polar Night Week 2021. Zoom. 11-15 января 2021 г.

Моисеев Д.В. Russian Marine Research in Spitsbergen. On line Keynote Speech. Research in Svalbard: APECS 1-day workshop. November 1, 2021.

По результатам исследований опубликованы 5 статей в рецензируемых журналах и сборниках:

Лебедева Н.В., Усягина И.С., Валуйская Д.А. Радионуклиды в почвах типичной арктической тундры и под колонией птиц в районе российского поселка Баренцбург (Арх. Шпицберген) // Атомная энергия (отправлена 22/04/2021, в печати) (Ссылка на базовую тему по Шпицбергену)

Даувальтер В.А., Мещеряков Н.И., Усягина И.С., Духно Г.Н., Шарин В.В., Слуковский З.И., Денисов Д.Б. Тяжелые металлы в донных отложениях озера Фара,

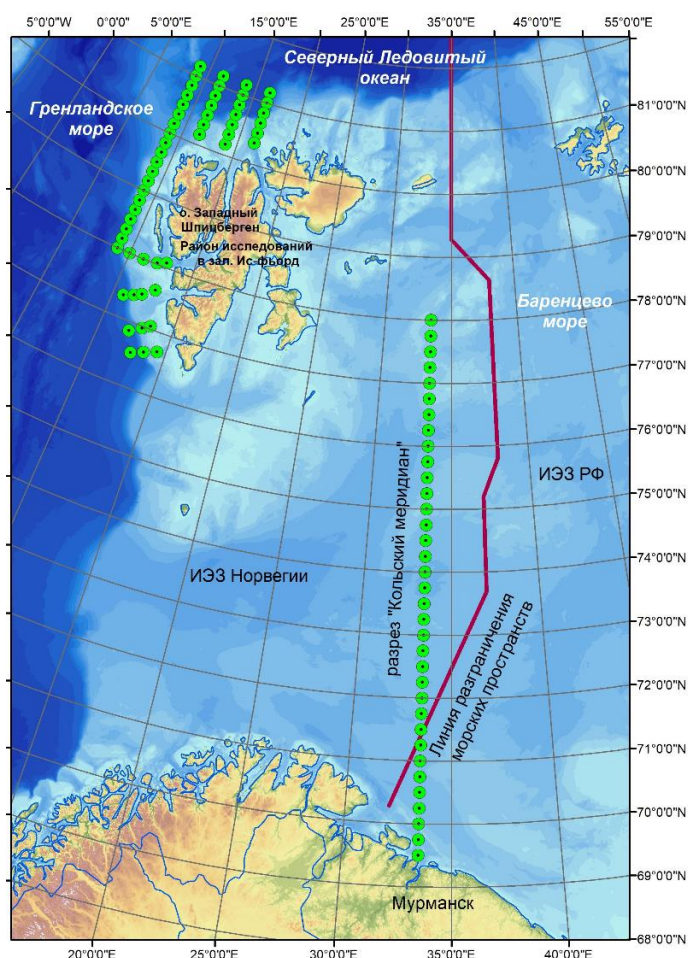


Рисунок 15.1 – Станции и маршрут экспедиционных исследований ММБИ на НИС «Дальние Зеленцы», запланированных на ноябрь-декабрь 2021 г.

Западный Шпицберген // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2021. Т. 18, с. 145–149. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.026

Мещеряков Н.И., Усягина И.С. Особенности формирования донных отложений пролива Стур-фьорд (архипелаг Шпицберген) в период с 1950 по 2019 годы // Исследования экосистем морей Арктики: Программа и тезисы XXXIX конференции молодых ученых Мурманского морского биологического института, посвященной году науки и технологий Российской Федерации; [отв. ред. О.П. Калинин]; Мурманский морской биологический институт РАН. – Мурманск: ММБИ РАН, 2021. С. 29–30.

Носкович А.Э. Особенности распределения и биологии двустворчатого моллюска *Macoma calcarea* (Gmelin, 1791) в заливе Гренфьорд архипелага Шпицберген // Исследования экосистем морей Арктики: Программа и тезисы XXXIX конференции молодых ученых Мурманского морского биологического института, посвященной году науки и технологий Российской Федерации; [отв. ред. О.П. Калинин]; Мурманский морской биологический институт РАН. – Мурманск: ММБИ РАН, 2021. С. 31–32.

Søreide J.E., Pitusi V., Vader A., Damsgård B., Nilsen F., Skogseth R., Poste A., Bailey A., Kovacs K.M., Lydersen Ch., Gerland S., Descamps S., Strøm H., Renaud P.E., Christensen G., Arvnes M.P., Graczyk P., Moiseev D., Singh R.K., Bé-langer S., Elster J., Urbański J., Moskalik M., Wiktor J., Węśławski J.M. Environmental status of Svalbard coastal waters: coastscapes and focal ecosystem components (SvalCoast) (Chapter 6) // Moreno-Ibáñez et al (eds) SESS report 2020. Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System, Longyearbyen, 2021, p. 142–175. DOI: 10.5281/zenodo.4293849. ISSN 2535-6321

Мероприятие 17 выполнено полностью.

**ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина  
Российской академии наук (ПАБСИ КНЦ РАН)**

**Мероприятие 16. Растительно-почвенные ресурсы, совершенствование методов управления охраняемыми природными территориями в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия и оптимизация среды обитания человека на архипелаге Шпицберген**

Цель проекта: исследование биоразнообразия фототрофной биоты, классификация растительности, мониторинг растительного покрова, оценка продуктивности растений в высокоширотных экосистемах Шпицбергена; морфолого-генетические, экологические и биогеохимические исследования почвенного покрова.

Задачи проекта:

1. Инвентаризация видового состава фототрофной биоты архипелага Шпицберген, выявление новых для региона, Арктики видов растений; составление карт распространения видов; классификация экологического разнообразия; выявление и описание новых для науки видов, изучение филогении арктических таксонов на внутривидовом и инфравидовом уровнях (генетический и эволюционный аспекты); выявление климатогенных и антропогенных преобразований фототрофной биоты.

2. Типология (синтаксономия) ценоотических комплексов, растительного покрова и экосистем с учетом зональной и подзональной структуры растительности; инвентаризация и мониторинг биоценоотических комплексов.

3. Изучение анатомо-морфологических показателей доминирующих видов сосудистых растений, эколого-физиологические особенности растений и лишайников в сообществах арктических тундр. Анализ содержания фотосинтетических пигментов автотрофных организмов, выявление дифференциации и скорости первичной продукции в сообществах арктических тундр.

4. Изучение особенностей морфологического сложения и свойств почв и почвенного покрова, анализ суточной эмиссии CO<sub>2</sub> в арктических почвах, изучение трансформации растительных остатков в почвах Шпицбергена.

Экспедиционные работы на архипелаге не состоялись из-за пандемии новой коронавирусной инфекции. Камеральные работы по обработке данных, полученных в предыдущие полевые сезоны выполнялись в течение всего года.

Выполнением исследований руководили:

Давыдов Д.А., к.б.н., зам. дир. по научной работе [d\\_disa@mail.ru](mailto:d_disa@mail.ru)

Кашулина Г.М. д.б.н., гл.н.с., [galina.kashulina@gmail.com](mailto:galina.kashulina@gmail.com)

Константинова Н.А., д.б.н., гл.н.с. [nadya50@list.ru](mailto:nadya50@list.ru)

Шмакова Н.Ю., в.н.с., д.б.н. [shmanatalya@yandex.ru](mailto:shmanatalya@yandex.ru)

Объекты исследования – фототрофные представители биоты: цианопрокариоты, лишайники, печеночники, мхи, сосудистые растения; растительные ассоциации; почвы.

При проведении исследований применялись следующие методы:

Для классификации растительности использовали метод Браун-Бланке. Табличная сортировка описаний выполнена вручную с последующей проверкой результатов методами кластеризации и ординации описаний в программе ExStatR (Новаковский, 2016). Для выяснения синтаксономического положения гольцовых пустынь использовали опубликованные описания на Шпицбергене (Eurola 1968, Hadač 1989, Möller 2000), а также описания типовых ассоциаций в Скандинавских горах (Nordhagen 1928, 1943). При сравнении видового состава синтаксонов и для оценки влияния факторов среды использовали программу ExStatR (Новаковский 2016), метод неметрического многомерного шкалирования — NMS и кластерный анализ с группировкой по средним арифметическим —

UPGMA. В качестве меры сходства/расстояния в обоих методах использовали коэффициент Сёренсена-Чекановского (Новаковский 2006, 2016). Для выявления биоморфологической и географической структуры флоры сосудистых растений гольцовых пустынь использовали систему жизненных форм Т.Г. Полозовой (1978, 1994), с дополнениями Н.А. Секретаревой (2004), и систему биогеографических элементов Н.А. Секретаревой (2004) с корректировками в соответствии со сводкой Annotated Checklist of the Panarctic Flora (PAF) Vascular Plants (<http://panarcticflora.org/>).

Идентификации лишайников велась с помощью бинокулярных стереоскопических микроскопов и микроскопов проходящего света МБС-10, Zeiss NU 2, Zeiss Primo Star. Определение лишайников произведено с учетом морфолого-анатомических и хемотаксономических признаков. Кроме стандартного набора реактивов (К, С, КС, КI, HNO<sub>3</sub>), использовалась ультрафиолетовая лампа длинноволнового излучения (UV, длина волны 350 нм). Для получения данных по важным хемотаксономическим признакам, для изучения метаболитного состава и для идентификации видов использовался метод высокоэффективной тонкослойной хроматографии (High-Performance Thin Layer Chromatography, HPTLC) на пластинках. HPTLC проводился по стандартной методике (Culbertson et al. 1979, Kranner et al. 2002) с использованием стандартных систем растворителей (Orange et al. 2001).

Сбор цианопрокариот проводился маршрутным методом, описание местообитаний сопровождался измерением некоторых экологических параметров: освещенности, pH, влажности, температуры. Анализ анатомо-морфологических признаков осуществлялся с помощью современных микроскопов Carl Zeiss: «Axio Scope A1» и «AxioPlan 2 imaging», оборудованных системой дифференциального интерференционного контраста (ДИК) и системой видеофиксации изображений (Jenoptik).

Выделение и культивирование штаммов проводилось с использованием традиционных микробиологических методов на питательных средах (BG-11 и Z8). Полученные альгологически чистые культуры использовались для молекулярно-генетического анализа на основе исследования локусов 16S-23S и ITS рРНК.

Анализ данных по распространению таксонов проводился с использованием информационной системы CRIS (<http://krabg.ru/cris/> Мелехин и др. 2013, Melekhin et al. 2019). Картирование распространения видов осуществлялось с применением ГИС QGIS.

Оценка степени пластичности фотосинтетического аппарата и механизмов адаптации высших сосудистых растений, содержания и состава жирных кислот суммарных липидов доминирующих видов высших сосудистых растений арктических тундр выполнено с использованием спектрофотометрии, газожидкостная хроматографии, флуоресценции, световой микроскопии и гравиметрии.

Интенсивность разложения растительных остатков в почве экспериментально изучалась в период с 2012 по 2019 гг. В качестве материала для эксперимента использовали растения овса (*Avena sativa*), листья ивки полярной (*Salix polaris*), мхи с преобладанием санионии (*Sanionia uncinata*) и целлюлоза (рис. 16.1). Воздушно сухие растения в капроновых мешочках помещали в нижнюю часть верхнего органогенного горизонта О почв на площадках, расположенных на различной высоте горного хребта Гренфьорд в окрестностях п. Баренцбург (рис. 16.2). Мешочки с остатками растений извлекали через 1, 2 и 3 года экспозиции в почве. Скорость разложения оценивали по потере веса образцов в 3-4 кратной повторности. В исходных и экспонировавшихся образцах определяли влажность и содержание органического углерода по И.В. Тюрину. Исследования носили комплексный характер. Кроме наблюдений за скоростью разложения на площадках регулярно определяли влажность и температуру почв.

Основные полученные результаты и научные выводы:



### Изучение растительного покрова

Изучение растительности выполнено по полевым материалам прошлых лет и обобщении литературных данных. На основе проведенных исследований составлен продромус растительности гольцовых пустынь Шпицбергена. В горах Шпицбергена гольцовые пустыни – это пояс несомкнутой растительности, располагающийся выше пояса сомкнутой растительности арктических тундр. В них нами выделены 5 ассоциаций и 1 тип сообществ, относящиеся к 4 союзам, 4 порядкам, 4 классам. В классе *Racomitrietea heterostichi* Neumaуr 1971 – асс. *Andreaeo rupestri–Racomitrietum microcarpi*. В классе *Thlaspietea rotundifolii* Br.-Bl. et al. 1947 – асс. *Sphaerophoro-Racomitrietum lanuginosi* (Hadač 1946) Hofm. 1968 и асс. *Papaveretum dahliani* Hofm. 1968, а также тип сообществ *Krustenflechten-Saxifraga oppositifolia* (Möller 2000). В классе *Salicetea herbaceae* Br.-Bl. et al. 1947 – асс. *Phippsietum algidae-concinnae* Nordh. 1943. В классе *Carici rupestris-Kobresietea bellardii* Ohba 1974 – асс. *Dryadetum minoris* Hadač 1946.

Проведенный анализ географических элементов показывает, что парциальная флора сосудистых растений гольцовых пустынь Шпицбергена насчитывает 57 видов. В спектре широтных биогеографических элементов преобладают виды арктической фракции (89%), при равной доле арктических (46%) и аркто-альпийских (43%) видов. Доли гипоарктических и аркто-бореальных видов также примерно равны (5% и 6%). Это спектр арктического типа флоры, подтип высокоарктический (Королева и др., 2014). В спектре долготных биогеографических элементов преобладают виды с циркумполярным ареалом (82%), на втором месте виды с амфи-атлантическим (восточно-американским-европейским) ареалом (11%). Среди жизненных форм преобладают травянистые многолетники (96%) при преобладающей доле стержнекорневых травянистых многолетников (45%), кустарнички составляют 4%, их всего 3 вида (*Cassiope tetragona*, *Dryas octopetala*, *Salix polaris*). На Шпицбергене пояс гольцовых пустынь схож с поясом горных арктических тундр по синтаксономической, биогеографической и биоморфологической структуре и структуре флоры. В этом его отличие от пояса гольцовых пустынь Кольского п-ова, который резко отделен по этим показателям от ниже расположенных горных тундр.



Рисунок 16.1 – Материал для эксперимента по трансформации органического вещества в почвах Шпицбергена: растения овса (*Avena sativa*), листья ивki полярной (*Salix polaris*), мхи с преобладанием санионии (*Sanionia uncinata*) и листки целлюлозы



Рисунок 16.2 – Расположение экспериментальных площадок на различной высоте горного хребта Гренфьорд



### Изучение биоразнообразия фототрофной биоты

Обобщены данные по биоразнообразию и распространению цианопрокариот архипелага. Составлен и опубликован актуальный аннотированный список видов цианопрокариот. Исследование флоры позволило выявить 321 таксон, включая 293 вида, что составляет 54,2% от флоры Арктики. Впервые на архипелаге выявлено 85 видов (29% от флоры). Впервые проведено всестороннее сравнение флоры цианопрокариот Шпицбергена с флорой евроазиатской Арктики. Анализ видового богатства показывает, что флора архипелага является богатейшей среди всех регионов евроазиатского сектора Арктики. Актуальный чек-лист цианопрокариот, содержащий данные о местонахождениях, экологии, распространении, а также фотографии многих, в том числе редких, видов, доступный в сети Интернет, может послужить основой мониторинга цианопрокариот в арктических условиях, а также использоваться исходя из локальных задач для оценки природных процессов (Davydov 2021).

Изучены коллекции лишайников, собранные в предыдущие годы на о. Северо-Восточная Земля в районе залива Иннвика (Innvika Bay). Выполнена идентификация видового состава, подготовлен аннотированный список лишайников для указанного района, включающий 159 видов. Два вида – *Alectoria gowardii* и *Peltigera elisabethae* указываются для флоры архипелага Шпицберген впервые, 36 видов – ранее не указывались для о. Северо-Восточная Земля. Выявлено 27 редких для Шпицбергена видов (Konoreva, Chesnokov 2021a), в том числе *Aspilidea myrinii*, *Candelariella borealis*, *Gyalecta erythrozona*, *Miriquidica deusta*, *Rhizocarpon viridiatrum* найдены на территории архипелага во второй раз, *Aspicilia cinerea*, *Cetraria nigricans*, *Cladonia arbuscular*, *Cystocoleus ebeneus*, *Lecidea ecrustacea*, *Peltigera frippii*, *Rhizocarpon eupetraeoides*, *Rinodina terrestris*, *Stereocaulon cumulatum*, *Toninia squalida*, *Verrucaria hydrela* – в третий раз. Коллекции гербария КРАВГ дополнена 200 образцами лишайников.

Завершено определение коллекции печеночников, западного побережья Шпицбергена. Подготовлен новый аннотированный список печеночников архипелага Шпицберген, который насчитывает 109 видов, 50 видов, приводящихся в литературе ранее исключены из состава флоры. Распространение видов дается по 28 географическим районам Шпицбергена с соответствующими ссылками на все литературные источники. Выявлены местонахождения 66 видов новых для разных регионов архипелага. Два вида *Neoorthocaulis hyperboreus* и *Riccardia chamedryfolia* для флоры Шпицбергена выявлены впервые (Söderström et al. 2021).

Продолжено изучение видового разнообразия и распространения мхов архипелага Шпицберген. Обработан материал, собранный в районе залива Иннвика, являющейся частью залива Дуверфьорд на северном побережье о. Северо-Восточная Земля. Составлен предварительный список, включающий 106 видов мхов и 1 внутривидовой таксон. Из них 17 видов считаются редкими для архипелага (Frisvoll and Elvebakk 1996), 7 – редкими, и 4 вида – впервые найдены нами на острове. По видовому составу бриофлора изученного района типична для локальных флор Северо-Восточной Земли: видовое разнообразие ниже, чем в тундровых флорах; из таксономических спектров выпадает семейство *Sphagnaceae*, а возрастает роль *Polytrichaceae* и *Grimmiaceae*; не представлены многие широко распространенные в тундровых сообществах виды и роды мхов (*Fontinalis*, *Hypnum*, *Rhytidium*, *Pleurozium* и др.). Изученная локальная бриофлора близка к изученной нами ранее локальной флоре мхов района Сетербухты (также Дуверфьорд), где отмечено 102 вида. Вместе с тем, она значительно богаче флоры восточного побережья Рийпфьорда (Земля Принца Оскара), где было выявлено всего 77 видов (рис. 16.3).

В силу бедности флор полярных пустынь спектр «ведущих» родов представлен только 3-4 родами, остальные содержат по 1-3 вида и ранжировать их не представляется возможным. Спектр «ведущих» семейств также плохо дифференцирован, многие семейства включают одинаковое число видов.

По видовому составу бриофлора Иннвика имеет наибольшее сходство также с флорой мхов Сетербухты, о чем свидетельствуют коэффициенты сходства (табл. 16.1).

*Оценка степени пластичности фотосинтетического аппарата и механизмов адаптации высших сосудистых растений Западного Шпицбергена при прогнозировании изменения климата*

Для поддержания нормальной физиологической функции и выживания в неблагоприятных условиях окружающей среды растения имеют различные защитные механизмы, в том числе и физиолого-биохимические. Липиды, как структурно-функциональные компоненты мембран и других органоидов растительной клетки, как защитные вещества являются важными участниками адаптационного процесса.

Исследованы 11 видов растений из 8 семейств арктических тундр о. Западный Шпицберген. Из них 7 травянистых многолетников: сем. Caryophyllaceae – звездчатка приземистая (*Stellaria humifusa* Rottb.), ясколка альпийская (*Cerastium alpinum* L.), смолевка бесстебельная (*Silene acaulis* L.); сем. Polygonaceae – кисличник двупестичный (*Oxyria digyna* (L.) Hill); сем. Ranunculaceae – лютик серно-жёлтый (*Ranunculus sulphureus* Soland.); сем. Saxifragaceae – камнеломка дернистая (*Saxifraga cespitosa* L.), камнеломка поникающая (*S. cernua* L.); 4 вида кустарничков: сем. Salicaceae – ива полярная (*Salix polaris* Walenb.); сем. Rosaceae – дриада восьмилепестная (*Dryas octopetala* L.); сем. Ericaceae – голубика обыкновенная, мелколистная (*Vaccinium uliginosum* subsp. *microphyllum* (Lange) Hulten.), сем. Betulaceae – березка карликовая (*Betula nana* L.).

Количество суммарных липидов (СЛ) в ассимилирующих органах исследованных видов варьирует в широком диапазоне от 75,8 до 401,5 мг/г сухого веса. Среди трав максимальное значение отмечено у широко распространенного вида *Oxyria digyna*, минимальное – у представителя приморских экотопов *Stellaria humifusa*. В группе кустарничков максимум наблюдается у распространенного вида *Salix polaris*, а минимум у термофильного вида локальных экотопов *Dryas octopetala*. Суммарное содержание хлорофиллов изменяется от 2,4 до 8,1 мг/г сухого веса. Между содержанием СЛ и хлорофиллов установлена высокая значимая корреляция ( $r = 0,72$ ,  $p < 0,05$ ). В составе СЛ ассимилирующих органов исследованных растений идентифицированы 21 жирная кислота (ЖК), которые различаются по длине углеродных цепей (от 16 до 24 атомов углерода) и числу двойных связей. Доминирующими ЖК у всех видов (65–91% от СЛ) являются пальмитиновая (C16:0), линолевая (C18:2(n-6)) и  $\alpha$ -линоленовая (C18:3(n-3)). Содержание насыщенных жирных кислот (НЖК) в СЛ варьирует от 16 до 56%, ненасыщенных жирных кислот (ННЖК) варьирует в диапазоне от 44 до 84%.

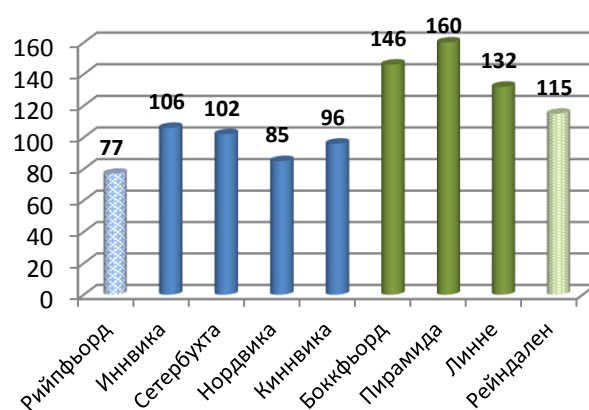


Рисунок 16.3 – Число видов мхов в некоторых локальных флорах Шпицбергена: синий – данные для бриофлор Северо-Восточной Земли, зеленый – Западного Шпицбергена

Таблица 16.1 – Коэффициенты сходства локальных флор мхов о. Северо-Восточная Земля, рассчитанные по формулам, где А – число видов в первой флоре, В – число видов во второй флоре, С – число общих видов в обеих флорах

Коэффициент Сёрсенсена-Чекановского [2C/(A+B)]	Коэффициент Жаккара [C/(A+B-C)]					
	Локальные флоры	Рийпфьорд	Сетербухта	Иннвика	Нордвик	Киннвика
Рийпфьорд	-	0,38	0,45	0,33	0,22	
Сетербухта	0,55	-	<b>0,54</b>	0,46	0,44	
Иннвика	0,62	<b>0,70</b>	-	0,44	0,47	
Нордвика	0,49	0,63	0,61	-	0,52	
Киннвика	0,36	0,62	0,64	0,68	-	

Выявлено, что виды растений, у которых в СЛ доминируют НЖК характеризуются низкой функциональной активностью и имеют ограничения в освоении широкого спектра экотопов (*Betula nana*, *Vaccinium uliginosum*, *Dryas octopetala*). Доминирование в составе суммарных липидов ННЖК обеспечивает поддержание текучести мембран и является ведущим показателем в адаптации растений к более широкому диапазону условий и, соответственно, расширяет возможности в освоении арктических экотопов (*Salix polaris*, *Saxifraga cernua*). К особенностям липидной фракции высших сосудистых растений Арктики можно отнести: активное участие НЖК и/или ННЖК в жизнедеятельности растений в период активной вегетации, большое количество минорных ЖК, присутствие у большинства видов длинноцепочных как НЖК, так и ННЖК. У большинства исследованных видов отмечено доминирование триеновой – линоленовой ЖК, увеличение содержания которой связывается с высоким уровнем функциональной активности мембранных систем.

Исследование морфолого-анатомических и физиологических особенностей двух видов рода *Taraxacum* (аборигенного *T. arcticum* и заносного *T. officinale*) во флоре о. Западный Шпицберген выявило, что аборигенный вид обладает однородным типом строения мезофилла, толстой листовой пластинкой с небольшой площадью, у заносного вида сохраняется дорсовентральный тип строения мезофилла, показатели анатомического строения листа выше, чем в южных районах распространения. Однако, несмотря на разную продуктивность надземной фитомассы, отмечено сходное суммарное содержание хлорофиллов и фотохимическая активность единицы фотосинтетического аппарата обоих видов. В условиях Арктики эти виды одинаково поглощают и утилизируют световую энергию, различия связаны только с ее последующей тратой. Если *T. arcticum* при небольшой ассимиляционной массе тратит всю запасенную энергию на рост и развитие собственного организма, то *T. officinale* тратит большую часть на фотозащиту ассимиляционного аппарата. Недостаток тепла у заносного вида приводит к более высокому уровню значений нефотохимического тушения. Это обуславливает распространение *T. arcticum* в широком спектре экотопов Арктики и абсолютно локальное произрастание ценопопуляции *T. officinale* в окрестностях п. Баренцбург.

*Генезис, свойства, география, биогеохимия и функционирование почв в экстремальных условиях высокой Арктики*

За первый год экспозиции в почве потеря органического вещества растениями овса составила 42-51% (рис. 16.4). После 3-х лет экспозиции в почве потери органического вещества овсом достигли 58-65%. Потери органического вещества листьями ивы полярной были несколько ниже: за первый год экспозиции в почве они составили 37-48%, к концу 3-го года достигли 47-57%. При этом скорость разложения растительных остатков в серогумусовых почвах на Шпицбергене оказались сопоставима с почвами севера Европейской части России. Это означает, что заторможенность процессов трансформации растительных остатков не может быть причиной высокого содержания органического вещества в серогумусовых почвах на Шпицбергене.

Сравнение скорости разложения листьев ивы и мхов в однолетнем эксперименте показали, что мхи разлагаются значительно медленнее по сравнению с листьями ивы: за первый год экспозиции в почве потеря органического вещества во мхах была в 2,5 раза ниже по сравнению с листьями ивы. Целлюлоза также является труднодоступным для разложения материалом. Поэтому потеря органического вещества целлюлозы по мере экспозиции в почве была значительно ниже по сравнению с растениями на большинстве площадок.

Влияние абсолютной отметки слабо сказалось на различиях между площадками по скорости разложения в почве растений. Поскольку экспериментальные площадки различались не только по высоте места, но и по влажности и температуре почвы. При этом и температура почвы, и влажность, в свою очередь, в значительной степени определялась не высотой места, а формой рельефа. Большое влияние на влажность почв также оказывали и

гидрологические особенности года. Поэтому различия между площадками по потере органического вещества растениями редко были значимыми.

Показано, что арктические серогумусовые почвы юго-западной части Шпицбергена характеризуются достаточно высокой скоростью разложения, более интенсивное разложение протекает в первый год. Это обусловлено тем, что субстрат богат легкодоступными для микроорганизмов водорастворимыми органическими и зольными веществами. Основным фактором, влияющим на скорость разложения органического вещества, является вид растений/материала. Зависимость интенсивности разложения от абсолютной отметки места в диапазоне до 290 м н.у.м. является менее чёткой. Поскольку экспериментальные площадки различались не только по высоте места, но и по влажности и температуре почв, распределение которых зависело не столько от высоты места, сколько от форм рельефа: крутизны и экспозиции склона, а также формы поверхности.

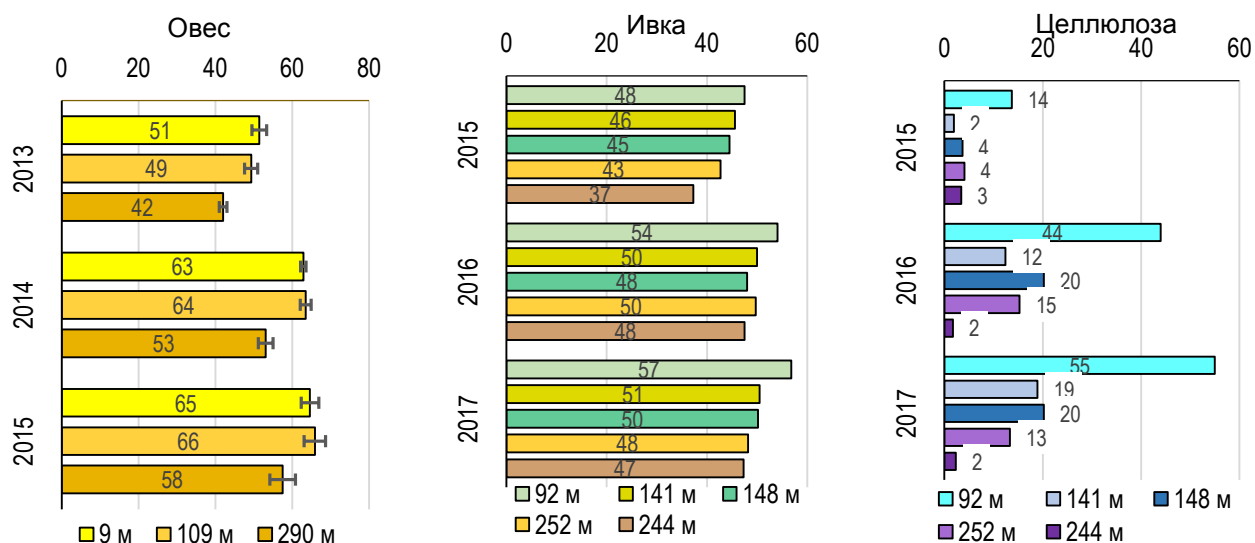


Рисунок 16.4 – Потеря веса экспонировавшимися в почве образцами овса, листьев ивы полярной и квадратиков целлюлозы, % от исходного

В исследованиях принимали участие 2 молодых специалиста. По результатам исследований опубликовано 13 работ, из них в изданиях Web of Science 2, Scopus 6, РИНЦ 5:

Davydov D. Cyanobacterial diversity and distribution on the Svalbard Archipelago // *Czech Polar Reports*, 2021. Vol. 11(1). P. 181-182.

Davydov D. Cyanobacterial diversity of Svalbard Archipelago // *Polar Biology*, 2021. Vol. 44. N. 10. P. 1967–1978. <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02931-3>

Kashulina G., Litvinova T., Drogobuzhskaya S. Multi element soil biogeochemistry on the southwest coast of Svalbard // *Czech Polar Reports*, 2021. Vol. 11(1). P.184-186.

Konoreva L., Chesnokov S. Lichens of Frankenhøya Peninsula (north of Barentsøya, Svalbard archipelago) // *Polish Polar Research*, 2021b. Vol. 42(4).

Konoreva L., Chesnokov S. Lichens of the Innvika Bay, Prins Oscars Land (Nordaustlandet, Svalbard) // *Czech Polar Reports*, 2021a. Vol. 11(2).

Söderström L., Konstantinova N.A., Hagborg A., Prestø T., Hassel K., Konrat M. von Land of retreating glaciers – Checklist of liverworts on Svalbard // *Arctoa*, 2021. Vol. 30 (2). P. 1-88.

Иванова Н.С., Кашулина Г.М., Литвинова Т.И. Скорость трансформации растительных остатков в серогумусовых почвах юго-западного побережья острова Западный Шпицберген // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия Прикладная экология Севера*, 2021. В печати.

Кашулина Г.М. Обзор современных почвенных исследований в Полярно-альпийском ботаническом саду // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия Прикладная экология Севера*, 2021. В печати.

Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М. Почвы юго-западного побережья острова Западный Шпицберген // Труды Кольского научного центра РАН. Серия Прикладная экология Севера, 2021. В печати.

Литвинова Т.И., Кашулина Г.М. Распределение температурных показателей по профилю серогумусовой грубогумусовой почвы, остров Западный Шпицберген // Труды Кольского научного центра РАН. Серия Прикладная экология Севера, 2021. В печати.

Марковская Е.Ф., Розенцвет О.А., Шмакова Н.Ю., Зорина А.А., Ильинова М.А. Участие липидов в адаптации высших сосудистых растений к условиям Западного Шпицбергена // Журнал общей биологии, 2021. Т. 82. № 6. С. 1-12.

Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф. Эколого-физиологическая характеристика сосудистых растений арктических тундр Западного Шпицбергена // Труды КНЦ РАН. Сер. Прикладная экология Севера, 2021. В печати.

Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф., Ермолаева О.В., Морозова К.В. Фотосинтетический аппарат *Taraxacum arcticum* и *Taraxacum officinale* (Asteraceae) на Западном Шпицбергене // Ботанический журнал, 2021. Т. 106. № 7. С. 676-682.

Мероприятие 18 в целом выполнено. Полевые работы не проводились.

Литература:

Мелехин, А. В., Давыдов, Д. А., Шалыгин, С. С., Боровичев, Е. А. Общедоступная информационная система по биоразнообразию цианопрокариот и лишайников CRIS (Cryptogamic Russian Information System) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2013. 118(6).

Новаковский, А. Б. Обзор современных программных средств, используемых для анализа геоботанических данных // Растительность России, 2006. N 9.

Новаковский, А. Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН, 2016. 3 (197), с. 26-33.

Полозова, Т. Г. "Жизненные формы сосудистых растений Таймырского стационара." Структура и функции биогеоценозов Таймырской тундры. Л.: Наука, 1978. С. 114-143.

Секретарева Н.А. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий. М 2004. 131 с.

Юрцев, Б.А., Петровский, В.В., Холод, С.С., Добрыш, А.А., Полозова, Т.Г., Слинченкова, Е.Ю. Арктические тундры острова Врангеля, 1994.

Culberson, C.F., Nash, III T. H., Johnson, A. 3- $\alpha$ -Hydroxybarbatic acid, a new depside in chemosyndromes of some Xanthoparmeliae with  $\beta$ -orcinol depsides // Bryologist, 1979. С. 154-161.

Davydov D. Cyanobacterial diversity of Svalbard Archipelago // Polar Biology, 2021. Vol. 44, N. 10, p. 1967–1978. DOI 10.1007/s00300-021-02931-3.

Eurola, S. Über die Ökologie der nordfinnischen Moorvegetation im Herbst, Winter und Frühling // Annales Botanici Fennici. Societas Zoologica Botanica Fennica Vanamo, 1968.

Frisvoll, A. A., Elvebakk, A. A catalogue of Svalbard plants, fungi, algae and cyanobacteria. Part 2. Bryophytes // Skriften-Norsk Polarinstitut, 1996. N198, p. 57-172.

Hadač, Emil. Notes on plant communities of Spitsbergen // Folia Geobotanica et Phytotaxonomica, 1989. N24.2, p. 131-169.

Konoreva L., Chesnokov S. Lichens of the Innvika Bay, Prins Oscars Land (Nordaustlandet, Svalbard) // Czech Polar Reports, 2021a. Vol. 11(2).

Kranner, I., Beckett, R. P., Wornik, S., Zorn, M., Pfeifhofer, H. W. Revival of a resurrection plant correlates with its antioxidant status // The Plant Journal, 2002. 31(1), p. 13-24.

Melekhin, A.V., Davydov, D.A., Bоровичев, E.A., Shalygin, S.S., Konstantinova, N.A. CRIS—service for input, storage and analysis of the biodiversity data of the cryptogams // Folia Cryptogamica Estonica, 2019. 56, p. 99-108.

Möller, I. Pflanzensoziologische und vegetationsökologische Studien in Nordwestspitzbergen. Steiner, 2000.

Orange et al., 2001 Orange, A., James, P. W., White, F. J. Microchemical methods for the identification of lichens // British Lichen Society, 2001.

Söderström L., Konstantinova N.A., Hagborg A., Prestø T., Hassel K., Konrat M. von Land of retreating glaciers – Checklist of liverworts on Svalbard // Arctoa, 2021. Vol. 30 (2), p. 1-88.



**Кольский филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН)**

**Мероприятие 17. Развитие методов и аппаратных средств сейсмо-инфразвукового мониторинга процессов деструкции арктической криосферы и обеспечение прогнозирования опасных геодинамических явлений на архипелаге Шпицберген и в прилегающем районе Западного сектора Арктической зоны Российской Федерации**

Цели исследований:

– повышение научного знания о процессах, происходящих в окружающей среде высокоширотной Арктики, на основе регистрации сейсмических и акустических сигналов, порождаемых процессами деструкции криосферы и литосферы;

– изучение и оценка текущего состояния геодинамической опасности на локальном и региональном уровне, включая контроль сейсмичности районов размещения угольных шахт ГТ «Арктикуголь», путем проведения непрерывного мониторинга сейсмического и инфразвукового полей на архипелаге Шпицберген;

– накопление базы данных непрерывных наблюдений за динамическими процессами деструкции арктической криосферы, для изучения закономерностей реакции окружающей среды арктического региона на происходящие климатические изменения.

Задачи, поставленные на 2021 год:

1. Развитие сети станций сейсмического и инфразвукового мониторинга на архипелаге Шпицберген для обеспечения непрерывной регистрации сейсмических и инфразвуковых проявлений опасных природных и техногенных явлений;

2. Сбор, накопление и обработка данных сети сейсмического мониторинга на архипелаге Шпицберген, включая данные станций зарубежных партнеров;

3. Оперативная автоматическая и ручная обработка поступающих в региональный информационно-обрабатывающий центр (РИОЦ) в г. Апатиты данных Шпицбергенской сети мониторинга: обнаружение сейсмических событий и информирование о произошедших землетрясениях;

4. Выполнение оперативной оценки уровня геодинамического риска и районирование опасных зон по данным сейсмического мониторинга;

5. Проведение комплексных измерений годовых вариаций волновых полей в литосфере, атмосфере и криосфере на архипелаге Шпицберген с использованием двух сейсмо-инфразвуковых групп КоФ ФИЦ ЕГС РАН;

6. Развитие методологических основ дистанционного геофизического контроля проявлений деструктивных процессов в арктической криосфере, разработка способов распознавания наиболее опасных типов процессов (отколы айсбергов, подвижки ледников, обрушения и оползни, взрывные выбросы метана при нарушении стабильности газогидратных резервуаров) по данным сейсмологического и акустического (инфразвукового) мониторинга;

7. Разработка геофизических индикаторов айсбергогенных льдотрясений;

8. Проведение двух экспедиций в июле и октябре для регламентного обслуживания станций постоянной сети мониторинга, проведения полевых измерений временными сетями.

В ходе выполнения Мероприятия 17 в 2021 году сотрудниками КоФ ФИЦ ЕГС РАН планировались две экспедиции на архипелаг Шпицберген общей длительностью 25 дней для выполнения задач 1 и 8, однако в виду продолжавшихся жестких ограничений в связи с мерами, принимаемыми для нераспространения новой короновирусной инфекции, план был скорректирован. В итоге выполнена одна экспедиция на арх. Шпицберген в период с 19-24 октября с целью регламентного обслуживания оборудования российской региональной сети сейсмических станций. Таким образом, задачи по п.1 были перенесены в программу работ следующего года. Остальные поставленные задачи выполнены в полном объеме.

## Сейсмический мониторинг района архипелага Шпицберген

На протяжении отчетного периода 2021 года Кольским филиалом ФИЦ ЕГС РАН проводился непрерывный мониторинг сейсмической обстановки в районе архипелага Шпицберген. Для осуществления мониторинга привлекались собственные сейсмические станции и станции зарубежных сейсмологических агентств, расположенные на архипелаге, составляющие международную региональную сеть сейсмического мониторинга. Данные международной сети были объединены в региональном информационно-обрабатывающем центре (РИОЦ) в г. Апатиты. По состоянию на 20 октября 2021 года системами автоматического обнаружения и локализации было обработано 22 304 сейсмических событий в диапазоне магнитуд от -1,2 до 5,3. События с магнитудами больше 2 единиц локальной магнитуды (ML) дополнительно анализировались специалистами-интерпретаторами, производилось уточнение времен вступления объемных волн и уточнялось расположение гипоцентра.

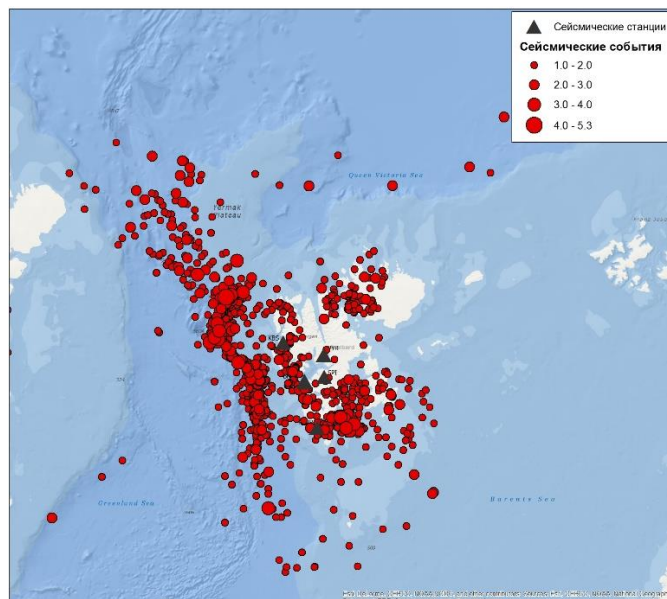


Рисунок 17.1 – Землетрясения, зарегистрированные региональной сетью сейсмических станций в районе архипелага Шпицберген в 2021 году, с  $ML > 1$

На рисунке 17.1 представлена карта эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных в районе арх. Шпицберген, с магнитудами более единицы ( $ML > 1$ ). Анализ данной карты показывает, что наибольшая сейсмическая активность средних и высоких энергий традиционно приурочена к зоне Срединно-Атлантического хребта (хребты Книповича, Шпицбергенская зона разломов). Также выделяются две активные зоны внутриплитовой сейсмичности: зона пролива Стурфьорд, активированная в 2008 году сильнейшим внутриплитовым землетрясением Западной Арктики, и зона о. Северо-Восточная Земля.

Сильнейшее зарегистрированное за отчетный период землетрясение произошло 23.07.2021 в 04:05:40 (UTC) к Западу от о. Западный Шпицберген и имело магнитуду 5,3 ед. Эпицентр подземного толчка был приурочен к Срединно-Атлантическому хребту в районе сочленения хребта Книповича и Шпицбергенской зоны разломов, на удалении порядка 200 км от ближайшего населенного пункта, пос. Нью-Олесунн, и в 290 км от российского пос. Баренцбург. К ощутимым сотрясениям в указанных населенных пунктах данное событие не привело. За отчетный период не отмечено ни одного землетрясения, ощущавшегося жителями пос. Баренцбург и потенциально опасного для населения или объектов инфраструктуры.

### *Низкоэнергетическая сейсмичность Шпицбергена*

Отдельного внимания заслуживает низкоэнергетическая сейсмическая активность на Шпицбергене, так как она маркирует и картирует как геодинамические процессы на архипелаге, так и отражает активность ледникового покрова, занимающего около 60% площади суши архипелага.

На рисунке 17.2 представлена пространственно-энергетическая карта, одновременно иллюстрирующая энерговыделение и плотность сейсмических событий всех магнитуд, обнаруженных в 2021 году. Красные оттенки отражают места с наибольшей плотностью

сейсмических событий, обеспечивших высокое энерговыделение.

В пределах архипелага наиболее активными в плане количества сейсмических событий и суммарной выделившейся энергии являются области в центральной, северо-западной и северо-восточной частях о. Западный Шпицберген. Высокая суммарная выделившаяся сейсмическая энергия в данных районах обусловлена огромным числом слабых сейсмических событий. Данные области не совпадают с местами проявления сильнейших землетрясений региона, а соответствуют областям расположения активных выводящих ледников. Сейсмичность в данных областях имеет ледниковое происхождение и отражает процесс деструкции ледникового покрова архипелага.

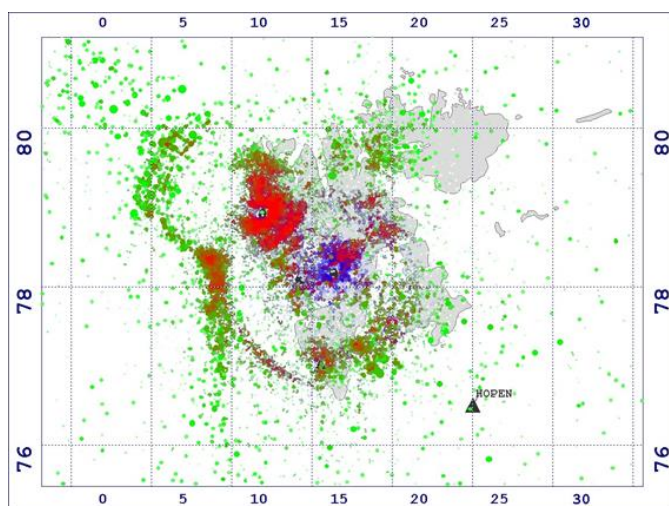


Рисунок 17.2 – Отображение сейсмического процесса в районе архипелага Шпицберген в виде элементов площади, цвета которых зависят от числа сейсмических событий и выделившейся сейсмической энергии

*Развитие методов классификации сейсмических событий по природе их возникновения*

В 2021 году в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН была разработана система потокового детектирования и локации сейсмических и инфразвуковых событий PSDL, в которую был включен прототип подсистемы распознавания типов сейсмических событий, основанный на вероятностном подходе и Байесовских сетях доверия. В частности, для распознавания подводных взрывов применялся критерий длительного постоянства частотного спектра.

В результате применения этого, еще окончательно не доработанного и не верифицированного, прототипа системы автоматического распознавания типа сейсмических событий в районе арх. Шпицберген большое количество сейсмических событий было опознано как подводные взрывы. Частотно-энергетическая карта этих событий приведена на рисунке 17.3, распределение по магнитудам – на рисунке 17.4.

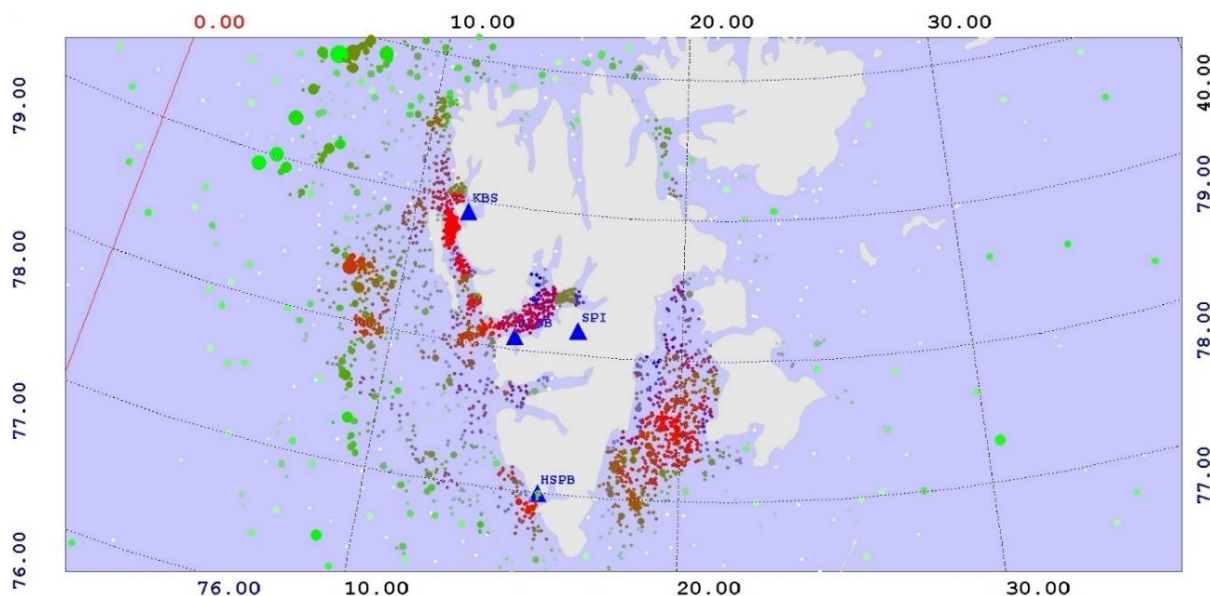


Рисунок 17.3 – Частотно-энергетическая карта событий, принятых системой PSDL за подводные взрывы

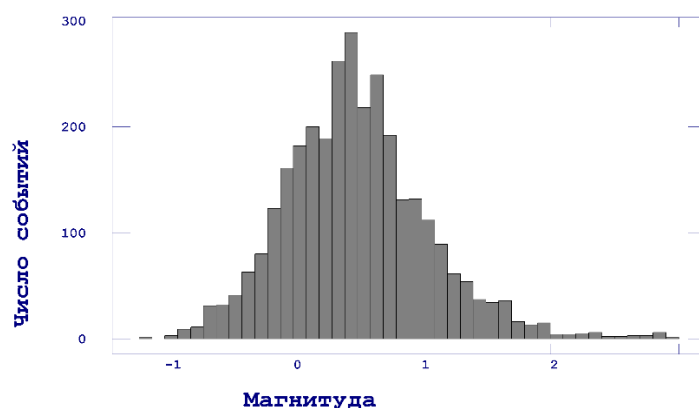


Рисунок 17.4 – Распределение событий приведенных на рисунке 17.3 по магнитудам

Большая часть этих событий – события небольшой магнитуды, также приуроченные к побережьям, проливам или устьям фьордов. Анализ записей этих событий по записям сейсмической группы SPITS показал доминирование высоких частот в спектре сигнала. На рисунке 17.5 показана типичная запись такого события, максимум спектральной энергии находится в полосе от 12 до 20 Гц. Спектр записи слабо меняется во времени.

Таким образом, по всем известным параметрам записи этих событий действительно схожи с записями подводных взрывов. Природа этих событий неясна, предварительно высказана гипотеза о возможной связи данного класса сейсмических событий с процессами взрывной дегазации субаквального осадочного чехла. Следы подобных процессов прослеживаются в рельефе дна фьордов архипелага в виде характерных воронок взрывов и широко описаны в литературе, однако сложно поддаются датировке и зачастую ассоциируются авторами с процессами, протекавшими тысячи лет назад.

Небольшое количество событий, произошедших на хребте Книповича и в Шпицбергенской разломной зоне, также распознанных PSDL как подводные взрывы, по частотному составу очень сильно отличались от событий в проливах и фьордах, подобного показанному на рисунке 17.5, они гораздо более низкочастотны и с большой вероятностью являются тектоническими землетрясениями.

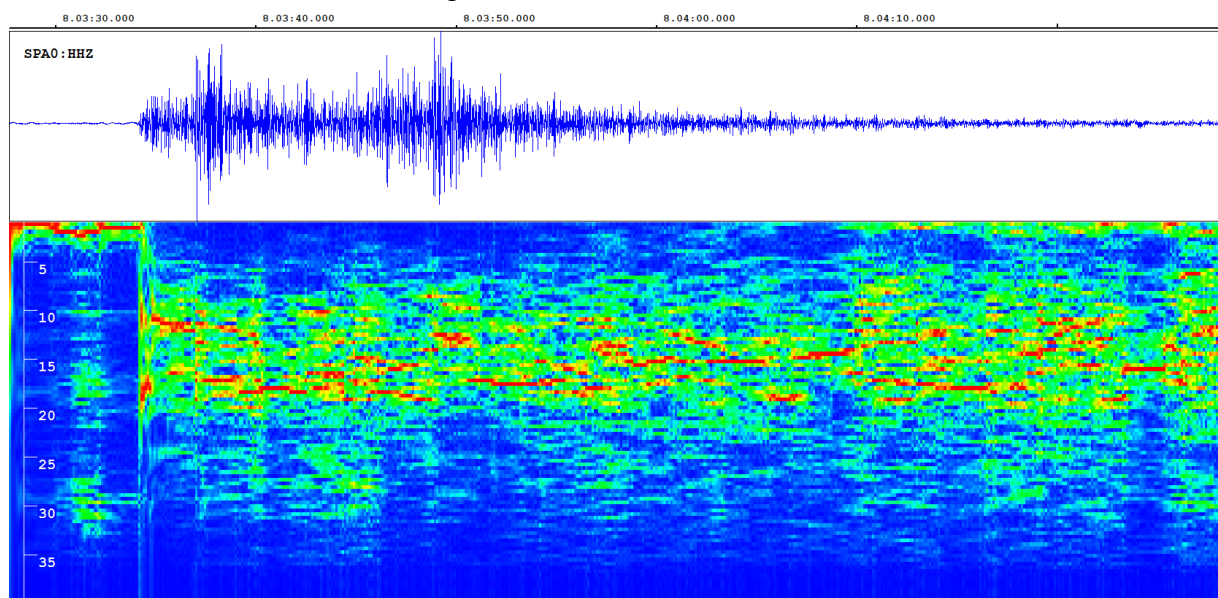


Рисунок 17.5 – Запись события 27.01.2021 8.03:20 UTC в заливе Исфьорд и ее сонограмма

### *Сейсмичность района размещения угольных шахт ГТ «Арктикуголь»*

В 2021 году продолжались работы по непрерывному мониторингу района размещения российского п. Баренцбург и одноименного угольного рудника ГТ «Арктикуголь». Мониторинг указанного района выполнялся по данным двух сейсмических станций КоФ



ФИЦ ЕГС РАН, установленных вблизи шахты (рис. 17.6). Всего за первые 9 месяцев 2021 года в районе размещения угольного рудника «Баренцбург» зарегистрировано 301 сейсмическое событие, в то время как годом ранее за аналогичный период времени количество таких событий превысило 500 ед. Тенденция к снижению числа регистрируемых сейсмических событий от года к году наблюдается с 2017 года, что, видимо, свидетельствует о снижении интенсивности техногенного воздействия на геологическую среду при разработке данного угольного месторождения.

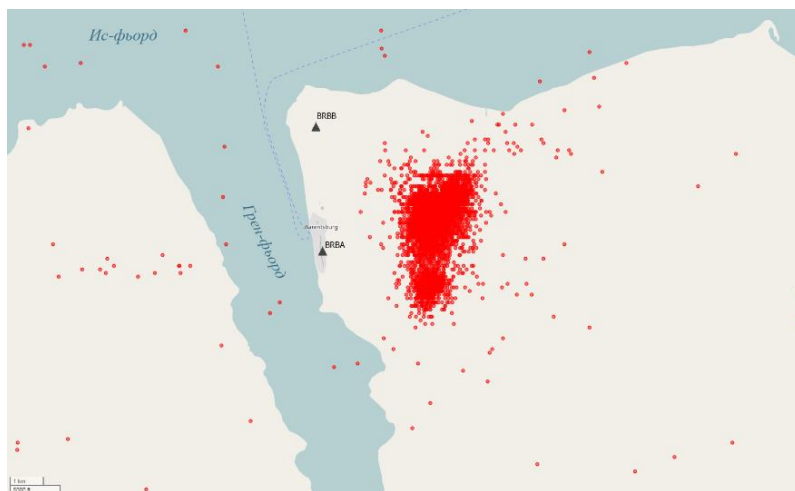


Рисунок 17.6 – Эпицентры сейсмических событий, обнаруженных вблизи рудника Баренцбург в 2017-2021 гг.

На рисунке 17.6 представлена карта эпицентров сейсмических событий, обнаруженных системой мониторинга за последние 5 лет. Несмотря на большое количество сейсмических событий, отмеченных в данной области, магнитуды их не превышали 1 в единицах локальной магнитудной шкалы.

#### *Инфразвуковые наблюдения на архипелаге Шпицберген*

В отчетный период на архипелаге Шпицберген Кольским филиалом ФИЦ ЕГС РАН продолжались наблюдения за инфразвуковым полем. Наблюдения производились на сейсмо-инфразвуковой группе «Баренцбург Б». Сейсмоинфразвуковая группа «Баренцбург Б» расположена в 3 км к северу от п. Баренцбург и состоит из трех разнесенных в пространстве низкочастотных микрофонов и широкополосной сейсмической станции. Расстановка элементов группы показана на рисунке 17.7.

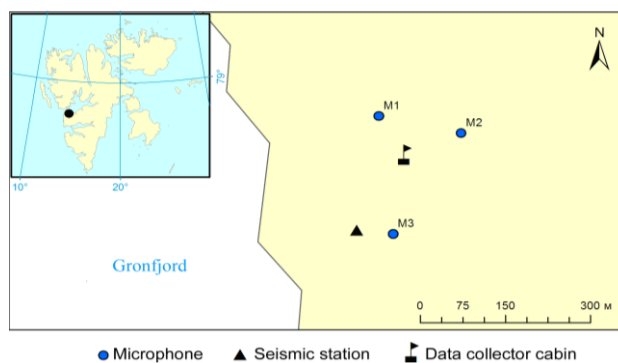


Рисунок 17.7 – Расстановка элементов сейсмоинфразвуковой группы «Баренцбург Б» на местности

Непрерывные волновые формы трех датчиков группы анализировались программой автоматического детектирования инфразвуковых сигналов QACD и разработанной в этом году системой потокового детектирования и локализации сейсмических и инфразвуковых событий PSDL.

Основными источниками сигналов в инфразвуковом диапазоне, регистрируемых на архипелаге, являются сигналы, порожденные штормами в Северной Атлантике (микробаромы), а также сигналы, генерируемые при растрескивании ледников и отколе айсбергов. За период с января 2021 г. по сентябрь включительно детекторами было обнаружено 1654 инфразвуковых событий с отношением сигнал/шум (далее SNR) от 2 до 65. Распределение числа обнаруженных событий по времени показано на рисунке 17.8.



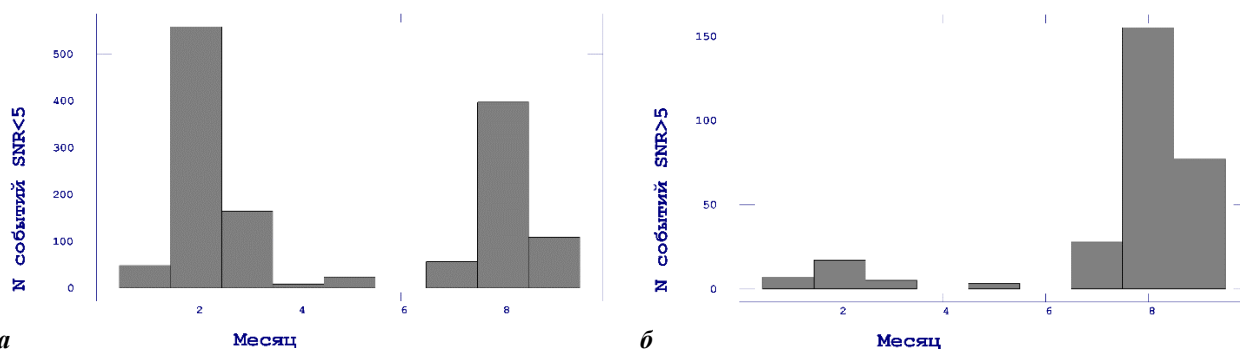


Рисунок 17.8 – Распределение количества обнаруженных инфразвуковых событий по месяцам года: (а) события с  $SNR < 5$ ; (б) события с  $SNR > 5$

Для относительно сильных событий ( $SNR > 5$ ) максимальное количество детектирований приходится на летне-осенний период, когда активизируются процессы разрушения ледниковых тел. Подавляющее число слабых событий отмечено в феврале и августе. Дальнейший анализ распределения доминирующих направлений прихода инфразвуковых событий различной амплитуды (рис. 17.9) показывает, что они порождены принципиально разными источниками. Большинство слабых событий связано с микробаромами - следствием штормов в северной Атлантике, а средних по силе и сильных – с процессами деструкции ледников Шпицбергена.

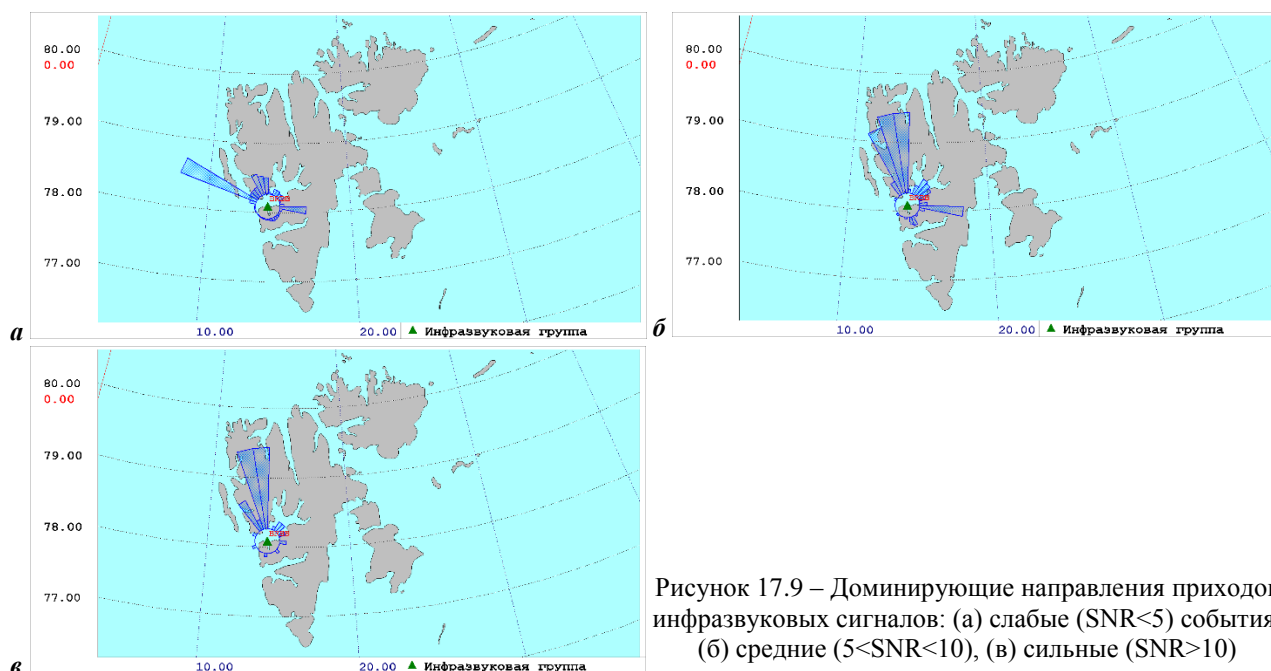


Рисунок 17.9 – Доминирующие направления приходов инфразвуковых сигналов: (а) слабые ( $SNR < 5$ ) события, (б) средние ( $5 < SNR < 10$ ), (в) сильные ( $SNR > 10$ )

### Заключение

В ходе работ в 2021 году по Мероприятию 17 Кольским филиалом ФИЦ ЕГС РАН непрерывно проводился мониторинг сейсмической обстановки и инфразвуковых сигналов в районе архипелага. По результатам мониторинга актуализирован каталог и схема пространственного распределения землетрясений в контролируемом регионе, получена детальная пространственно-временная характеристика сейсмического процесса архипелага Шпицберген, дана оценка сейсмической опасности региона с учетом современного геодинамического режима тектонических линеаментов.

Продолжены работы по развитию методики непрерывного контроля импульсных возмущений инфразвукового поля в атмосфере Западной Арктики.

Продолжены работы по развитию методов автоматического распознавания типов

геофизических процессов по данным сейсмических и инфразвуковых измерений.

Апробирован новый подход к выделению сигналов, связанных с подводными взрывами, и получены первые результаты, предварительно свидетельствующие о возможных процессах взрывной дегазации осадочного чехла во фьордах и проливах архипелага.

В исследованиях приняли участие 3 молодых ученых. Количество полученной информации 38 Гб. По результатам исследований в 2021 г. опубликовано 3 работ в рецензируемых журналах, в том числе по результатам международного сотрудничества с NORSAR подготовлена одна совместная публикация в журнале второго квартиля Web of Science - *Seismological Research Letters*.

Виноградов Ю.А., А.В. Федоров, С.В. Баранов, В.Э. Асминг, И.С. Федоров О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным // *Лед и Снег*, 2021. Том 61 №2, с. 262-270.

Асминг В.Э., Федоров А.В., Виноградов Ю.А., Чебров Д.В., Баранов С.В., Федоров И.С Быстрый детектор инфразвуковых событий и его применение // *Геофизические исследования*, 2021, том 22, № 1, с. 54-67. DOI 10.21455/gr2021.1-4

Schweitzer, J., Paulsen B., Antonovskaya G. N., Fedorov A. V., Konechnaya Y. V., Asming V. E., Pirli M. A 24-Yr Long Seismic Bulletin for the European Arctic, *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–10, DOI 10.1785/0220210018

Мероприятие 17 выполнено полностью с незначительными исключениями.

## ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (ПГИ)

### Мероприятие 18. Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на архипелаге Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли

Целью проекта является изучение геофизических процессов и явлений, солнечно-земных связей, а также электромагнитных полей в широком частотном диапазоне. Уникальное расположение архипелага Шпицберген позволяет проводить на базе обсерватории ПГИ «Баренцбург» непрерывные долговременные и регулярные стационарные наблюдения за магнитными и оптическими явлениями в области полярного каспа, полярной шапки и высокоширотной атмосферы.

В 2021 году в обсерватории ПГИ «Баренцбург» проводились стационарные наблюдения магнитных пульсаций, регистрация вариаций интенсивности космических лучей на трех секциях нейтронного монитора. В темное время, в период полярной ночи, проводились оптические наблюдения полярных сияний и свечения ночного неба. Также регулярно выполнялась регистрация как искусственного, так и естественного источников электромагнитного излучения в диапазоне от 0,1 Гц до 200 Гц и ОНЧ диапазоне. Благодаря уникальному расположению архипелага, данные, полученные в обсерватории, используются при проведении фундаментальных исследований, в том числе совместно с наблюдениями со спутников и наземных наблюдений в других регионах.

В текущем году оказалось возможным направить сотрудников института непосредственно в обсерваторию ПГИ «Баренцбург», арх. Шпицберген, для выполнения сезонных работ. Сотрудниками института в п. Баренцбург проведено техническое обслуживание оборудования обсерватории, его настройка (в том числе калибровка, тестирование) и отладка после обслуживания. Выполнены работы по модернизации станции космических лучей. Проведен текущий ремонт здания рабочего павильона обсерватории, окраска наружных поверхностей здания павильона антисептическими и защитными материалами, ремонт кровли и окраска наружных поверхностей складского помещения, а также комплекс мероприятий по подготовке объектов инфраструктуры обсерватории ПГИ «Баренцбург» к их эксплуатации в осенне-зимнем периоде 2021/2022 г.

#### *Научные исследования*

1. По данным наблюдений сияний в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген), магнитометров сетей SuperMAG и IMAGE и спутников проекта AMPERE проведен сравнительный анализ развития двух полярных суббурь, наблюдавшихся над Шпицбергеном 17 декабря 2012 г. Оба события являлись полярными суббурями, то есть магнитные бухты были зарегистрированы только на широтах выше  $\sim 72^\circ$  MLAT и сопровождалась геомагнитными пульсациями Pi2, а также наблюдались в спокойных условиях, при  $BZ$  ММП  $> 0$ . Но первая полярная суббуря наблюдалась в вечернем секторе ( $\sim 16-17$  UT) на фоне полярной экспансии (poleward leap) западного края электроджета другой околополуночной авроральной суббури, зарегистрированной немного раньше на более восточных станциях Диксон и Тикси. Вторая суббуря наблюдалась в ночном секторе в  $\sim 21:30$  UT как «обычная» полярная суббуря. Показано, что полярная суббуря, развивавшаяся в сложных условиях, на краю западного электроджета другой авроральной суббури отличалось от «обычной» ночной полярной суббури по формам полярных сияний, распределению продольных токов и среднеширотным эффектам. Результаты исследования приняты в печать:

Despirak I.V., N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, L.M. Malysheva, A.V. Roldugin, L.I. Gromova. Polar substorms and Svalbard auroras: Case study // Physics of auroral phenomena: Abstracts of the 44th Annual Seminar (15-19 March). Preprint PGI 21-01-141. Apatity: PGI KSC RAS. 2021. P.12.

Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любчич А.А., Малышева Л.М., Громова Л.И., Ролдугин А.В., Козелов Б.В. Магнитные суббури и сияния в полярных широтах

Шпицбергена: события 17 декабря 2012 // Известия РАН. Серия физическая. 2022. принята в печать.

2. В статье Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 398-403. DOI: 10.31857/S0367676521030200 выполнен анализ одновременных наблюдений аврорального хисса 3 февраля 2019 г. в трех пространственно-разнесенных точках – обс. Баренцбург (архипелаг Шпицберген), Каннуслахто (Финляндия) и Ловозеро (Россия). Обнаружены случаи, когда излучения регистрировались только в обс. Баренцбург и случаи, когда всплески аврорального хисса наблюдались на всех трех станциях одновременно. Проведена интерпретация полученных результатов с использованием разработанной ПГИ модели распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности. Показано, что всплеск аврорального хисса, наблюдаемый только в обс. Баренцбург в 18:50–19:17 UT, по-видимому, обусловлен существованием рассеивающей области относительно небольших размеров к юго-западу от точки наблюдений. Появление всплесков аврорального хисса одновременно на всех трех точках в 19:25 UT, может быть результатом одновременного существования двух рассеивающих областей мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, расположенных на разных широтах.

3. Проанализированы результаты наблюдений УНЧ/ОНЧ поля ионосферного источника на высокоширотной сети станций ПГИ в эксперименте по нагреву ионосферы мощным КВ излучением, проведенного ФГБУ «ААНИИ» в октябре 2016 г. на стенде «EISCAT/Heating». Обнаружено, что на частотах, близких к частоте первого поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера (~1,8 кГц), амплитуда горизонтального магнитного поля ионосферного источника в обс. Баренцбург, расположенной на расстоянии 961 км от нагревного стенда, зачастую превышала амплитуды на более близко расположенных к стенду материковых станциях (самая ближняя станция – Лотта – 395 км). На частотах, далеких от частоты первого поперечного резонанса, при прочих равных условиях такого эффекта не наблюдалось. Выделены и проанализированы два возможных физических механизма, ответственных за наблюдаемый эффект. Первый связан с достаточно малым затуханием волн с частотами, близкими к частоте первого поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера, при распространении над высокопроводящей морской поверхностью с высоким коэффициентом отражения. Второй связан с неоднородностью диаграммы излучения ионосферного источника. Проведено численное моделирование процессов генерации и распространения УНЧ/ОНЧ волн в волноводе Земля—ионосфера и оценен вклад предложенных механизмов. Показано, что диаграмма направленности источника не оказывает значимого влияния, а экспериментальные данные объясняются только в модели с учетом высокой проводимости нижней стенки волновода вдоль трассы EISCAT – Баренцбург и низкой проводимости вдоль трассы EISCAT – Лотта. Проведена оценка состояния ионосферы и получено семейство профилей электронной концентрации, при которых возможно наблюдение подобного эффекта.

4. В статьях Б.В. Козелов, А.В. Ролдугин, Высотное распределение аврорального свечения по данным триангуляционных измерений с малой базой в Апатитах и Баренцбурге // *Physics of Auroral Phenomena, 44th Annual Seminar, Abstracts*, с.62. 2021 и Б.В. Козелов, А.В. Ролдугин, Высота аврорального свечения на полюсной и экваториальной границах аврорального овала по данным триангуляционных измерений с малой базой // Известия РАН. Серия физическая (принята к публикации 2021) представлены примеры авроральных событий по данным наблюдений 2 пар камер – в Баренцбурге и в Апатитах, в которых на масштабе десятки секунд – минуты прослеживается прямая связь энергии электронов и интенсивности аврорального свечения: повышение интенсивности свечения сопровождается уменьшением высоты, т.е. повышением энергии. В рассмотренных случаях использование

малой базы при триангуляционных измерениях позволило в динамике оценить высоту аврорального свечения средняя энергия электронов: она не превышала 10 кэВ, а изменение энергии в событие – менее 8 кэВ. Можно предположить, что, несмотря на морфологические различия в авроральных формах и положении в авроральном овале, во всех рассмотренных случаях одновременное увеличение энергии электронов и интенсивности аврорального свечения связано с дополнительным ускорением потока частиц в околоземной области ускорения.

5. В статьях Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Е.А. Маурчев. Влияние солнечной активности на характеристики событий возрастания фонового гамма-излучения // *Physics of Auroral Phenomena, 44th Annual Seminar, Abstracts, 2021*; Balabin Yu.V. Influence of solar activity on the increase in background gamma radiation during precipitation // XII международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». 27 сентября – 1 октября 2021 г., с. Паратунка, Камчатский край и Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Е.А. Маурчев. Влияние солнечной активности на характеристики событий возрастания фонового гамма-излучения // *Известия РАН. Серия физическая* (принята к публикации 2021) анализируются данные о потоках вторичных космических лучей на протяжении всего 24-го цикла солнечной активности (2010-2020), имеющиеся в Апатитах и Баренцбурге. Данные позволили провести поиск вариаций, не связанных с сезонными изменениями атмосферы. Обнаружено, что дополнительный поток гамма-квантов, создаваемых событиями возрастания при осадках, уменьшается в период максимума солнечной активности в 2013-16 г. Вероятнее всего, это изменение связано с общим уменьшением потока ВКЛ при максимуме солнечной активности.

6. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Моделирование прохождения протонов солнечных космических лучей через атмосферу Земли для событий GLE42 И GLE44 // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85. № 3. С.383-387. DOI: 10.31857/S0367676521030170 рассчитывают скорости ионизации вещества в высокоширотной области атмосферы Земли для двух независимых событий GLE, произошедших в различное время и имеющих отличающиеся энергетические характеристики протонов в первичных частицах. Спектры первичных протонов были получены по уникальной методике, разработанной в ПГИ с использованием данных с нейтронных мониторов, располагающихся в том числе на арх. Шпицберген.

*Модернизация и техническое обслуживание аппаратного комплекса обсерватории ПГИ «Баренцбург» в 2021 году*

#### *1 Станция космических лучей ПГИ, п. Баренцбург*

1.1 Улучшено программное обеспечение системы сбора, основывающееся на современных развивающихся технологиях обработки и передачи данных. Это программное обеспечение установлено в п. Баренцбург, отлажено и адаптировано под особенности локальной сети и выхода в интернет непосредственно в обсерватории.

1.2 Доставлены новый сервер и компьютер-сборщик, отлажены и адаптированы к условиям обсерватории.

1.3 Проведены профилактические работы (непосредственно обслужен нейтронный монитор и аппаратура, входящая в состав комплекса, в т.ч. метеостанция). Электрические схемы очищены от угольной пыли, проверены высоковольтные разъемы и цепи. Проверены уровни низковольтных питающих напряжений и датчиков температуры. Измерены вольт-счетные характеристики всех 18 трубок нейтронного монитора (проведена калибровка) (рис. 18.1а, б).

1.4 В части модернизации во второй секции нейтронного монитора установлены сцинтилляционные пластины для измерения легких заряженных частиц. Пластины расположены под и над нейтронным монитором так, что верхняя принимает потоки частиц



из верхней полусферы, нижняя – из нижней, что в свою очередь расширяет энергетический диапазон и виды регистрируемых излучений на станции космических лучей (рис. 18.1в).

Вариации потоков частиц различаются, что указывает на переменный радиоактивный фон от почвы.

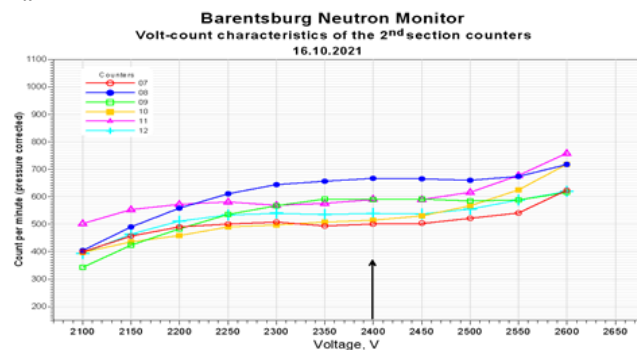
## 2 Оптическая аппаратура обсерватории ПГИ «Баренцбург»

2.1 Камера всего неба (КВН), работавшая в наблюдательный сезон 2019-2021 гг., демонтирована, проведена чистка оптики, электрических контактов, вентиляторов, заменены дегидрационные таблетки. Прибор заново смонтирован, установлен, настроен, оттестирован. Заменен управляющий компьютер и прибор интегрирован в обсерваторскую систему сбора данных. Проведено снятие технологических параметров: dark frame (темновых кадров), bias frame (параметры электронного «нуля» матрицы камеры) для всех планируемых режимов работы. Сняты технологические параметры оптической системы: flat field (плоское поле) и линейности камеры в рабочем динамическом диапазоне. Проведены трехсуточные сеансы наблюдений (рис. 18.2).

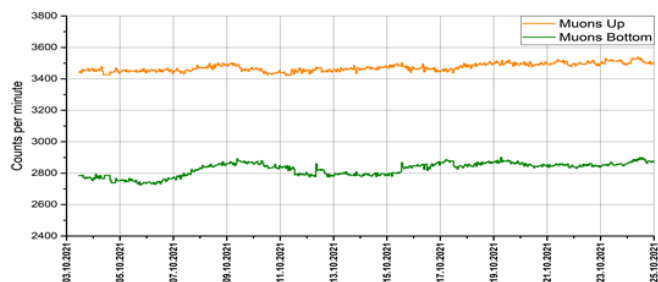
2.2 Меридиональный авроральный спектрометр общего назначения (МАСОН), работавший в наблюдательный сезон 2019-2021 гг., демонтирован, проведена чистка оптики, электрических контактов, вентиляторов, заменены дегидрационные таблетки. Прибор заново смонтирован, установлен, настроен,



а

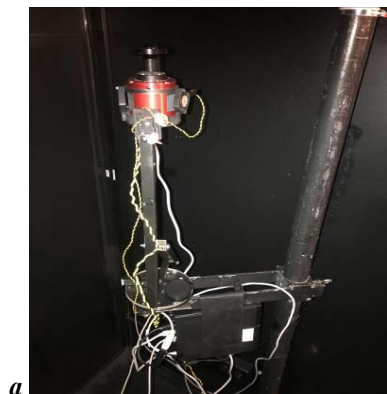


б



в

Рисунок 18.1 – Обслуживание и модернизация нейтронного монитора: (а) калибровка на одном из счетчиков секции, (б) результат калибровки счетчиков во второй секции, (в) пример работы установленных на нейтронном мониторе сцинтилляционных пластин



а



б



в

Рисунок 18.2 – (а) КВН, (б) кадр КВН, (в) КВН под блистером

оттестирован. Рабочий спектральный диапазон несколько расширен. Заменен управляющий компьютер и прибор интегрирован в обсерваторскую систему сбора данных (рис.18.3).

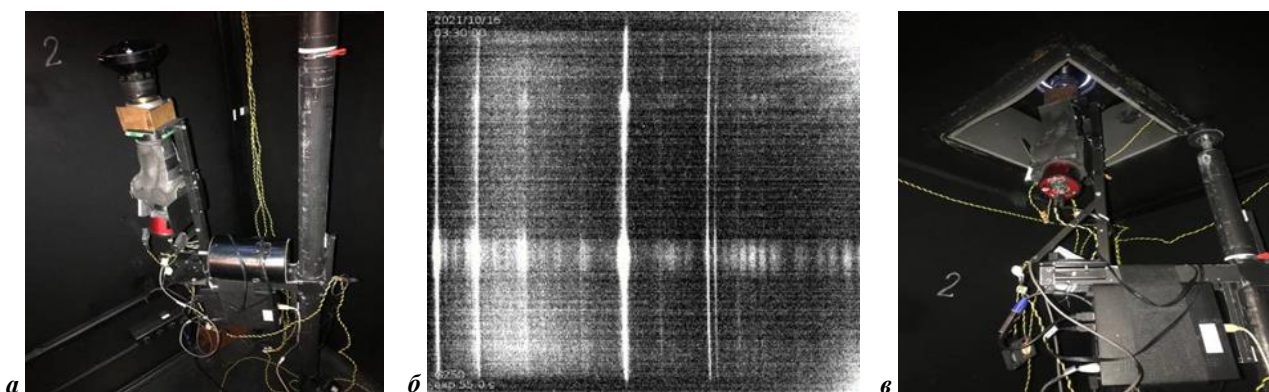


Рисунок 18.3 – (а) МАСОН, (б) кадр МАСОН, (в) МАСОН под блистером

Проведена проверка общих систем оптического комплекса, контейнера:

- электропитания: проверено состояние внутренних кабельных линий напряжений 220 и 12В, общего блока низковольтного питания, розеток, переключателей, очищены контакты, демонтированы поврежденные розетки у рабочего места;
- источника бесперебойного питания (ИБП): проверена работоспособность общего ИБП, проведено его техническое обслуживание, установлен резервный ИБП;
- освещения: проверено состояние осветительных приборов, заменена на светодиодную одна из трёх используемых ламп;
- вентиляции: проверена работоспособность вентиляторов обдува блистеров, заменена смазка подшипников вентиляторов, заменены два неисправных вентилятора;
- обогрева: проверена работоспособность 2-ух используемых теплоконвекторов, очищены контакты, поверхности тепловыделяющих элементов;
- связи: проверена работоспособность коммутатора Ethernet и состояние внутренней кабельной разводки, заменен неисправный разъем внутренней кабельной линии;
- переустановлены ограничительные стопоры на направляющих узлов установки оптических приборов, выполнен ремонт узла установки рабочего места, вымыты блистеры, отмечена полезность наличия удаленного контроля внутренней температуры в контейнере с оптическим оборудованием, отмечена необходимость утепления косяка входной двери контейнера, отмечена протечка панели блистера, загерметизировано по временной схеме, срыв защитного колпака блистера в декабре 2020 г. показал необходимость изменения системы крепления данных колпаков.

Проведено техническое обслуживание системы информационного обеспечения наблюдений – компьютерного сервера (функционально входящего в систему оптического аппаратного комплекса), обеспечивающего сбор данных с оптических приборов: заменена батарея BIOS, установлен новый SSD, заменены HDD, очищены и смазаны вентиляторы, промыты разъемы электроцепей, обновлено программное обеспечение. Внешняя связь обеспечена развертыванием радиолинии Wi-Fi, заменившей кабельную линию, переведенную в положение резервной.

### *3 Системы сбора электромагнитных данных обсерватории ПГИ «Баренцбург»*

#### *3.1 ОНЧ приемник MMBR*

Произведен ремонт основного блока предусилителей: на плате предусилителя  $E_z$  произведена замена всех микросхем операционных усилителей. Произведена перенастройка входных цепей предусилителя горизонтальных магнитных рамочных антенн в целях снижения уровня собственных шумов в диапазоне частот 4-16 кГц (рис. 18.4а). Для этого номиналы входных конденсаторов (на рис. 18.4а выделены красным) были изменены с 1 мкФ на 0.1 мкФ.

Проведена профилактика антенной конструкции ОНЧ приемника. Произведено укрепление антенной системы ОНЧ приемника за счет полной замены оттяжек на углах рамочных антенн (рис. 18.4б).



Рисунок 18.4 – (а) электрическая схема предусилителя компонент  $N \times N_0$ , (б) замена оттяжек рамочной антенны, (в) замена блока предварительных усилителей

Калибровки измерительных каналов ОНЧ приемника производились до и после проведения технического обслуживания антенной системы, внесения изменений в схему и замены программ микроконтроллеров. Отдельно проведена калибровка каналов ОНЧ приемника с резервным блоком предусилителей (рис.18.4в).

### 3.2 Системы сбора данных ОНЧ и КНЧ приемников

Ранее использованный блок питания системы сбора данных ОНЧ приемника работал на предельной мощности. С учетом аномально жаркого лета 2020 г. возникла угроза перегрева элементной базы блока и раннего выхода из строя. Для профилактики произведена замена блока питания на блок питания трансформаторного типа большей мощности БПС-12-5 (12В, 5А) с вентиляторным охлаждением (рис. 18.5а).



Рисунок 18.5 – Системы сбора приемников ОНЧ и КНЧ и их блоки питания(а) и GPS/ГЛОНАСС антенна ОНЧ приемника (б)

Для повышения надежности и отказоустойчивости GPS/ГЛОНАСС приемника системы сбора ОНЧ приемника произведена замена антенны. Новая антенна установлена на крыше здания обсерватории ПГИ «Баренцбург» (рис. 18.5б).

### 3.3 КНЧ приемник BRB6

Проведена проверка аналоговой линии КНЧ приемника и мест ее соединений. Проведена чистка контактов разъемов от окислов.

В результате ревизии цепей питания системы сбора КНЧ приемника обнаружено, что штатный преобразователь, питающий всю аналоговую часть приемника, работает на пределе своих возможностей. В целях предупреждения его выхода из строя нагрузка была распределена при помощи дополнительного DC/DC преобразователя. Питание аналоговых блоков системы сбора оставлено на старом преобразователе, а питание предусилителей магнитных индукционных датчиков переброшено на новый. Аналоговые блоки системы сбора данных включают в себя блок фильтров и блок АЦП. Предусилители



Рисунок 18.6 – Система сбора данных КНЧ приемника



располагаются на удалении примерно 300 м возле магнитно-индукционных датчиков. Доработка изображена на рис. 18.6 и выделена кружком.

Для снижения уровня помех была произведена блока питания КНЦ приемника, вместо используемого ранее импульсного блока установлен блок питания трансформаторного типа (рис.18.5).

### 3.4 Установка и настройка основной линии связи

Организовано подключение к интернету через сеть здания управления вертолетной площадкой. Соединение между зданиями выполнено при помощи Wi-Fi точек доступа Mikrotik (рис. 18.7а,б). Малая парусность точек позволяет выдерживать значительные ветровые нагрузки, характерные для данного района.

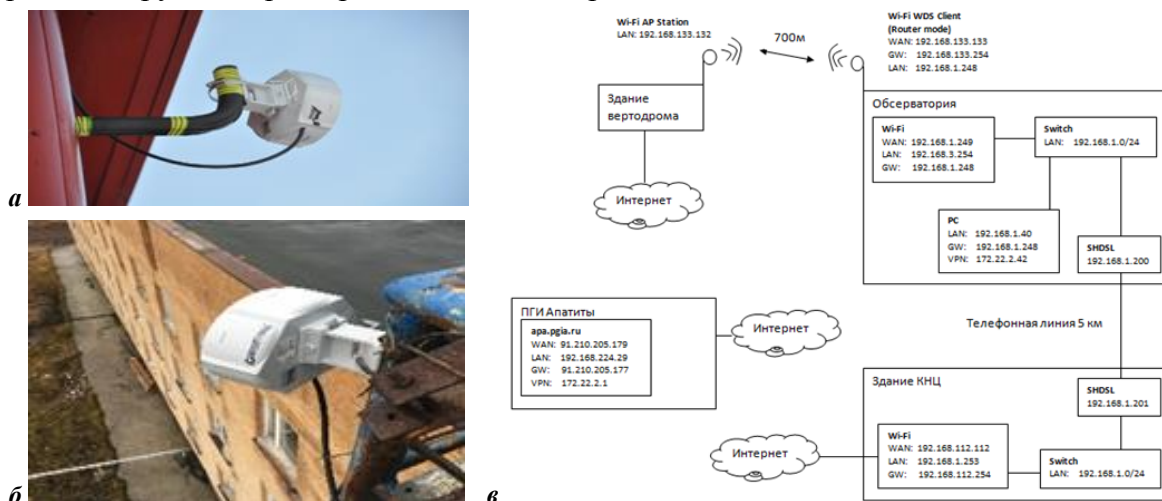


Рисунок 18.7 – (а) точка доступа, закрепленная на здании обсерватории ПГИ, (б) точка доступа, закрепленная на здании вертолетной площадки, (в) схема сети обсерватории ПГИ «Баренцбург»

В ходе работ произведена реорганизация схемы сети обсерватории ПГИ «Баренцбург» (рис.18.7в). Wi-Fi точки работают в режиме прозрачного моста. Точка в обсерватории настроена как маршрутизатор в целях изоляции внутренней сети обсерватории. SHDSL канал от здания КНЦ до обсерватории сохранен в качестве резервного. Доступ к внутренней сети обсерватории осуществляется через прямое VPN соединение между обсерваторией и зданием ПГИ Апатиты.

### 4 Приемный комплекс GNSS

Восстановлена работоспособность комплекса, проведена замена ноутбука, установлено программное обеспечение для сопряжения приемника и ноутбука. Проверено состояние антенно-фидерного устройства приемника. GNSS-комплекс интегрирован в локальную сеть обсерватории ПГИ. Проведено тестирование и проверка работоспособности комплекса в местном и удаленном режиме управления. Запись данных приемника осуществляется на ноутбук (рис.18.8).



Рисунок 18.8 – (а) приемный комплекс GNSS, (б) антенно-фидерное устройство GNSS

*5 Санитарно-техническая платформа обеспечения жизнедеятельности обсерватории ПГИ «Баренцбург»*

Проведены ремонт и обслуживание оборудования санитарно-технической платформы обеспечения жизнедеятельности обсерватории, в том числе системы водоснабжения и системы сбора бытовых стоков. Проверены коммуникации подключения к инженерным сетям здания обсерватории. Обслужена система автономного резервного энергоснабжения, на базе дизельного генератора С15D5. Проверена система автоматического запуска генератора, при отключении центрального (стационарного) энергоснабжения.

*Популяризация научных исследований на Шпицбергене*

11 и 15 октября 2021 г. в конференц-зале ФГБУ «ААНИИ» п. Баренцбург для сотрудников РЦНШ и Генерального консульства, а также школьников 5-11 классов состоялись лекции вед. электроника сектора оптических методов ПГИ А.В. Ролдугина и зав. лаб. вед. научного сотрудника ПГИ Ю.В. Балабина (рис. 18.9), посвященные темам:

Оптические наблюдения ПГИ в п. Баренцбург, арх. Шпицберген;

Измерения космических лучей в ПГИ, в том числе в п.Баренцбург, арх. Шпицберген;

Физика авроральных явлений;

Космические лучи.



*а*



*б*

Рисунок 18.9 – лекции сотрудников ПГИ (а) 11.10.2021 г., (б) 15.10.2021 г.



## ФГБУН Институт археологии Российской академии наук (ИА РАН)

### Мероприятие 19. Сохранение и исследование памятников российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген

Цели исследования:

- Изучение истории освоения архипелага русскими поморами в XVI–XIX вв. и российскими экспедициями XVIII – начала XX в.
- Спасение, выявление и сохранение объектов историко-культурного наследия, разрушающихся под воздействием природных и антропогенных процессов.
- Работа в музейных фондах.

Задачи, поставленные в 2021 г.:

- Мониторинг археологических памятников Западного Шпицбергена. Оценка их физического состояния. Получения новой археологической информации и выявление тех данных, которые ранее не были отмечены или ускользнули от внимания исследователей;
- Определение геоморфологических особенностей расположения памятников на архипелаге;
- Поиск и выявление остатков русских судов XVI – XIX в.;
- Исследование объектов на Шпицбергене, связанных с русским и зарубежным угледобывающим производством конца XIX – первой трети XX века;
- Работа с археологическими коллекциями, полученными при раскопках поморских памятников Шпицбергена.

Основные районы работ экспедиции 2021 года охватывали три региона острова Западный Шпицберген. (рис. 19.1). Объектами исследования в 2021 г. были памятники южного и северного берегов Исфьорда (мыс Кокеринесет, мыс Даудманнсодден, Экманфьорд и мыс Смит), музейные археологические коллекции.



Рисунок 19.1 – Памятники российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген, обследованные в 2021 г.: 1 – Кокеринесет, 2 – Даудманнсодден, 3 – Вилкинсбукта, 4 – Толмодбукта, 5 – крест и могила на мысе Смит, 6 – становище на мысе Смит, 7 – становище на мысе Вийк

Работы состояли из двух этапов: первый – полевые исследования, в рамках которых проводились натурные обследования и геодезическая и квадрокоптерная съемка уже известных памятников. Их целью являлось более точная и тщательная фиксация этих объектов, выявление диагностирующих признаков. Во время проведения пеших разведок по берегам фьордов осуществлялся поиск и фиксация остатков поморских судов с последующей точной GPS-привязкой. Второй этап работ проводился в фондах Свальбардмузеума

(г. Лонгйирбюен) с целью фиксации предметов из раскопок поморских памятников на архипелаге Шпицберген.

### *Кокеринесет*

Следы перевалки (вытаскивания) достаточно хорошо прослеживаются выше на поверхности мыса.



Рисунок 19.2 – Кокеринесет, юго-восточная часть: цепь (верх) и следы вытаскивания грузов (низ)

Они представляют собой продольные борозды-углубления (рис. 19.2). Вновь выявленные объекты, вероятно, связаны с поздним китобойным промыслом (19-нач. 20 вв.), однако более определенно об этом можно будет сказать после изучения соответствующих письменных источников и анализа самой цепи.

Обследование жиротопной печи 17 в. показало, что печь медленно разрушается в результате воздействия морского прилива. Об этом свидетельствует сопоставление фотоснимков печи, сделанных в разные годы.

### *Даудманнсодден*

Характерной особенностью геологического строения мыса Даудманнсодден является наличие большого количества останцов и кряжей, вытянутых в основном в меридиональном направлении. На ближайшем к морю останце (120x65 м), отстоящем на 250 м от берега моря, находился интересный археологический комплекс, состоящий из остатков конструкции креста и могилы (рис. 19.3а,б).

От самого креста осталась нижняя часть, сохранившаяся на высоту до 31 см (рис. 19.3в). Ее диаметр у земли около 30 см, в верхней части – около 26 см. Вокруг креста сохранились остатки каменной наброски: 6 крупных камней (65x90 см при толщине до 20-30 см) и несколько мелких.

Приблизительно в двух метрах к северу от основания креста находилась погребальная конструкция (рис. 19.3г), возведение которой представляется следующим образом. Гроб, сооруженный из корабельных досок, размером 95-100x190 см и глубиной 30-35 см, был установлен непосредственно на древней дневной поверхности и затем со всех сторон был обсыпан каменно-земляным грунтом в результате чего образовался холмик-насыпь размерами около 5,2 x 3,8 м и высотой около 0,7-0,8 м. Насыпь и гроб ориентированы по линии восток-запад.

На досках гроба хорошо сохранились типичные для поморского кораблестроения детали



Рисунок 19.3 – Даудманнсодден: крест (б,в) и могила (г,д)



корабельного устройства - вицы и деревянные нагели (рис. 19.3д), что позволяет определить погребение как поморское и датировать его XVIII в.

Между основанием креста и насыпью обнаружены четыре корабельные доски длиной до 185 см, в каждой из которых также имелись вицы и нагели. Об этих деталях устройства ничего не говорится на портале Kulturminnesøk (№ 93245), соответственно и этническая атрибуция могилы была оставлена там под вопросом. Следует также отметить, что ни этот крест, ни эта могила не были выявлены и при проведении в этом районе в 1980-х гг. разведок Шпицбергенской экспедицией АН СССР. В 2021 г. была проведена детальная геодезическая съемка данных объектов и прилегающей к ним территории.

#### *Вилкинсбукта*

Памятник был открыт и раскопан в 1982 г. Шпицбергенской экспедицией АН СССР под руководством В.Ф. Старкова. Становище состояло из одного рубленого дома, расположенного на уровне первой подмываемой морским прибоем террасы в 12 м от воды и на 4 м выше уровня моря. На норвежском портале Kulturminnesøk (№ 93194) местоположение памятника определено неточно, очевидно, только на основании отчета В.Ф. Старкова. Натурное обследование в 2021 г. позволило установить точную его локализацию (рис. 19.4). За прошедшие почти 40 лет бревна дома в значительной степени подверглись разрушению в результате ветровых процессов и в перспективе памятнику грозит полное уничтожение. Как нам представляется, альтернативой могло быть воссоздание на этом месте точной копии разрушаемых строительных остатков.

#### *Толмодбукта*

Памятник был раскопан в 1882 г. шведской экспедицией под руководством Г. де Геера, а в 1998 г. был обследован норвежской экспедицией. Он состоял из одной двучастной постройки, ориентированной длинными стенами по линии СЗ-ЮВ. Её размеры 5,15 x 3,0 м. Сени шириной 1,8 м пристроены с восточной стороны. Дом находился на расстоянии 20 м от берега залива, на высоте 2,5 м над его уровнем. В 2021 г. произведена детальная фиксация строительных остатков становища при помощи квадрокоптера и инструментальная геодезическая съемка тахеометром (рис. 19.5).



Рисунок 19.4 – Поморское становище Вилкинсбукта (Wilkinsbukta Kulturminnelid 93194). 1 – неточная локализация (KULTURMINNESØK), 2 – локализация по натурным исследованиям ИА РАН 2021 г.

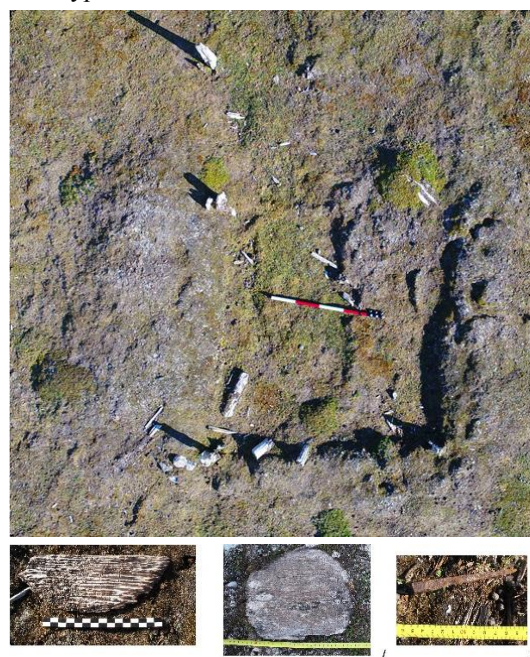


Рисунок 19.5 – Становище Толмодбукта, съемка квадрокоптером (вверху), фрагменты: 1 – деревянных крышек, 2 – кованного гвоздя (внизу)



## *Мыс Смит*

Крест и могила расположены на южной стороне мыса на краю естественного возвышения (рис. 19.6). От креста, обрубленного топором, осталось прямоугольное в плане основание (26x20 см), сохранившееся на максимальную высоту до 28 см. Вокруг креста была сделана наброска из рваных камней длиной до 70 см и толщиной до 30-35 см. Диаметр наброски около 3 м, ее высота около 40 см. (рис. 19.6). Приблизительно в 5 м к западу от креста находился каменно-земляной могильный холм размерами около 2,2 x 1,4 м, высотой около 0,3 м и ориентированный по линии СВ-ЮЗ (рис. 19.6).

Становище на мысе Смит находилось на северо-восточной стороне мыса на расстоянии около 560 м к северо-востоку от креста. Остатки становища возвышаются на высоту около 0,5 м. Его размеры около 7,5 м по линии З-В и 7,0 м по линии Ю-С. На его площади сохранились остатки деревянных конструкций и обломки красного кирпича от разрушенного очага (рис. 19.7). Сделана инструментальная тахеометрическая съемка памятника.

### *Судовое дерево*

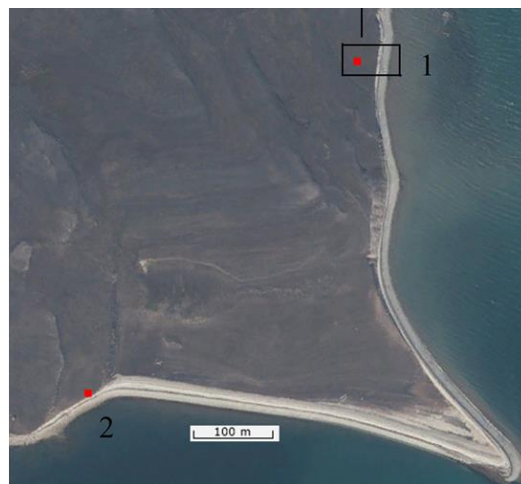
В период разведок по берегам фьордов производилась фиксация обломков судов, которые определенно можно связать с поморской кораблестроительной традицией по признакам наличия нагелей и/или виц. Всего их зафиксировано не менее 10 экземпляров (рис. 19.8).

### *Работа в фондах Свальбардмузеума.*

В Свальбардмузеуме (г. Лонгйирбюен) хранится большая коллекция предметов, обнаруженных при раскопках поморских памятников Шпицбергена, проводившихся как экспедицией ИА РАН, так и многочисленными западноевропейскими археологическими экспедициями. В 2021 г. продолжена фотофиксация поморских коллекций. Полностью обработана коллекция находок (более 600 экз.) из раскопок поселения Кокеринесет, проводившихся в 2007-2008 гг. совместной российско-голландской экспедицией и значительная часть коллекции (более 170 экз.) из раскопок поселения на мысе Вийк, проводившихся в 2002 году норвежско-немецкой экспедицией. Несколько выразительных находок представлено на рис. 19.9.

### *Заключение*

Проведенный мониторинг памятников на



1 – становище, 2 – крест и могила



Рисунок 19.6 – Мыс Смит: могила и крест

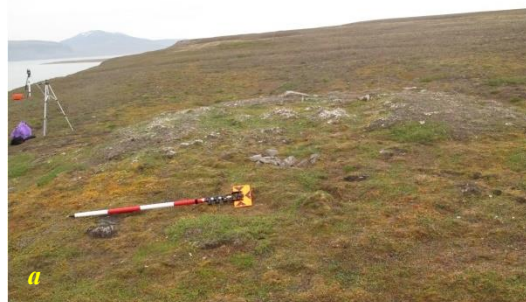


Рисунок 19.7 – Мыс Смит: становище (а), остатки печи (б), деревянный столб (в)



архипелаге экспедицией ИА РАН в 2021 г. и сопоставление его с результатами прошлых лет показывает, что в результате воздействия природных факторов происходит медленное, но неуклонное разрушение определенной части археологических памятников. Поэтому ежегодный мониторинг археологических объектов представляется актуальным, поскольку степень разрушения памятников каждый год может иметь различную степень интенсивности.

Все сведения, касающиеся сохранности археологических памятников ежегодно отправляются в Контору Губернатора Свальбарда. И в случае серьезного аварийного состояния памятника норвежская администрация должна принять меры по обеспечению его сохранности.

В результате проведенных в 2021 году обследований различных поморских памятников в районе Исфьорда получена новая важная информация о памятниках российского культурно-исторического наследия на архипелаге Шпицберген.

Во время работы в Свальбардмузеум в норвежском поселке Лонгиербюене было обработано (оцифровка, описание, обмеры) более 700 индивидуальных археологических находок из поморских памятников Шпицбергена.

В 2021 году вышел из печати каталог: Державин В.Л., Колесников А.Б. Археологическая коллекция музея «Помор» на Шпицбергене. Исследования в Арктике Института археологии Российской академии наук. Каталог. М.: ИА РАН, 2020. 160 с. Книга представляет собой каталог археологической коллекции музея «Помор», находящегося в российском поселке Баренцбург на архипелаге Шпицберген (Норвегия). Основу собрания составляют находки Шпицбергенской археологической экспедиции Института археологии РАН, проводившей раскопки в Арктике с 1979 по 2003 г.: предметы материальной промысловой культуры поморов, а также находки с западноевропейских китобойных станций Шпицбергена (XVI–XX вв.). Кроме них в музее экспонируются артефакты, связанные с историей освоения северо-восточного морского пути: голландской экспедицией Виллема Баренца 1596–1597 гг. на Новой Земле и русской экспедицией адмирала Василия Яковлевича Чичагова 1864–1866 гг. Публикуемые материалы представлены впервые.

Книга Державина В.Л. и Колесникова А.Б. была представлена на книжных ярмарках и выставках – 7-й книжный фестиваль «Красная

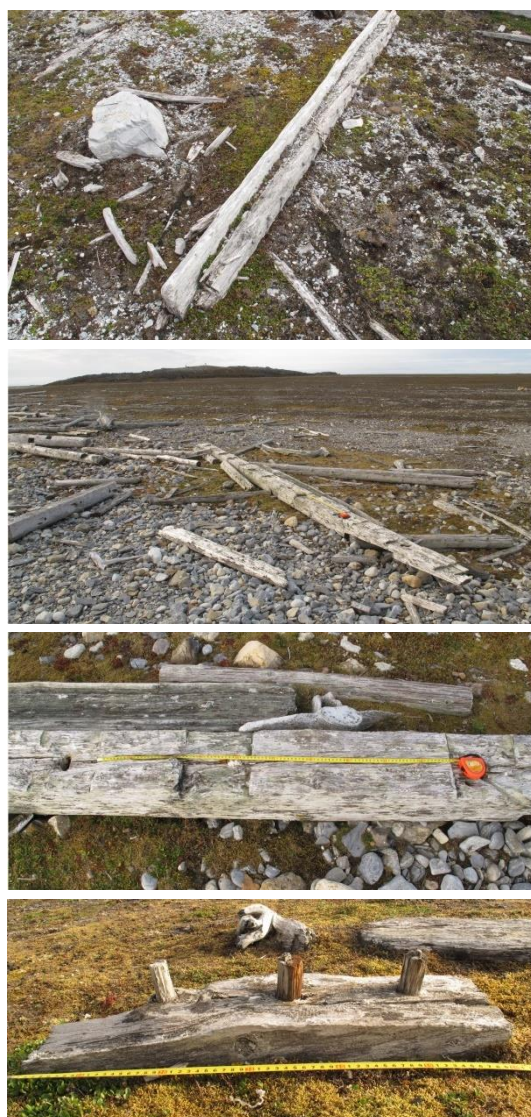


Рисунок 19.8 – Судовые детали



Рисунок 19.9 – Находки на поморских становищах: 1 – о. Медвежий, 2–5 мыс Вийк. 1,2 – бронзовое литье Выговской пустыни, 2 – киот, 3,4 – календари, 5 – шахматная фигурка пешка



площадь» (17-20 июня 2021 года), 34-я Московская международная книжная ярмарка (24 – 27 сентября 2021 года).

На YouTube-канале ИА РАН размещена презентация каталога по ссылке <https://www.youtube.com/watch?v=yOZQ8UlaB6U>.

Исследования выполняли: Державин В.Л. [detrzh@yandex.ru](mailto:detrzh@yandex.ru), Колесников А.Б. [abkolesnikov60@mail.ru](mailto:abkolesnikov60@mail.ru), Старков В.Ф., Дербенев М.П. [uionest@mail.ru](mailto:uionest@mail.ru), Сулавко П.Г. [sulavko@list.ru](mailto:sulavko@list.ru), Шаврин С.А.

#### Литература:

Державин В.Л. Раскопки поселения Кокеринесет в 2007-2008 гг. //Проблемы морской палеоэкологии и биогеографии в эпоху глобальных изменений. Комплексные исследования природы архипелага Шпицберген. Выпуск 9. Москва. «Геос». 2009. С. 229-241.

Самойлович Р.Л. Остров Шпицберген и первая русская научно-промысловая экспедиция. Архангельск. 1913. 38 с.

Старков В.Ф. Первые археологические раскопки на архипелаге Шпицберген. 2011. 127 с.

Старков В.Ф., Черносивтов, П.Ю., Державин В.Л., Захаров В.Г., Звягин В.Н., Шарин В.В. Материальная культура русских поморов. Вып. II. Поселения и погребения. М. 2005. 212 с. (коллективная монография).

Christiansen H. The Russian Settlement at Russekeila and land Rise in Spitsbergen - In: Arctic-Journal of the Arctic Institute of North Amerika, 1961. P. 112-118.

Conway M. No man's land. Cambridge. 1906. 377 p.

Norberg H.L. Om Spitsbergens kolonisation i aeldre tider. - Tromso Museums Aarshefter, N 38 - 39, 1915-16. Tromso.

**ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)**

**Мероприятие 20. Исследование энерго- и газообмена, а также структуры атмосферного пограничного слоя в прибрежных районах Шпицбергена**

Основная цель проекта исследовать динамику и структуру атмосферного пограничного слоя над сложным рельефом в полярных районах. К задачам относятся:

- исследование трансформации воздушного потока на границе берег-море;
- исследование динамики атмосферы под действием склонового ветра с поверхности ледника;
- исследование энерго- и газообмена над различными поверхностями (ледник, тундра, поверхность фьорда);
- определение турбулентных потоков тепла над различными поверхностями и при различных фоновых условиях.

Работы шли по двум направлениям: экспериментальные исследования в п. Баренцбург и моделирование природных процессов на архипелаге Шпицберген. В 2021 г. исследования выполняли Репина И.А., Чечин Д.Г., Шестакова А.А., Варенцов М.И., Мамонтов А.Е.

Для исследования структуры и динамики АПС использовались беспилотные летательные аппараты. Для моделирования использовались региональные негидростатические и аналитические модели, в частности негидростатическая модель NH3D и прогностическая модель WRF.

1. В рамках экспедиционных работ на архипелаге Шпицберген, выполнявшихся в период с 2 по 11 сентября 2021 года, проведены измерения температурно-ветровой стратификации атмосферы в условиях сильно неоднородного ландшафта в окрестностях п. Баренцбург. Для этого использовался измерительный комплекс на базе беспилотного летательного аппарата, квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro с комплектом метеорологических датчиков iMet-XQ2 (рис. 20.1а). Методика измерений позволяет получать вертикальные профили основных метеорологических величин в нижней тропосфере – температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра в нижних 500 м.



Рисунок 20.1 – Оборудование, использованное для измерений на архипелаге Шпицберген: два квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro с датчиками iMet-XQ2 (а) и квадрокоптер DJI Mavic 2 Zoom с тепловизором Flir TAU 2R (б)

Для базовой точки мониторинга, расположенной в п. Баренцбург, рядом с Научно-исследовательской базой Кольского научного центра РАН, измерения проводились в квазирегулярном режиме в сроки, приближенные к срокам стандартных метеорологических измерений (за исключением ночных сроков), вертикальный диапазон измерений составлял от 250 до 500 м в зависимости от погодных условий. Один раз в сутки выполнялись синхронные измерения над базовой точкой и над водной поверхностью Гренфьорда, на расстоянии около 500 метров от базовой точки. Кроме того, в ходе полевых выездов проводились профильные измерения в районе нижней границы ледников в окрестностях Баренцбурга: 7 сентября в

районе ледника Альдегонда, 9 сентября в районе ледника Западный Гренфьорд. В ходе каждого из этих полевых выездов проводились серии профильных измерений с дискретностью около 30 минут и продолжительностью 3-4 часа, вертикальный диапазон измерений составлял 200-300 м. Кроме профильных измерений, для всех точек мониторинга проводилось картирование термической неоднородности подстилающей поверхности с помощью тепловизора Flir TAU 2R, установленного на квадрокоптере DJI Mavic 2 Zoom (рис. 20.1б).

Предварительный анализ данных профильных измерений на архипелаге Шпицберген позволил диагностировать широкий ряд эффектов, характеризующих влияние неоднородного ландшафта на температурную и ветровую стратификацию нижней тропосферы. Измерения на ледниках позволили диагностировать эффект стокового ледникового ветра, выраженный в усилении приземной скорости ветра и резким изменением направления ветра выше определенной высоты (рис. 20.2). В профиле температуры при этом наблюдалась приземная инверсия глубиной в 1-2°C и вертикальной протяженностью в 20-30 м. Примечательно, что толщина слоя, в которой наблюдался стоковый ветер, была не постоянна во времени. Так, в ходе измерений на леднике Западный Гренфьорд она менялась от 50 до 150 метров. Такая временная изменчивость может свидетельствовать о наличии более сложных мезомасштабных циркуляционных структур над ледником.

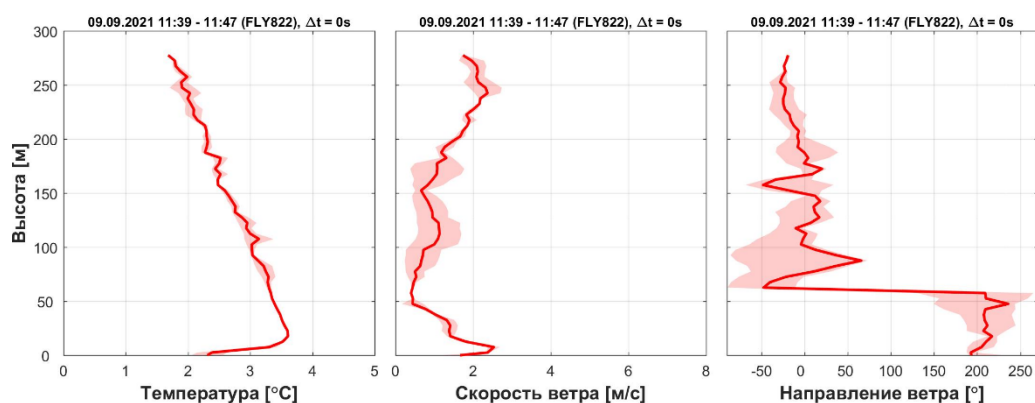


Рисунок 20.2 – Вертикальные профили температуры воздуха, скорости и направления ветра по данным измерений с помощью квадрокоптера в точке у нижней границы ледника Западный Гренфьорд 9 сентября 2021 г в срок 11:45 UTC. Полупрозрачная заливка показывает разброс значений между профилями, сделанными при подъеме и спуске квадрокоптера. По оси ординат показана относительная высота над точкой запуска

Измерения на базовой точке в п. Баренцбург также позволили идентифицировать случаи наблюдения местных циркуляций, предположительно связанных с горно-долинными эффектами и выраженными в наличие максимума скорости ветра вблизи поверхности, выраженный как над склоном долины, так и над фьордом (рис. 20.3а). Результаты тепловизионной съемки позволили диагностировать ярко выраженную термическую неоднородность поверхности в районе Баренцбурга, обусловленную влиянием орографии, застройки и разнообразия типов подстилающей поверхности, с контрастами температуры более 20°C в пределах областей съемки размером 500x500 м (рис. 20.3б). Для участков съемки в районе границы ледников высокая температурная неоднородность была выявлена для свободных от льда участков, однако для поверхности льда температура слабо варьировалась несмотря на наличие трещин, каньонов и участков с разным альбедо.

2. Проведено исследование фенового эффекта на западных склонах Шпицбергена при восточном направлении крупномасштабного синоптического потока. Обусловленная влиянием орографии Шпицбергена пространственная структура полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха подробно исследована для случая фена, наблюдавшегося 30-31 мая 2017 г. Для этого был проведен анализ стационарных данных, данных радиозондирования, самолетных и судовых наблюдений, собранных во время измерительных кампаний PASCAL/ACLOUD (Wendisch et al. 2019), а также результатов численного

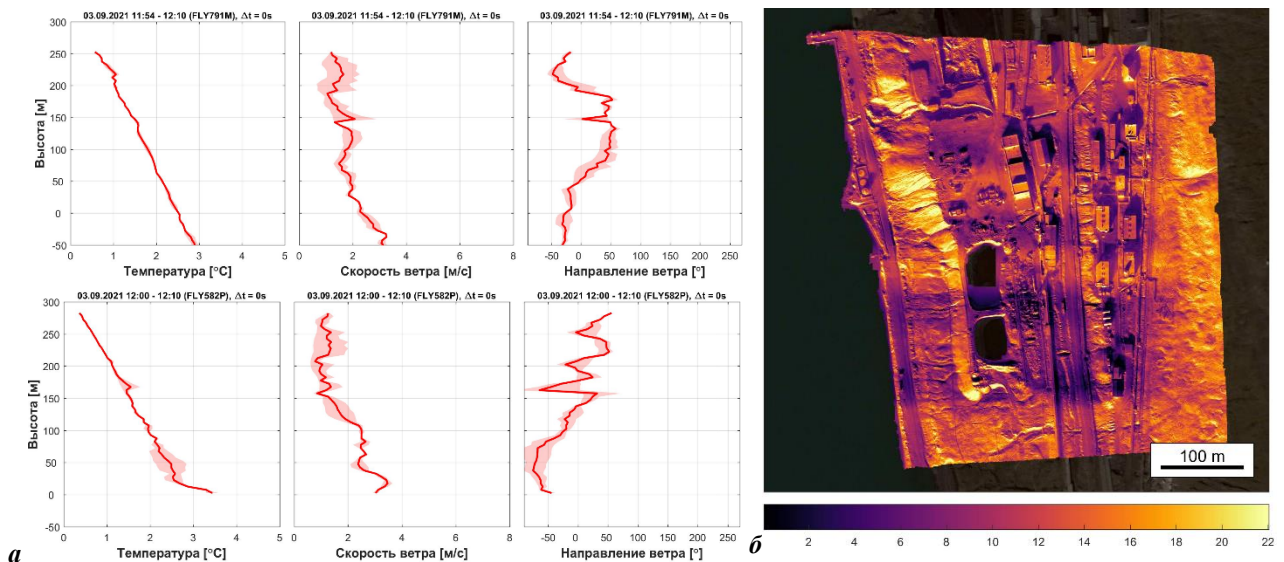


Рисунок 20.3 – Вертикальные профили температуры воздуха, скорости и направления ветра по данным измерений с помощью квадрокоптеров в Баренцбурге в срок 12 UTC 3 сентября 2021 г. Верхние профили измерены над базовой точкой на склоне долины, нижние профили измерены над поверхностью фьорда. По оси ординат показана относительная высота над точкой запуска ( $\approx 60$  м над уровнем моря) (а) и пример пространственного распределения яркостной температуры поверхности в окрестностях базовой точки в Баренцбурге (б)

моделирования с помощью модели WRF. Показано, что феновое потепление составило до  $10^{\circ}\text{C}$  и достигало наибольшей величины с подветренной стороны меридионально вытянутых хребтов северной части архипелага (рис. 20.4а). С подветренной стороны от широтно вытянутых горных долин и фьордов наблюдались «языки» более холодного воздуха, что объясняется наименьшей величиной фенового эффекта, а также более интенсивным энергообменом воздуха с холодной подстилающей поверхностью. Для поля ветра были характерны мысовые струи, внутри которых скорость ветра более чем в два раза превышала скорость крупномасштабного ветра, а также струи ущелий (рис. 20.4б). Эти ветры наблюдались над открытой водой на существенном расстоянии от архипелага. Бури подветренных склонов имели малую протяженность и наблюдались непосредственно над склонами.

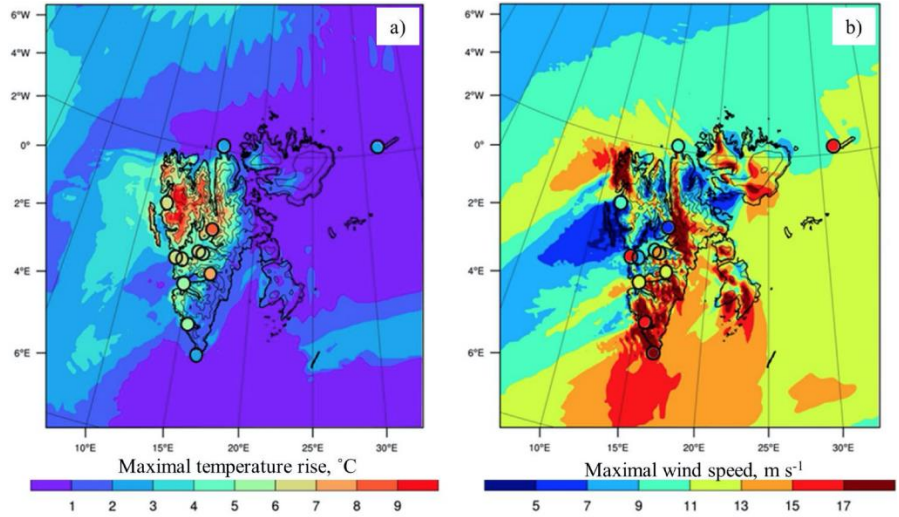


Рисунок 20.4 – Увеличение температуры воздуха на высоте 2м над поверхностью во время фена (а) и скорость ветра на высоте 10 м по стационарным данным и результатам моделирования с помощью модели WRF (б)

Были также сделаны расчеты составляющих теплового баланса поверхности по данным измерений в Нью-Олесунне и в долине Адвентдален. Показано, что обусловленные феном безоблачное небо, а также возросшие значения турбулентного потока тепла из

атмосферы к поверхности привели к интенсификации таяния снежного покрова. Полученные результаты указывают на важную роль эпизодов фена для баланса массы ледников и энергообмена атмосферы и океана вблизи Шпицбергена.

3. Исследована турбулентная структура атмосферного пограничного слоя (АПС) над морским льдом в проливе Фрама при наличии в верхней части АПС слоисто-кучево-облачности. Для этого использованы данные самолетных наблюдений во время измерительной кампании ACLOUD в мае-июне 2017 г. над морским льдом к северо-западу от Шпицбергена. Показано, что длинноволновое выхолаживание на верхней границе облаков приводит к перевернутой конвекции, что является одним из основных механизмов генерации турбулентности в пограничном слое. Для облачного слоя характерно наличие максимума турбулентного потока тепла, максимума дисперсии вертикальной скорости, а также отрицательные значения коэффициента асимметрии вертикальной скорости (рис. 20.5). Также, для облачного слоя характерны отрицательные значения третьих моментов  $\overline{w'w'T'}$  и  $\overline{w'T'T'}$ , что свидетельствует о важной роли крупных вихрей в турбулентном теплообмене.

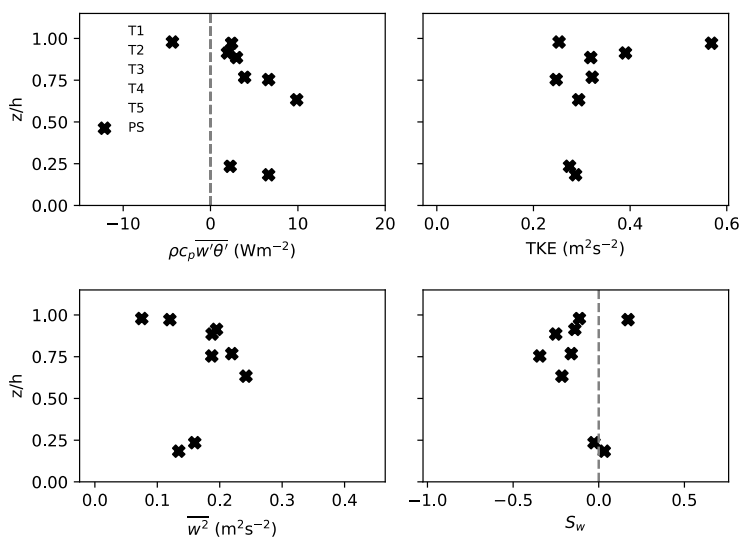


Рисунок 20.5 – Вертикальные профили турбулентного потока тепла, турбулентной кинетической энергии, дисперсии вертикальной скорости и коэффициента асимметрии вертикальной скорости по данным самолетных наблюдений в пограничном слое над морским льдом при наличии в нем облачности 5.06.2017 к северу от Шпицбергена. Цветные точки соответствуют медленным наборам высоты и снижениям, черные «X» - горизонтальным отрезкам полета

#### Основные выводы:

- Данные профильных метеорологических измерений на архипелаге Шпицберген позволили диагностировать ряд эффектов, характеризующих влияние неоднородного ландшафта на температурную и ветровую стратификацию нижней тропосферы. Измерения на ледниках выявили эффект стокового ледникового ветра, выраженный в усилении приземной скорости ветра и резким изменением направления ветра выше определенной высот.
- По результатам тепловизионной съемки диагностирована ярко выраженная термическая неоднородность поверхности в районе Баренцбурга, обусловленная влиянием орографии, застройки и разнообразия типов подстилающей поверхности.
- По результатам модельных расчетов для прибрежных районов Шпицбергена показано, что обусловленное фёном безоблачное небо, а также возросшие значения турбулентного потока тепла из атмосферы к поверхности приводят к интенсификации таяния снежного покрова. Полученные результаты указывают на важную роль эпизодов фёна для баланса массы ледников и энергообмена атмосферы и океана вблизи Шпицбергена.
- По результатам самолетных наблюдений над морским льдом к северо-западу от Шпицбергена показано, что длинноволновое выхолаживание на верхней границе облаков приводит к перевернутой конвекции, что является одним из основных механизмов генерации турбулентности в пограничном слое. Для облачного слоя характерно наличие максимума турбулентного потока тепла, максимума дисперсии вертикальной скорости, а также отрицательные значения коэффициента асимметрии вертикальной скорости.



По результатам исследований опубликована статья:

Shestakova, A. A., Chechin, D. G., Lüpkes, C., Hartmann, J., and Maturilli, M.: Foehn effect during easterly flow over Svalbard, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* DOI 10.5194/acp-2021-478, in review, 2021.

Результаты также представлены на конференциях:

Чечин Д.Г., Люпкес К., Хартманн Й. Самолетные наблюдения турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя над морским льдом в Арктике. Всероссийская конференция молодых ученых-механиков. 3-12 сентября 2021 г., Сочи, «Буревестник» МГУ, Россия.

Repina I. Wind climate of Svalbard. *Research in Svalbard: An APECS workshop.* 1 November 2021. Oslo.

Мероприятие 20 выполнено полностью.

Литература:

Wendisch, M., Macke, A., Ehrlich, A., Lüpkes, C., Mech, M., Chechin, D., ... & Zeppenfeld, S. The Arctic cloud puzzle: Using ALOUD/PASCAL multiplatform observations to unravel the role of clouds and aerosol particles in Arctic amplification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019. 100(5), p. 841-871.

## Заключение

Межведомственная программа научных исследований и наблюдений на арх. Шпицберген 2021 года включает 20 мероприятий, которые выполняются 13 организациями Консорциума. Продолжающиеся ограничительные меры, связанные с пандемией новой коронавирусной инфекции, сделали выполнение некоторых Мероприятий затруднительным или невозможным за счет трудностей, связанных с проездом научных сотрудников на архипелаг Шпицберген и необходимости прохождения карантина в материковой Норвегии.

В 2021 г. получены новые данные по гидрометеорологическому режиму, океанологии, гидрологии, гляциологии, геофизики, геологии, биологии и экологии, исследованы новые археологические памятники. В полном объеме проведен сбор натуральных данных, получаемых постоянным (зимовочным) составом или автоматизированными автономными системами наблюдений. Круглогодичные программы мониторинга проводят ААНИИ и Мурманское УГМС Росгидромета. Сбор информации и наблюдения в дистанционном режиме продолжает Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН и Полярный геофизический институт. После проведения необходимого анализа, собранные данные позволят оценить современное состояние природной среды архипелага, выявить взаимосвязи между протекающими в ней процессами и тенденции происходящих изменений.

ГМО «Баренцбург» Мурманского УГМС полностью выполнило программу работ. Материалы наблюдений обработаны, результаты занесены в климатическую базу данных. Зима 2020-2021 была выше климатической нормы на 5,5°C, лето – на 0,7°C, и только весна (май) – соответствовала климатической норме. При этом количество осадков в течение года было сравнимо или ниже климатической нормы, за исключением сентября. Отсутствие значительных оттепелей отразилось в однородном снежном покрове, накопившемся за зимний период.

Спутниковый мониторинг акватории и побережья Северного Ледовитого океана и арктических морей при помощи расположенного в Баренцбурге антенного комплекса, постоянные океанологические, метеорологические, геофизические наблюдения, химико-аналитические исследования выполнены зимовочным составом ААНИИ в полном объеме.

В п. Пирамида расконсервированы и оснащены термометрическими косами пробуренные в советское время скважины, что расширило сеть наблюдений за мерзлотой в различных типах ландшафта. Данные мониторинга термического состояния мерзлоты в районе Баренцбурга передавались в международные системы наблюдений CALM и GTN-P. Были продолжены изучение и мониторинг состояния мерзлотных форм рельефа в районе п. Баренцбург. Начаты исследования мерзлых толщ в приустьевых участках долин рек и под припайным льдом в морских заливах.

Изучение состояния ледников носило комплексный характер. Масс-балансовые наблюдения показали уменьшение объемов стаивания на ледниках Альдегонда и Западный Гренфьорд за 2021 г. по сравнению с предыдущими. На этих же ледниках оценивались радиационный баланс поверхности и микроклиматические особенности с помощью маршрутных и стационарных актинометрических измерений в течение сезона абляции. В рамках совместной работы с ИГ РАН георадарным зондированием установлены мощность, термическое состояние и характер подлёдного ложа ледников Вёринг, Пассфьель, Слакбрин, Восточный Гренфьорд, Эрдман, Фритьоф.

В рамках океанологического мониторинга водных масс заливов установлены две автоматические притопленные буйковые станции, проведены зондирования водной толщи в заливах Исфьорд, Биллефьорд, Гренфьорд, Диксонфьорд. Изучение гидрологического цикла рек бассейна Гренфьорд дополнилось экспериментальным измерением испарения с поверхности снежного покрова и оценкой состояния снежного покрова методом георадарного зондирования. Палеогеографические исследования не были выполнены в части полевых работ, но продолжились спорово-пыльцевым анализом, радиоуглеродным

датированием и интерпретированием полученных ранее материалов, что позволило описать этапы развития речных долин в голоцене, изменение уровня моря и поверхностного стока.

Экологический мониторинг в районах хозяйственной деятельности российских предприятий был выполнен СЗФ НПО «Тайфун» совместно с ААНИИ в полном объеме, включая подготовку и частичный анализ образцов в химико-аналитической лаборатории в п. Баренцбург.

Сотрудники ВНИИОкеангеология успешно провели полевые исследования ландшафтов на северном побережье залива Исфьорд, составили предварительные карты геологического содержания на ключевые участки и отобрали образцы для эталонной коллекции горных пород разновозрастных структурно-формационных и магматических комплексов Шпицбергена.

В сотрудничестве с коллегами из ВНИИОкеангеология ученые ИА РАН проводили изучение археологических объектов. Уточнено местоположение и текущее состояние археологических комплексов на мысах Кокеринесет, Смит, Даудмансодден, в Вилкинсбукте и Толмонбукте, изучены остатки судового дерева и объекты из коллекции Свальбардмузеума. На основе исследований опубликован каталог археологической коллекции музея «Помор» на Шпицбергене.

Специалисты Полярного ботанического сада КНЦ РАН не смогли провести полевые изыскания, и сосредоточились на анализе и обобщении собранных ранее образцов и данных: составлен продромус растительности гольцовых пустынь, обобщены данные по биоразнообразию и распространению цианопрокариот архипелага, 85 видов которых выявлены впервые, подготовлен аннотированный список печеночников, оценена степень пластичности фотосинтетического аппарата и механизмов адаптации одиннадцати видов высших сосудистых растений Западного Шпицбергена, выявлена зависимость скорости разложения растительных остатков от природных условий.

Ученые Института географии РАН оценили абляцию ледника Восточный Гренфьорд, определили влияния величины солнечной радиации, жидких осадков и параметров мха, а также высоты местности на термический режим и стабильность сезонно-талого слоя грунта. Изученная зависимость максимальной глубины и площади зеркала приледниковых озер оказалась характерной для Шпицбергена по сравнению с другими районами оледенения. Анализ образцов криоконитов выявил, что содержание углерода и обеспеченность азотом в криоконитовом материале и в почве молодой морены больше, чем в почвах, развивающихся вне современной перигляциальной зоны. Датирование древесины плавника, отобранного на побережье и террасах Западного Шпицбергена, позволило построить две плавающие хронологии для оценки возраста и происхождения древесины.

Помимо анализа данных мониторинга сейсмической обстановки и инфразвуковых сигналов в районе Шпицбергена сотрудники ФИЦ ЕГС РАН развивали методы автоматического распознавания типов геофизических процессов, апробировали новый подход к выделению сигналов, связанных с подводными взрывами, и получили первые результаты, предварительно свидетельствующие о возможных процессах взрывной дегазации осадочного чехла во фьордах и проливах архипелага.

Сотрудники ПГИ сравнили развитие двух полярных суббурь, проанализировали одновременные наблюдения аврорального хисса в трех пространственно-разнесенных точках, проследили прямую связь энергии электронов и интенсивности аврорального свечения, изучили потоки вторичных космических лучей на протяжении всего 24-го цикла солнечной активности, смоделировали прохождение протонов солнечных космических лучей через атмосферу Земли для событий возрастания интенсивности космических лучей на поверхности Земли GLE42 и GLE44. Была проведена модернизация и масштабное техническое обслуживание оборудования геофизической обсерватории в п. Баренцбург.

С помощью измерительных комплексов, установленных на квадрокоптерах, исследователи ИФА им. А.М. Обухова РАН провели измерения температурно-ветровой

стратификации атмосферы в условиях сильно неоднородного ландшафта в окрестностях п. Баренцбург и на ледниках и диагностировали широкий ряд эффектов, характеризующих влияние неоднородного ландшафта на температурную и ветровую стратификацию нижней тропосферы, и выявили эффект стокового ветра на ледниках. Модельные расчеты показали важную роль эпизодов фёна для баланса массы ледников и энергообмена атмосферы и океана вблизи Шпицбергена.

Морская комплексная экспедиция по изучению экосистем фьордов Шпицбергена запланирована ММБИ РАН на конце ноября – начало декабря 2021 г. Летние береговые наблюдения не проводились.

В связи с тем, что проект ФИЦ КНЦ РАН по изучению минералогического разнообразия Шпицбергена является новым и каменный материал в 2020 и 2021 году отобрать не удалось, исследования по проекту выполнены не были.

В связи с продолжающимися ограничениями на въезд в Норвегию, российские ученые не смогли лично участвовать в «Международной конференции по изучению Шпицбергена» (SSC-2021), прошедшей в Осло 2-3 ноября 2021 г. На конференцию были приняты 7 докладов российских ученых первыми авторами и 5 докладов в соавторстве с иностранными коллегами. Представители ИФА им. А.М.Обухова РАН, ПАБСИ КНЦ РАН и ММБИ РАН удаленно участвовали в сопутствующем семинаре по исследованию Шпицбергена, организованной Ассоциацией молодых полярных исследователей (APECS).

Несмотря на продолжающиеся в 2021 г. трудности при организации экспедиционных полевых работ, благодаря взаимной информационной и логистической поддержке, организациям-партнерам по РНЦШ в целом удалось выполнить программу исследований и наблюдений. Целевые показатели программы в целом достигнуты.



**Целевые индикаторы и показатели программы научных наблюдений и исследований на архипелаге Шпицберген в 2021 г.**

№	Целевые индикаторы и показатели	Запланировано	Фактически
1	Количество публикаций в реферируемых изданиях, содержащих результаты научной деятельности, полученные в рамках выполнения проектов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (единиц)	41	45
2	Прирост объема информации о природной среде арх. Шпицберген (гигабайт), в том числе данные постоянных метеорологических, геофизических и спутниковых наблюдений	18200	17800
3	Количество молодых ученых (специалистов) ВУЗов, студентов и аспирантов, привлеченных к выполнению НИОКР в рамках проекта	25	28
4	Количество зарегистрированных результатов интеллектуальной собственности, в том числе направленных на государственную регистрацию	3	0