

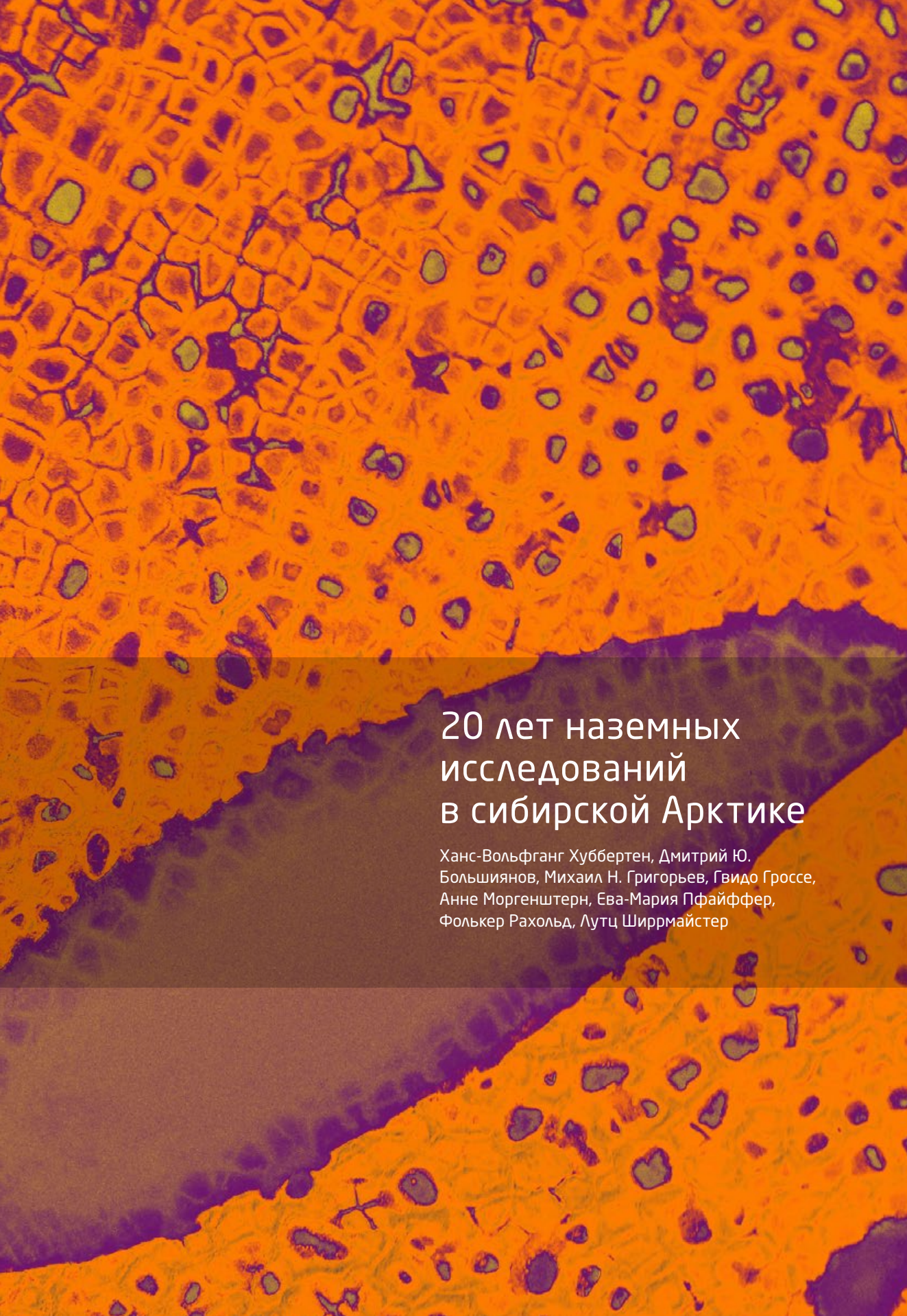


20

лет наземных исследований  
в сибирской Арктике  
История экспедиций  
"Лена"



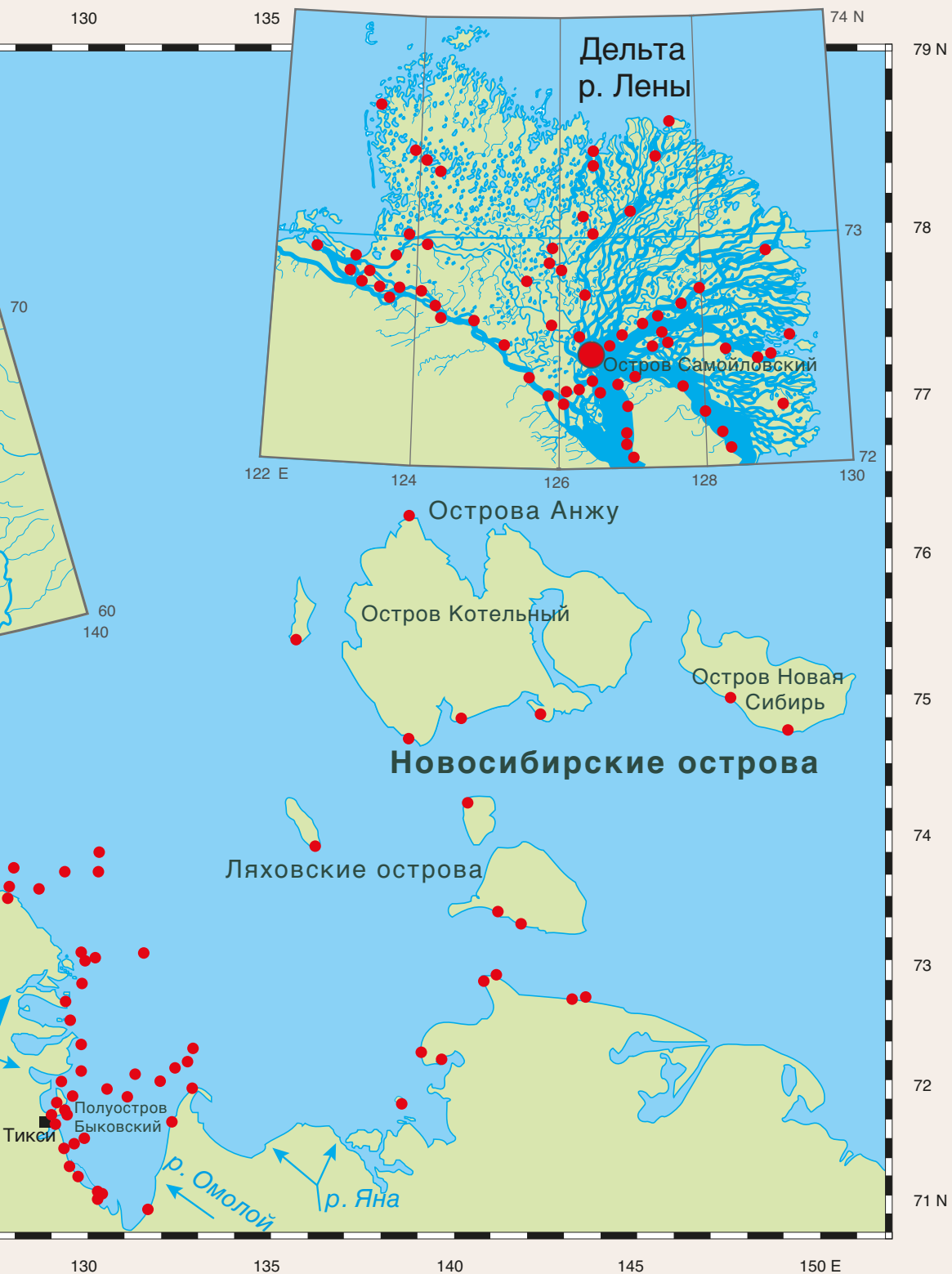




## 20 лет наземных исследований в сибирской Арктике

Ханс-Вольфганг Хуббертен, Дмитрий Ю.  
Большиянов, Михаил Н. Григорьев, Гвидо Гроссе,  
Анне Моргенштерн, Ева-Мария Пфайффер,  
Фолькер Рахольд, Лутц Ширрмайстер





## Содержание

Введение и предыстория наземных экспедиций в Сибири <i>Ханс-Вольфганг Хуббертен, Дмитрий Ю. Большианов, Михаил Н. Григорьев, Фолькер Рахольд, Ева-Мария Пфайффер</i>	8
<b>1. Дорога к экспедициям «Лена» 1993-1997 гг.</b>	
Озерные отложения на Таймыре и Северной Земле как климатический архив <i>Пьер Паул Овердуин, Дмитрий Ю. Большианов, Мартин Меллес</i>	18
Первые исследования выбросов, энергетических и водных характеристик почвы тундровой зоны - озёра Лабаз и Левинсон-Лессинга, полуостров Таймыр <i>Ева-Мария Пфайффер, Юлия Бойке, Михаил П. Журбенко, Дмитрий Ю. Большианов</i>	24
Исследование многолетнемерзлых толщ Таймырской низменности (1994-1996) <i>Кристине Зигерт, Александр Ю. Деревягин</i>	26
Углерод в почвах арктической пустыни Северной Земли <i>Ева-Мария Пфайффер, Михаил П. Журбенко, Дмитрий Ю. Большианов</i>	30
Сибирские реки: гидрология, геохимия и перенос осадков - проект «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» в 1994-1997 гг. <i>Фолькер Рахольд</i>	33
<b>2. Начало экспедиций «Лена» 1998-2002 гг.</b>	
Истоки научного проекта «Дельта Лены»: научная стратегия, сотрудничество и материально-техническое обеспечение <i>Фолькер Рахольд, Мартин Антонов, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Ева-Мария Пфайффер</i>	38
Первые годы почвенно-климатических исследований вечной мерзлоты на острове Самойловском и в его окрестностях (исследования 1998 - 2001 гг.) <i>Ева-Мария Пфайффер, Юлия Бойке, Гюнтер Штооф, Ларс Кутцбах, Михаил Н. Григорьев, Ирина А. Якшина, Анна Н. Курчатова, Дмитрий Ю. Большианов</i>	42
Полуостров Быковский: первая наземная экспедиция с акцентом на изучение палеоклимата <i>Лутц Ширрмайстер, Гвидо Гроссе, Виктор В. Куницкий, Кристине Зигерт, Ханно Майер</i>	48
Геоморфологические исследования и изучение эрозии прибрежной зоны в экспедициях корабельного базирования 1998-2002 гг. на судах «Дунай», «Нептун», «Софрон Данилов» и «Павел Башмаков» <i>Фолькер Рахольд, Валдемар Шнайдер, Михаил Н. Григорьев, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Феликс Э. Арэ, Дмитрий Ю. Большианов</i>	52

Озерные исследования на острове Арга: история и формирование дельты реки Лены <i>Георг Швамборн, Михаил Н. Григорьев, Фолькер Рахольд, Владимир Е. Тумской, Лутц Ширрмайстер, Гвидо Гроссе</i>	55
Микробная трансформация углерода в сезонно-талом горизонте и вечной мерзлоте <i>Сюзанне Либнер, Кристиан Кноблаух, Ева-Мария Пфайффер, Светлана Ю. Евграфова, Дирк Вагнер</i>	58
Полевые работы по реконструкции палео-окружающей среды <i>Лутц Ширрмайстер, Татьяна В. Кузнецова, Андрей А. Андреев, Франк Кинаст, Дмитрий Ю. Большианов</i>	61
<b>3. Изучение процессов динамики вечной мерзлоты 2002-2006 гг.</b>	
Бурение подводной вечной мерзлоты в ходе экспедиции «COAST 2005» <i>Фолькер Рахольд, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Вальдемар Шнайдер</i>	68
Старая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский» и ее расширение в 2005 году <i>Ханс-Вольфганг Хуббертен, Юлия Бойке, Ева-Мария Пфайффер, Гюнтер Штооф, Александр Ю. Гуков</i>	71
Установка наблюдений на острове Самойловский - Многолетнемерзлые почвы и парниковые газы (исследования 2002-2006 гг.) <i>Ларс Кутцбах, Кристиан Вилле, Торстен Закс, Давид Холл, Гюнтер Штооф, Юлия Бойке, Михаил Н. Григорьев, Ева-Мария Пфайффер</i>	76
Микробная трансформация азота в активном слое почвы и более глубоких мерзлотных отложениях в дельте реки Лены <i>Клавдия Финке, Тина Сандерс, Фабиан Берманн, Елена Е. Лебедева, Ева-Мария Пфайффер</i>	82
Геокриологические и палеоклиматические исследования в береговой зоне моря Лаптевых (Новосибирские острова) <i>Лутц Ширрмайстер, Гвидо Гроссе, Ханно Майер, Кристине Зигерт, Михаил Н. Григорьев, Виктор В. Куницкий</i>	86
Долговременные наблюдения за водной фауной в озерах и прудах дельты реки Лены <i>Екатерина Н. Абрамова, Ирина И. Вишнякова, Григорий А. Соловьев, Анна А. Абрамова</i>	90
<b>4. Период без крупного проектного финансирования 2007 – 2012 гг.</b>	
Динамика берегов моря Лаптевых <i>Франк Гюнтер, Михаил Н. Григорьев, Пьер Пауль Овердуин, Хьюг Лантуи, Ханс-Вольфганг Хуббертен</i>	96
Полевые работы, цифровое моделирование подводной вечной мерзлоты и вопрос существования в ней газовых гидратов <i>Ханс-Вольфганг Хуббертен, Пьер Пауль Овердуин, Себастьян Веттерих, Михаил Н. Григорьев</i>	100

Деградация вечной мерзлоты, термокарст и термоэрозия - полевые работы на острове Курунгнах <i>Анне Моргенштерн, Ирина В. Федорова, Антонина А. Четверова, Франк Гюнтер, Матиас Ульрих, Фабиан Берманн, Себастиан Зубржицкий, Софья А. Антонова, Самуэль Штеттнер, Юлия Бойке</i>	104
От бензопилы до моделирования климата. Ледяные жилы как архив зимнего климата <i>Ханно Майер, Томас Опель, Александр Ю. Деревягин</i>	111
Исторические и современные изменения границы лесной зоны и озер северной Сибири в связи с потеплением <i>Ульрике Херцшу, Людмила А. Пестрякова, Лаура С. Эпп, Лариса А. Фролова, Руслан М. Городничев, Биргит Хайм, Флориан Ельч, Юлиане Клемм, Штефан Крузе, Лариса Б. Назарова, Бастиан Нимейер, Анатолий Н. Николаев, Кэтлин Р. Штооф-Ляйхсенринг, Ральф Тидеманн, Марейке Вичорек, Евгений С. Захаров, Хайке Х. Циммерманн</i>	114
Значимость органического вещества и оценка запасов углерода на севере Сибири <i>Йенс Штраусс, Лутц Ширрмайстер, Себастиан Зубржицкий, Александр Л. Холодов, Михаил Н. Григорьев, Виктор В. Куницкий, Маттиас Фукс, Ева-Мария Пфайффер, Гвидо Гроссе</i>	117
Экспедиции на резиновых лодках и малогабаритных речных судах - гидрология и геоморфология дельты реки Лены <i>Дмитрий Ю. Большаянов, Ирина В. Федорова, Юлия Бойке</i>	120
Мобилизация и отложения углерода в речной системе Лены <i>Гезине Молленхауэр, Мария Винтерфельд, Борис П. Кох, Ирина В. Федорова</i>	124
Голоценовые озера в районе дельты Лены <i>Бернхард Дикман, Борис Бискаборн, Людмила А. Пестрякова, Дмитрий А. Субетто, Дмитрий Ю. Большаянов, Ульрике Херцшу, Георг Швамборн, Фолькер Рахольд</i>	128
Комплексные логистические операции - воздушные наблюдения за потоками тепла и парниковых газов с использованием комплекса аппаратуры «Helipod» <i>Торстен Закс, Эрик Ларману, Катрин Конерт, Андрей Серафимович</i>	132
Привлечение новых групп ученых из Германии к исследованиям в ходе экспедиций «Лена» <i>Биргит Хайм, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Пьер Пауль Овердуин, Ирина В. Федорова</i>	137
Десятилетие прибрежных исследований в дельте реки Лены <i>Ингеборг Буссмманн, Дмитрий Ю. Большаянов, Ирина В. Федорова, Михаил Н. Григорьев, Александр Ю. Гуков, Герхард Каттнер, Александра Краберг, Денис В. Моисеев, Пьер Пауль Овердуин, Лассе Зандер, Карен Х. Вилтшир</i>	142
<b>5. Новые горизонты экспедиций «Лена» - новая НИС «Остров Самойловский»</b>	
Визит премьер-министра В.В. Путина на остров Самойловский (День-П) <i>Ханно Майер, Томас Опель, Александр Ю. Деревягин, Светлана Ю. Евграфова, Вальдемар Шнайдер, Александр С. Макаров, Михаил Н. Григорьев</i>	150
Новая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский»: строительство, церемония открытия, оборудование и эксплуатация <i>Михаил Н. Григорьев, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Игорь Н. Ельцов, Анне Моргенштерн</i>	153



Остров Самойловский в международных программах и научно-исследовательских сетях - «FLUXNET», «GTN-P», «INTERACT» <i>Анне Моргенштерн, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Юлия Бойке, Ларс Кутцбах</i>	159
Краткий обзор российско-германских проектов по исследованию вечной мерзлоты «CARBOPERM» и «KoPf» <i>Ева-Мария Пфайффер, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Себастиан Зубржицкий, Ульрике Херцшу, Гвидо Гроссе</i>	163
Использование метода дистанционного зондирования в районе моря Лаптевых <i>Гвидо Гроссе, Биргит Хайм, Софья Антонова, Юлия Бойке, Астрид Брахер, Алексей Н. Фаге, Франк Гюнтер, Томас Крумпен, Моритц Лангер, Анне Моргенштерн, Зина Мустер, Ингмар Нитце, Торстен Закс</i>	166
Мультидисциплинарные исследования на островах Самойловский и Курунгнах: геофизика, дистанционное зондирование, геология, ботаника и почвоведение <i>Игорь Н. Ельцов, Алексей Н. Фаге, Леонид В. Цибизов, Владимир А. Каширцев, Владимир В. Оленченко, Андрей А. Картозия, Николай Н. Лащинский</i>	171
Глубокое погружение в прошлое: наземные мерзлотные буровые кампании <i>Йенс Штраусс, Михаил Н. Григорьев, Пьер Пауль Овердуин, Георгий Т. Максимов, Гвидо Гроссе, Алексей Н. Фаге, Леонид В. Цибизов, Лутц Ширрмайстер</i>	174
Долгосрочные измерения потоков энергии, воды и парниковых газов между землей и атмосферой с 2002 года до настоящего времени и в перспективе <i>Давид Холл, Юлия Бойке, Торстен Закс, Петер Шрайбер, Нико Борнеманн, Кристиан Вилле, Ева-Мария Пфайффер, Ирина В. Федорова, Ларс Кутцбах</i>	177
Трансформация углерода при оттаивании вечной мерзлоты в дельте реки Лены <i>Кристиан Кноблаух, Жанет Ретемейер, Александр Шютт, Михаил Н. Григорьев, Ева-Мария Пфайффер</i>	180
<b>6. Сотрудничество в изучении вечной мерзлоты в рамках будущих экспедиций «Лена»</b> <i>Перспективы</i>	
Сотрудничество в изучении вечной мерзлоты в рамках будущих экспедиций «Лена» - перспективы <i>Гвидо Гроссе, Дмитрий Ю. Большианов, Михаил Н. Григорьев, Ева-Мария Пфайффер, Игорь Н. Ельцов, Ханс-Вольфганг Хуббертен</i>	186
<b>Приложение</b>	
Авторы и организации	192
Список использованной литературы по главам	194
Выходные данные	202



(Фото П. Верзоне)



## Введение и предыстория наземных экспедиций в Сибири

Успех российско-германского сотрудничества за последние два десятилетия основывается на дружбе увлеченных людей, осознающих уникальность российской Арктики. Этот взгляд в прошлое позволяет нам по-новому увидеть будущее.

Все началось в период перестройки в России и объединения в Германии. Эти процессы стали историческими для начала долгосрочного российско-германского сотрудничества по полярным исследованиям в Сибири. Еще одним важным шагом для совместных исследований в полярных регионах стало основание нового Потсдамского исследовательского подразделения Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (сокр. АВИ Потсдам) в 1992 году. В АВИ Потсдам, в научную базу которого были интегрированы антарктические исследования бывшей Восточной Германии, основными стали исследования палеоклимата с использованием данных об озерных отложениях в Антарктиде и Арктике в качестве архивных источников, а также исследования, связанные с формированием и изменением ландшафтов в условиях вечной мерзлоты, главным образом в Сибири, базирующиеся на отношениях долговременного партнерства и опыте ученых бывшей Восточной Германии и бывшего Советского Союза. Первая экспедиция в Оазис Ширмахера и существование там восточногерманской антарктической станции «Георг Форстер» объединили ученых бывших



Рисунок 1: Экспедиция на станцию «Георг Форстер», Оазис Ширмахера, Антарктика, 1991/92.

Восточной и Западной Германии и привели к формированию в начале лета 1991/1992 года исследовательской группы для изучения палеоклимата (Рисунок 1). Основываясь на многолетнем сотрудничестве советских и восточногерманских ученых в совместном решении исследовательских и логистических вопросов в Антарктике, несколько экспедиций в антарктические оазисы были реализованы в последующие годы под руководством Сергея Р. Веркулича из Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) Санкт-Петербурга и Мартина Меллеса из АВИ в Потсдаме.

В 1992 году несколько членов АВИ Потсдам участвовали в Международной конференции по криопедологии в Пущино, Россия. Основываясь на опыте Кристины Зигерт, криолитолога, которая более 20 лет проработала в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в Якутске (ИМЗ СО РАН), прежде чем присоединиться к АВИ Потсдам, они начали планировать организацию совместных исследовательских проектов и экспедиций в Сибирь (Рисунок 2).

В результате, совместно с учеными из Московского государственного университета (МГУ), была проведена экспедиция на озеро Лама, недалеко от города Норильск в Сибири. Общими усилиями ученые успешно извлекли пробы озерных отложений длиной несколько метров для реконструкции палеоклимата.



В рамках сотрудничества между АВИ и АНИИ, в основном по логистическим операциям в Антарктике, было налажено плодотворное сотрудничество с Дмитрием Юрьевичем Большиановым, одним из ведущих ученых отдела географии полярных стран АНИИ.

Рисунок 2: Конференция по криопедологии в Пущино 1992-го года с Николаем Романовским, Евой-Марией Пфайффер, Хансом-Вольфгангом Хуббертеном, Кристиной Зигерт и другими в первые годы российско-германского сотрудничества.

В 1993 году была проведена первая совместная разведывательная экспедиция на полуостров Таймыр, ставшая основанием для выделения финансирования исследовательского проекта «Таймыр» Федеральным министерством образования и научных исследований Германии (нем. сокр. BMBF) с 1994 по 1997 год. Сотрудники ААНИИ, Московского государственного университета и Пушинского научного центра РАН вместе с немецкими группами из Института полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера (АВИ), Гамбургского университета (нем. сокр. УНН) и Института полярной экологии в Киле осуществили несколько успешных экспедиций на Таймырский полуостров и Северную Землю.

Институтом морских геонаук (ГЕОМАР) в Киле были инициированы важные шаги по продвижению морских исследований Арктики под руководством Йорна Тиде. В 1993 году, благодаря финансовой поддержке Федерального министерства образования и научных исследований Германии, Хайдемари Кассенс (ГЕОМАР), Сергей Прямиков (ААНИИ), Ханс-Вольфганг Хуббертен (АВИ) и Рюдигер Штайн (АВИ) организовали первый российско-германский научный семинар в Санкт-Петербурге. В нем приняли участие ученые из нескольких немецких и российских учреждений (Рисунок 3).

Этот семинар стал началом успешного германо-российского сотрудничества в полярных и морских исследованиях с акцентом на сибирской части моря Лаптевых и его прибрежных районах. Первый крупный исследовательский проект «Система моря Лаптевых» координировали Йорн Тиде и Хайдемари Кассенс. Основной акцент проекта был сделан на системе Трансаркти-



Рисунок 3: Организаторы первого семинара «Море Лаптевых» в Санкт-Петербурге в 1993 году. Слева направо: Рюдигер Штайн, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Хельга Хеншель и Хайдемари Кассенс.

ческого течения от моря Лаптевых до пролива Фрама и северной части Атлантического океана. В течение нескольких лет участие в знаменитых экспедициях «ЛАПЭКС/TRANSDRIFT» объединило российских и немецких студентов и ученых. Ключевой целью одного из ответвлений проекта «Система моря Лаптевых», реализованного в основном АВИ Потсдам и несколькими российскими учреждениями, был транспорт наносов по рекам Лена, Яна, Оленёк и Анабар, впадающим в море Лаптевых. Фолькер Рахольд из АВИ и ученые из Московского государственного университета организовали три летние экспедиции, в которых использовались малогабаритные речные суда.

После окончания проектов «Таймыр» и «Система моря Лаптевых» Федеральным министерством образования и научных исследований Германии был спонсирован новый российско-германский проект, связавший морские исследовательские группы из ГЕОМАР, АВИ, ААНИИ и других учреждений с группами наземных исследований из Гамбургского университета, АВИ Потсдам, Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в Якутске (ИМЗ СО РАН), ААНИИ и других. Йорн Тиде из ГЕОМАР стал координатором этого проекта под названием «Система моря Лаптевых 2000». В рамках этого проекта Фолькер Рахольд (АВИ), Михаил Н. Григорьев (ИМЗ СО РАН), Ева-Мария Пфайффер (Гамбургский университет) и Дмитрий Ю. Большианов (ААНИИ) инициировали первую экспедицию «Лена». Ее основными задачами были изучение системы вечной мерзлоты на острове Самойловский в дельте реки Лены, а также палеоклиматические исследования в Ледовом комплексе местности Мамонтова Хаята на Быковском полуострове и исследования изменчивости прибрежной зоны с использованием малогабаритных речных судов в дельте реки Лены.

Начиная с этого времени в 1998 году междисциплинарные экспедиции «Лена» организовывались ежегодно, главным образом под руководством ААНИИ, АВИ, ИМЗ СО РАН и Университета Гамбурга, чтобы понять сложную систему ландшафтов вечной мерзлоты в России. Эти экспедиции не были бы возможны без прекрасной логистической поддержки Тиксинской гидрографической базы и ее директора Дмитрия Мельниченко, а также местной логистической компании «АРКТИКА ГЕО - ЦЕНТР». Другим важнейшим местным партнером всегда был Усть-Ленский заповедник (УЛЗ), не только потому, что он включал в себя значительные части рабочей территории экспедиций «Лена», а ученые, работавшие в заповеднике под руководством Александра Гукова, принимали участие в экспедициях. На протяжении многих лет Научно-исследовательская станция «Остров Самойловский» (НИС «О. Самойловский»), которая используется под совместным управлением АВИ и Усть-Ленского заповедника с 1998 года, является центральной отправной точкой для различных экспедиций в дельту реки Лены.

В последующие годы все больше и больше оборудования устанавливалось для долгосрочных измерений водно-энергетического баланса, а также

выбросов незначительных газовых примесей. Исследования по палеоэкологическим изменениям проводились на репрезентативных участках дельты реки Лены и Новосибирских островах, где были взяты пробы озерных отложений и ледового комплекса.

Изучение прибрежных изменений стало еще одной значимой темой исследований, и экспедиции на малогабаритных судах отправились к побережью вокруг дельты реки Лены и на запад до полуострова Таймыр, а также к востоку от дельты Лены, используя также и гидрографическое судно, чтобы добраться до некоторых из Новосибирских островов и побережья пролива Дмитрия Лаптевых. Значимым моментом в изучении прибрежных изменений стало проведение научного бурения в 2005 году в рамках программы «COAST», координаторами которой были Фолькер Рахольд и Михаил Н. Григорьев. Финансовая поддержка программы обеспечивалась в рамках проекта «Система моря Лаптевых 2000» Федеральным министерством образования и научных исследований Германии. По окончании в 2006 году периода финансирования обобщающего проекта по морю Лаптевых Федеральным министерством образования и научных исследований Германии, экспедиции «Лена» по-прежнему поддерживались на средства немецких и российских учреждений, а также других небольших проектов, финансируемых германским ННИО или российским РФФИ.

Наземные и морские экспедиции в море Лаптевых всегда были связаны друг с другом благодаря двустороннему соглашению между министерствами



Рисунок 4: Исследования в регионе моря Лаптевых. Российско-германский семинар, организованный ОШЛ и АВИ в ААНИИ в 2010 году.



наук России и Германии о германо-российском сотрудничестве в области морских и полярных исследований, обсуждаемому год за годом на соответствующих двусторонних переговорах. Центральным для этого сотрудничества был ААНИИ, где происходила координация всех экспедиций и согласовывались необходимые разрешения. Несколько семинаров по «Системе моря Лаптевых», проходивших в Санкт-Петербурге или Киле, стимулировали сотрудничество между учеными и студентами обеих стран (Рисунок 4).

Одна из важнейших платформ сотрудничества была создана благодаря основанию в 2000 году Лаборатории полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта (ОШЛ) ААНИИ в Санкт-Петербурге и, главным образом, учреждению стипендиальной программы на базе данного проекта. Под руководством Хайдемари Кассенс и Леонида А. Тимохова (позднее - Ирины В. Федоровой, и, на настоящий момент, - Василия В. Поважного), ОШЛ стала домашней базой и местом встреч для обсуждения российско-германского сотрудничества по полярным и морским исследованиям.

Другим важным шагом стала консолидация российско-германской магистерской программы «Полярные и морские исследования» («ПОМОР») в Санкт-Петербургском государственном университете и Университете Гамбурга (координатор: Ева-Мария Пфайффер), что сделало возможным получение высшего образования на уровне магистратуры в области полярных исследований в тесном сотрудничестве с различными университетами Германии (университеты в городах Бремен, Киль, Потсдам, Росток). Выпускники по программе «ПОМОР» получают двойной диплом: степень магистра Санкт-Петербургского университета и Master of Science Гамбургского университета.

В экспедициях «Лена» основной акцент продолжал делаться на исследовании систем наземных природных объектов и вечной мерзлоты, а в 2013 - 2015 годах Федеральное министерство образования и научных исследований Германии оказало им крупную финансовую поддержку в рамках проекта «КарбоПерм - Углерод в вечной мерзлоте (CarboPerm)». Под руководством координаторов Евы-Марии Пфайффер из Гамбургского университета и Ханса-Вольфганга Хуббертена из АВИ Потсдам стало возможно выдвижение новых тем исследований в области вечной мерзлоты и продолжение наземных экспедиций «Лена».

Финансирование европейских проектов, таких как «INTERACT» и проект «PAGE 21» РП7 ЕС, финансовая поддержка которого осуществлялась с 2011 по 2015 год и чьим координатором был Ханс-Вольфганг Хуббертен из АВИ Потсдам, открыло доступ к наземным исследованиям для других международных групп, например, из Швеции, Дании и Швейцарии.

Финансирование Федерального министерства образования и научных исследований Германии в настоящее время позволяет проводить исследо-

вания углерода в вечной мерзлоте в дельте Лены в рамках проекта «KoPf», который координирует Ева-Мария Пфайффер (Университет Гамбурга), что обеспечивает продолжение экспедиций «Лена» даже спустя 20 лет.

Новые возможности открылись перед участниками экспедиций «Лена» после визита премьер-министра Владимира Путина на остров Самойловский 23 августа 2010 года. Строительство новой арктической исследовательской станции на острове Самойловский, ставшее результатом данного визита, превратило уже привычный Самойловский в высокотехнологичный исследовательский комплекс. В настоящее время на станции ведется работа в течение всего года. С 2012 года НИС «Остров Самойловский» входит в состав Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН). В лице Федора В. Селляхова у станции появился очень опытный и ответственный руководитель, чья совместная работа с техническим персоналом гарантирует прекрасное обеспечение повседневной жизни и работы ученых на станции.

По сравнению с небольшой старой сезонной станцией, новая станция с ее круглогодичной доступностью, высокотехнологичным оборудованием и большими техническими возможностями сделала организацию и планирование экспедиционной работы на острове Самойловский и вокруг него более удобной для дальнейших научных изысканий.

В последние годы ученые из ИНГГ СО РАН и учреждений-партнеров начали полевые работы на острове Самойловский и вокруг него во время ежегодных экспедиций и внесли большой вклад в исследования вечной мерзлоты в дельте реки Лены с использованием многопрофильного научного подхода, включающего в себя геофизические методы, дистанционное зондирование, методы почвоведения, геологии и ботаники.

Участие в исследованиях большой группы ученых из Новосибирска и других российских городов теперь требует более тщательного планирования совместной работы, чем в первые 15 лет экспедиций «Лена», но специализированные знания и опыт новых участников станут ценным вкладом в общие исследования.

Международная научная экспедиция в Арктику - это уникальный проект, существующий в течение 20 лет. Экспедиция «Лена» является исключительно удачным примером российско-германского сотрудничества. Мы надеемся, что новая арктическая Научно-исследовательская станция острова Самойловский станет удобной и надежной базой для успешного функционирования совместной экспедиции на многие годы вперед.

Успех научных экспедиций и совместной исследовательской деятельности этих 20 лет стали возможны только благодаря интенсивной поддержке уч-

реждений и отдельных лиц. Основное финансирование было предоставлено Федеральным министерством образования и научных исследований Германии (BMBF) и Министерством образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки). Дополнительное финансирование было получено через Немецкое научно-исследовательское общество (ННИО), Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) и другие фонды. Реализация экспедиций не была бы возможна без важной логистической поддержки со стороны ААНИИ и АВИ.

Помощь, оказанная Тиксинской гидрографической базой и Усть-Ленским заповедником, а также поддержка со стороны местных и региональных властей была чрезвычайно важна для осуществления полевых работ. Мы хотели бы поблагодарить не только эти учреждения и их сотрудников из различных отделов, но и многих людей, поддерживавших нас на станции и в полевых условиях. Высокий профессионализм показали инспекторы острова Самойловский, работники кухни на станциях и во многочисленных полевых лагерях, капитаны и экипажи судов, которые мы использовали в дельте и у побережья, буровые бригады, водители транспорта, технические специалисты и все другие многочисленные помощники, работавшие иногда в достаточно сложных условиях.

Мы хотели бы поблагодарить все организации и отдельных людей, поддержка и личное участие которых сделали возможными 20 лет наземных экспедиций «Лена».

Кроме того, мы благодарим всех, кто участвовал в подготовке, разработке и выпуске этого юбилейного буклета, а именно: Клаудию Пихлер и Ив Новак из Департамента коммуникаций и связей с общественностью АВИ, Инге Глинсманн из Дизайнерского агентства Глинсманн, Себастьяна Лабоора из АВИ за подготовку карт и графики, Роберта Ханна за редактирование английских текстов, Елену Черткову-Пауленц и Елену Хербст за переводы на русский язык, Мэтта Фентема за переводы в немецкий язык и многих других людей, которые очень помогли нам закончить эту книгу.

*Ханс-Вольфганг Хуббертен, Дмитрий Ю. Большаянов, Михаил Н. Григорьев, Фолькер Рахольд, Ева-Мария Пфайффер*

Судно «Лоцман», пробивающееся сквозь  
полный осадочного материала речной лед  
в Хатангском заливе в августе 1996 г.





1.

Дорога к экспедициям  
«Лена»  
1993-1997 гг.



## Озерные отложения на Таймыре и Северной Земле как климатический архив

Первая экспедиция на полуостров Таймыр была организована в 1993 году Московским государственным университетом, Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом Санкт-Петербурга и Институтом полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера (АВИ). Проведение совместных полевых работ в центральной Сибири было пилотным проектом для подготовки к общему германо-российскому исследованию, в фокусе которого находились исторические изменения окружающей среды позднего четвертичного периода в центральной части северной Сибири.

Этот первоначальный дисциплинарный фокус привлек интерес других исследовательских групп. В течение одного года исследование переросло в многолетнюю кампанию, в которой принимал участие целый ряд ученых различной специализации из более чем десятка институтов и университетов.

В результате полевые исследования на Таймырском полуострове и Северной Земле стали включать в себя исследования экологических, климатических и географических региональных процессов в дополнение к изначальному палеоэкологическому ядру пилотного проекта. Исследовательская кампания проводилась по 1400-километровому поперечному разрезу с южного плато Путорана в северной таежной зоне, через полуостров Таймыр, и на север, до архипелага Северная Земля в зоне заполярной тундры.

Рисунок 1: Экспедиционная группа, передвижное буровое оборудование, припасы и образцы были доставлены из Хатанги на места полевых работ с использованием надежного самолета АН-2 «Антонов», оборудованного лыжами.



Собственно перигляциальная область охватывала экотоны лесной области, верхней границы леса, тундры и полярной пустыни в районе, где вопросы ледниковой истории в позднем четвертичном периоде были еще не изучены. Помимо вопросов о протяженности и временных рамках покровного оледенения в Центральной Сибири, эти кампании были направлены на реконструкцию переходов между западно-сибирским морским и восточно-сибирским континентальным климатом, и изучение влияния этих климатических сдвигов на растительные зоны и движение воды и энергии между землей и атмосферой.

Доступ экспедиционных бригад к участкам полевой работы был возможен через Норильск и Хатангу, где они работали вместе с Таймырским заповедником, а затем вылетали к полевым лагерям вертолетом МИ-8 и самолётом АН-2 «Антонов». Это были годы перестройки и первые годы германо-российского сотрудничества. Логистические проблемы, встречающиеся в любой экспедиции, были осложнены первым из указанных процессов, однако компенсировались энтузиазмом и увлеченностью участников экспедиции с самого ее начала.

С 1993 года размер экспедиционных команд вырос, а сезон активных полевых работ стал включать не только летний полевой лагерь, плавучую буровую платформу и походы на малогабаритных судах, но и забор озерных проб и другие исследования озерного льда в апреле и мае. Записи этих экспедиций, которые проходили с 1993 по 1997 год, включающие списки участников и собранных образцов, доступны в выпусках серии «Отчеты по полярным и морским исследованиям» («Reports on Polar and Marine Research») (выпуски 148, 175, 211, 237, 242, 298 и 324).

Рисунок 2: Буровой лагерь, созданный на шесть дней в самой глубокой точке озера Таймыр в апреле 1995 года, состоял из российской кухонной и жилой палатки и нескольких небольших спальных палаток.



Во время этих экспедиций было проведено бурение на ряде водоемов, целью которого был ответ на волновавшие участников экспедиции вопросы региональной палеоэкологической истории. Озерные отложения были извлечены из озера Лама, озера Лабаз, озера Левинсон-Лессинга, озера Таймыр, озера Портнягино, озера Изменчивое и озера Фьордовое (Рисунок 3). Осадочные керны варьировались в длину от десятков сантиметров до образца с общей длиной 22,4 м, полученного из озера Левинсон-Лессинга в 1995 году.

Описания данных отложений привели к важным научным выводам, в частности, данные о присутствии пыльцы в отложениях с озера Лама привели к реконструкции оценки температуры воздуха и уровня осадков в регионе за последние 12300 лет, показавшей то, как биомы тундры и степи откликаются на изменение климата после окончания последней ледниковой эпохи.

Озерные отложения Северной Земли позволили нам расширить область анализа развития недавних экологических условий дальше на север и охва-

Рисунок 3: Карта Северной Земли и полуострова Таймыр, на которой отмечены участки проведения российско-германской совместной научной работы, включавшей отбор проб озерных отложений, в период 1993-1997 гг.





Рисунок 4: Палатка была возведена вокруг буровой треноги, установленной на озере Левинсон-Лессинга, чтобы обеспечить бурение озерных отложений при неблагоприятных погодных условиях.

Рисунок 5: Члены экспедиционной группы 1995 года Т. Эбель, А. Цилке и П. Овердуин отдыхают после прибытия на озеро Таймыр.

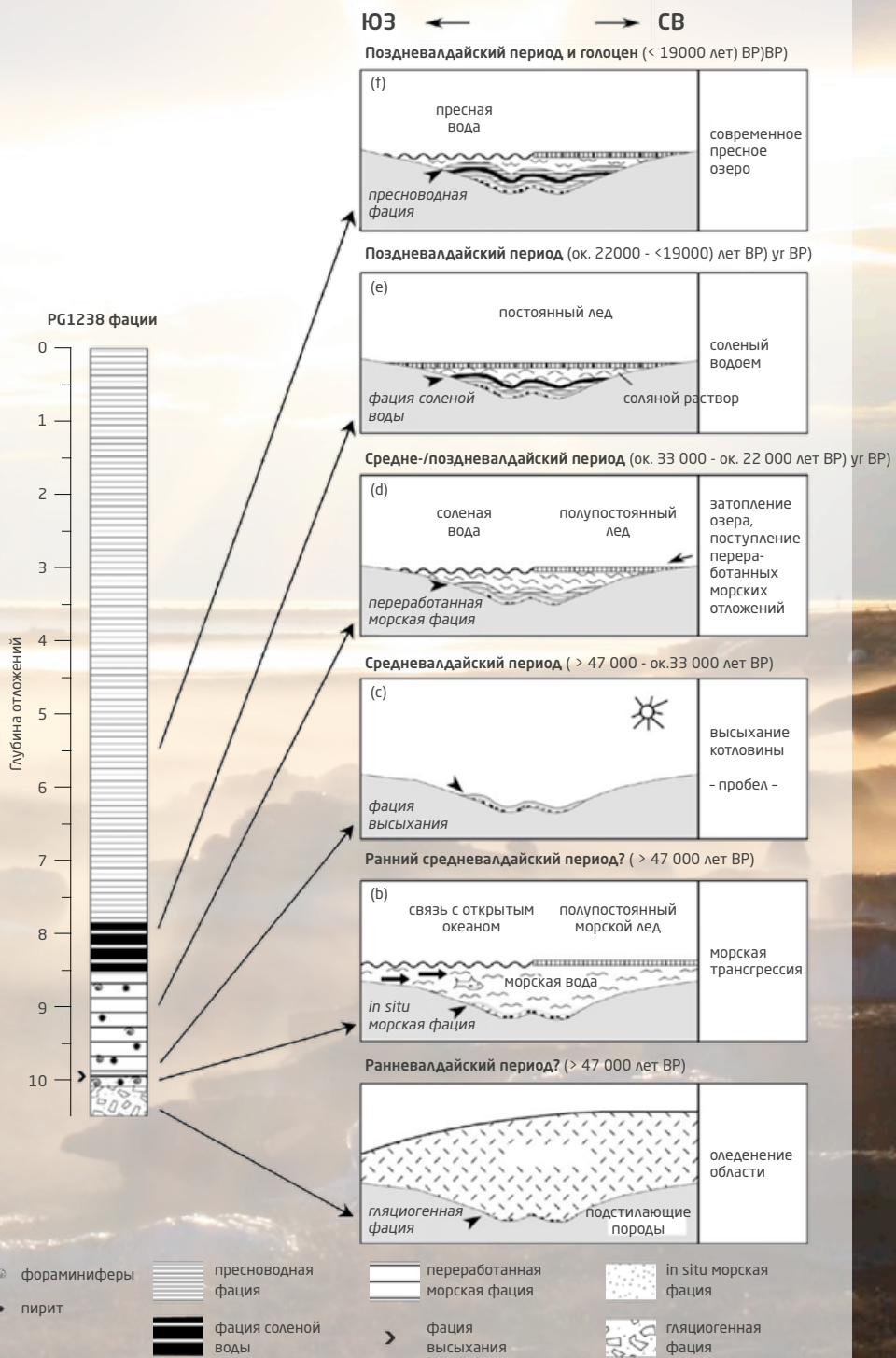


Рисунок 6: Осадочный керн из озера Изменчивого на Северной Земле (слева) вместе с реконструкцией исторических природных условий (справа, рисунок адаптирован из Raab et al., 2003).



тить более далекое прошлое, чтобы включить в исследование ледниковую динамику, следы которой остались в озере Изменчивом, на примере которой можно проследить переход от наземного обледенения к пресноводному озеру, с промежуточными морскими стадиями (Рисунок 6).

Результаты анализа отложений озера Изменчивого были важны для реконструкции восточной части Евразийского ледникового покрова во время последней ледниковой эпохи и стали существенным вкладом в успех проекта Европейского научного фонда (ESF) по изучению Евразийского ледникового покрова «Eurasian Ice Sheets», поскольку доказали, что во время последнего ледникового максимума не существовало ледяной шапки.

Итогом этих первичных исследований озерных отложений стало создание действующей научной исследовательской станции «Остров Самойловский» и связанных с ней исследования дельты реки Лена и моря Лаптевых. Также это сотрудничество привело к началу и других проектов, среди которых проект по бурению на озере Эльгыгытгын (<https://www.awi.de/forschung/geowissenschaften/geophysik/schwerpunkte/seen-als-klimaarchive/elgygytgyn-see.html>) и текущий проект PLOT (<http://www.geologie.uni-koeln.de/2037.html>).

*Пьер Паул Овердуин, Дмитрий Ю. Большаянов, Мартин Меллес*

Рисунок 7: Силуэт овцебыка во время полярного дня. Таймырские овцебыки происходят от стада, реинтродукция которого была произведена из Северной Америки в 1975 году.



## **Первые исследования выбросов, энергетических и водных характеристик почвы тундровой зоны – озёра Лабаз и Левинсон-Лессинга, полуостров Таймыр**

Первые полевые исследования современных почвенных процессов в области озера Лабаз и озера Левинсон-Лессинга начали проводиться во время российско-германских экспедиций «ТАЙМЫР» 1994, 1995 и 1996 годов. Их целью было охарактеризовать качество органических веществ в многолетнемерзлых почвах и внести вклад в реконструкцию палеоэкологических условий Средней Сибири.

Разнообразие так называемых гелисолей (синонимическое название криопочв или многолетнемерзлых почв) подтверждено примерами одиннадцати различных сочетаний «почва-растение-полигональный рельеф» в пушицево-моховой тундре, включая шесть различных типов гелисолей вблизи озера Лабаз и у озера Левинсон-Лессинга (Рисунок 1).

Дальнейшие геоботанические исследования, основным предметом которых стали лишайники, показали богатство арктической флоры и ландшафтное разнообразие полуострова Таймыр.

Рисунок 1: Мерзлотный ландшафт в области озера Левинсон-Лессинга с типичными так называемыми таймырскими полигонами, полуостров Таймыр, 1995 (фото Е.-М. Пфайффер).



В 1994 и 1995 годах были исследованы температурные и гидрологические режимы грунта, а также были рассчитаны сезонные изменения уровней воды и тепла в активном слое в период с весеннего оттаивания до осени. С помощью рефлектометрии во временной области (TDR) было измерено содержание жидкой воды в замерзшей и оттаявшей почве. Было обнаружено, что в замерзшей почве ее содержание наблюдается при температурах до  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что делает возможным существование микроорганизмов и выбросы парниковых газов.

Впервые темпы выброса  $\text{CH}_4$  ( $41\text{-}171\text{ мг } \text{CH}_4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{д}^{-1}$ ) во влажной тундре низин Таймыра были измерены с помощью закрытой камеры. Более поздние публикации по области озера Лабаз включают сведения по качеству углерода в почве, основанные на различном содержании  $\text{C}$  в почве и первоначальной оценке средней величины накопления углерода в активном слое ( $14.5\text{ кг } \text{C } \text{м}^{-3}$ ) и верхнем слое ( $30.7\text{ кг } \text{C } \text{м}^{-3}$ ) почвы. Эти первые российско-германские почвенные исследования на полуострове Таймыр послужили основой для дальнейших исследований вечной мерзлоты в дельте реки Лены, в Колымской и Индигирской низменностях в 2000 и последующих годах.

*Ева-Мария Пфайффер, Юлия Бойке, Михаил П. Журбенко, Дмитрий Ю. Большианов*

Рисунок 2: Типичный полигональный ледовый клин в тундровой почве, классифицированный как Typic Glacistels, характеризующийся наличием льдонасыщенных грунтовых слоев и большим накоплением органических веществ в условиях сильного холода и очень высокой влажности (фото Е.-М. Пфайффер).



## Исследование многолетнемерзлых толщ Таймырской низменности (1994-1996)

На основе имеющихся данных мы предполагали, что центральная часть Таймырской низменности в позднем плейстоцене не была перекрыта материковым ледником и там уже начиналось развитие мерзлотных ландшафтов. Поэтому была поставлена цель: при помощи изучения криогенного строения мерзлых толщ, в комбинации с определением их абсолютного возраста, палеонтологическими, седиментологическими и геохимическими исследованиями, получить информацию о развитии окружающей среды этого региона.

Наши исследования были сконцентрированы на двух регионах: на северную береговую зону оз. Лабаз и на мыс Саблера на северном берегу оз. Таймыр. Выбранная для исследований территория вокруг оз. Лабаз с абсолютными отметками между 40 м (уровень озера) и 115 м предоставляла хорошие условия для изучения современных геокриологических и рельефообразующих процессов в типичной тундре. На сильно расчлененных термоэрозией береговых склонах находились многочисленные обнажения многолетнемерзлых пород, пригодных для геокриологических и палеогеографических

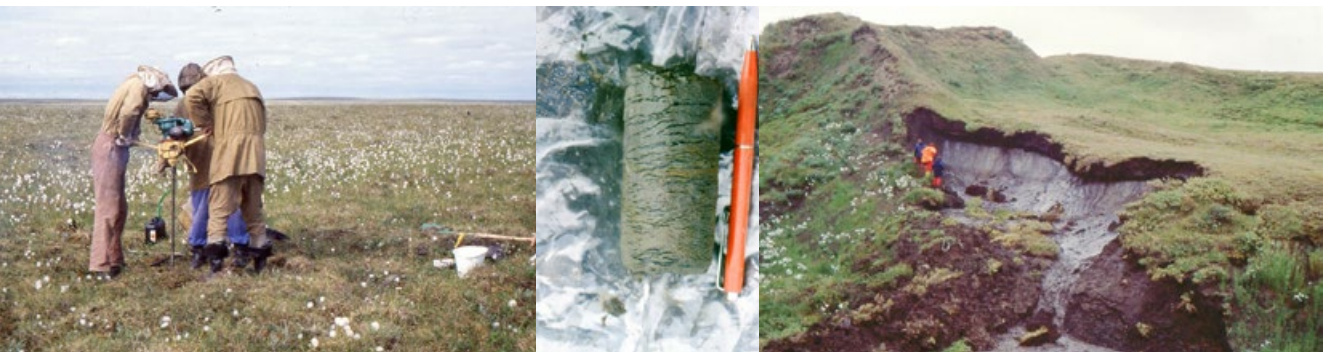
Рисунок 1: Наш лагерь на озере Лабаз, 1995. На озере видны остатки ледяного покрова, а на берегу - многолетние фирновые поля.

исследований. Кроме того, мы ставили себе цель получить доказательства прохождения границы последнего покровного оледенения в береговой зоне Лабаза. Выделяющиеся на аэроснимках особенности термокарстовых понижений позволяли предполагать, что в мерзлых толщах сохранился древний погребенный глетчерный лед.

До берега оз. Лабаз мы добрались из Санкт-Петербурга спецрейсом до п. Хатанга и дальше на вертолете в середине июля. В это время оз. Лабаз (около 30 км в диаметре) и многочисленные маленькие озера по соседству сохраняли остатки ледяного покрова. Но повышение температур и сильные ветры разрушили их в ближайшие дни. В нишах береговых склонов снег сохранился долго, местами до следующей зимы. Высокие участки были уже покрыты тундровой растительностью, а верхние части южных склонов были уже покрыты обильной луговой растительностью. Там нас приветствовали огромные полчища комаров.

Наш лагерь мы выстроили на широкой, относительно ровной террасе, которая граничила с дельтообразным устьем реки Толтон-Пастах-Юрях в Лабаз. Из реки мы брали питьевую воду. В дельте маленькой реки ежегодные действия озерных льдов создали вал из грубозернистых отложений и маленькое озеро, которое имело немного более теплую воду. При хорошей погоде оно использовалось как купальный бассейн. На второй день после того, как мы построили наши палатки, организовали кухню и смонтировали нашу лодку, появились гости – семья долган и нганасан, которые летом живут на озере и занимаются рыболовством. Они приехали на лодках, чтобы познакомиться. Контакт с ними оказался для нас полезным. Мы узнали много интересного об их жизни, и они нас часто снабжали отличной рыбой, которую они ловили постоянно, но не могли, как раньше, продать. В громадном леднике на берегу Лабаза они замораживали запасы рыбы и оленины. Кроме того, одна семья разрешала нам несколько раз мыться в их уютной маленькой баньке. Очень ценными для нашей работы оказались их сообщения о свежих обнажениях мерзлоты с подземными льдами и других интересных природных явлениях. В конце сезона мы передавали им остатки наших продуктов и горючих материалов. Во второй год мы привезли им несколько вещевых мешков одежды, собранной по всему АВИ, - они были очень рады.

В течение двух летних сезонов мы исследовали криогенное строение многих обнажений и отбирали образцы для комплексных лабораторных анализов. На основе этих данных нами был составлен разрез многолетнемерзлых толщ. Кроме того, при помощи портативного бурового станка нашими опытными русскими коллегами было пробурено 20 скважин до 7 м глубины, изучены и опробованы полученные керны.



В качестве наиболее важного архива данных об особенностях окружающей среды в прошлом нам служили многолетнемерзлые толщи, включающие полигонально-жильные льды. Эти отложения, которые переходили синхронно с их накоплением в многолетнемерзлое состояние, содержали, как правило, пыльцу, а иногда и ископаемые остатки растений и разных животных. Совместно с данными об изотопном составе подземных льдов и об абсолютном возрасте органических остатков, результаты их исследований давали в итоге представления о развитии климата и окружающей среды в позднем четвертичном периоде. Особое значение в этом отношении имели данные, полученные на основе полевых исследований в 1996 г. на мысе Саблера и результаты лабораторных исследований отобранных образцов из многолетнемерзлых отложений и содержащихся в них подземных льдов. Изучение ископаемых растительных остатков впервые дало однозначные доказательства существования степной растительности в этом регионе в последнем ледниковье позднего плейстоцена. Подобные реликты холодных степных ландшафтов существуют в настоящее время лишь в отдельных регионах Якутии, отличающихся экстремально холодным континентальным климатом.

Рисунок 2: Буровая команда в действии. Обратите внимание на пчеловодческие шляпы, которые использовались, чтобы защититься от огромного количества комаров.

Рисунок 3: Керн многолетнемерзлой почвы с характерными ледяными линзами.

Рисунок 4: После оползня верхняя часть погребенного глетчерного льда стала видна под маломощным сезоннопротаивающим слоем.



В 1994 г., несмотря на интенсивные поиски, мы не нашли реликты глетчерных льдов. Но в 1995 г., после сильных дождей и крупных оползней, на одном из крутых береговых склонов открылись массивные тела древнего глетчерного льда. Это было счастливое событие и вся группа выпила по этому поводу бутылку виски с глетчерным плейстоценовым льдом.

А в конце второго сезона экономические события подарили нам дополнительное время для исследований и весьма интересные результаты. В августе 1995 г. российское правительство проводило сильную дефляцию рубля. Достаточных денежных средств для вывоза экспедиции из поля не оказалось. Дмитрию Большианову, ответственному за организацию экспедиции, пришлось вылететь в Санкт-Петербург, чтобы привезти соответствующую сумму, которая хранилась в ААНИИ, для вывоза экспедиции. В тундре в это время уже начиналась осенняя погода с дождями и это неожиданное продление полевых работ принесло нам не только неуютные дни при резко убывающих запасах питания, но и еще одно прекрасное обнажение с глетчерными льдами. Наши рыбаки сообщили нам об открывшихся льдах и отвезли нас туда на своих быстрых лодках. Вблизи рыбацкого ледника, прямо на берегу, обнажились глетчерные льды с характерным строением. Вблизи расположенной узкой долине, под обширной плоской депрессией под маломощным сезоннопротаивающим слоем, также открылся погребенный лед. Это обнажение дало нам однозначное доказательство того, что граница последнего покровного оледенения находилась на северном берегу оз. Лабаз. Полученные результаты были успешно использованы при реконструкции распространения континентальных оледенений Сибири.

*Кристине Зигерт, Александр Ю. Деревягин*



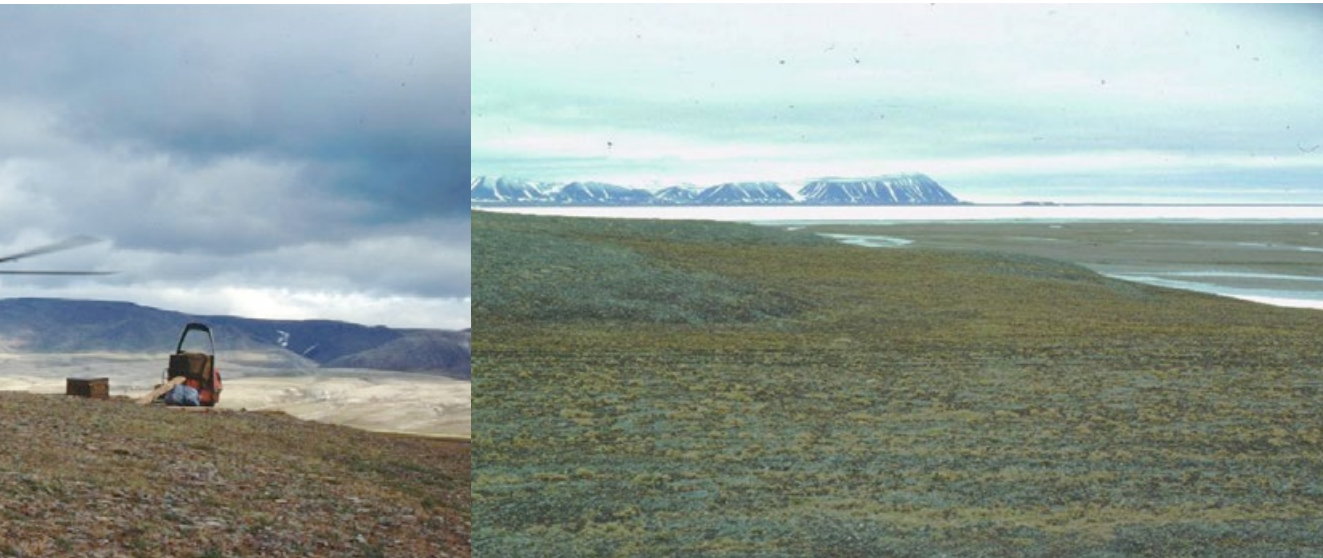
## Углерод в почвах арктической пустыни Северной Земли

В рамках российско-германского сотрудничества по проекту «Экспедиция Таймыр 1995» члены пилотной экспедиции на архипелаг Северная Земля впервые провели измерения углерода в многолетнемерзлых почвах на территории российской Арктики в 1995 году. Цель этой предварительной экспедиции состояла в том, чтобы определить условия для будущих исследований на архипелаге Северная Земля (отбор озерных проб, ледниковых кернов, микробные исследования почв и др.).

Команда немецких, японских и российских ученых (см. Рисунок 1) начала движение с российско-германской полевой базы, расположенной на берегу озера Левинсон-Лессинга, на которой, кстати говоря, японская команда только что выиграла два вечерних песенных конкурса среди участвовавших национальных команд. После посещения озера Таймыр, озера Левинсон-Лессинга и мыса Челюскина на полуострове Таймыр, международная команда полетела на архипелаг Северная Земля (см. Рисунок 2) и работала на полевой базе ААНИИ «Станция Прима» на острове Большевик, которая

Рисунок 1: Экспедиционная группа «Северная земля» 1995 года. Слева направо: Т. Яманучи, Г. Гуггенбергер, О. Ватанабе, Х. Канда, С. Таканаши, российский коллега, М. Журбенко, Д. Большианов, Е.-М. Пфайффер, М. Бельтер (фото Х.-В. Хуббертен).

Рисунок 2: Использование российской вертолетной техники для полета с полуострова Таймыр на архипелаг Северная Земля в 1995 году.



была преобразована в Гидрометеорологическую обсерваторию ААНИИ в 2014 году. Международная команда 1995 года посетила различные объекты с помощью вертолета и взяла образцы почвы и растительности на острове Октябрьской революции, островах Комсомолец и Большевик. Немецкие и японские ученые увидели незабываемый и огромный мир Сибирской Арктики и решили продолжить совместные исследования этого уникального заполярного региона России. В то время как японско-российские исследования не смогли быть продолжены, российско-германское сотрудничество расширилось, и в последующие годы на Таймырском полуострове, плато Путорана и архипелаге Северная Земля были проведены новые экспедиции по исследованию вечной мерзлоты. В 1998 году в дельте реки Лены и ее прибрежных районах было продолжено междисциплинарное российско-германское исследование вечной мерзлоты.

Начальное определение параметров и анализ органических веществ в различных гелисолях (12 участков) архипелага Северная Земля с его арктическими ландшафтами (см. Рисунок 3) продемонстрировали низкое содержание органического углерода (0,1 - 1,3%  $C_{org}$ ) в 20 см от поверхности полигонального грунта (различные круги и полосы). Однако в углублениях полигональных почв было обнаружено более высокое содержание органического углерода в диапазоне от 1,6 до 7,1%  $C_{org}$  в верхних 20 см почвенного

Рисунок 3: Арктический ландшафт острова Большевик и цветение незабудок (*Eritrichium villosus*), Северная Земля, 1995 (фото Е.-М. Пфайффер).

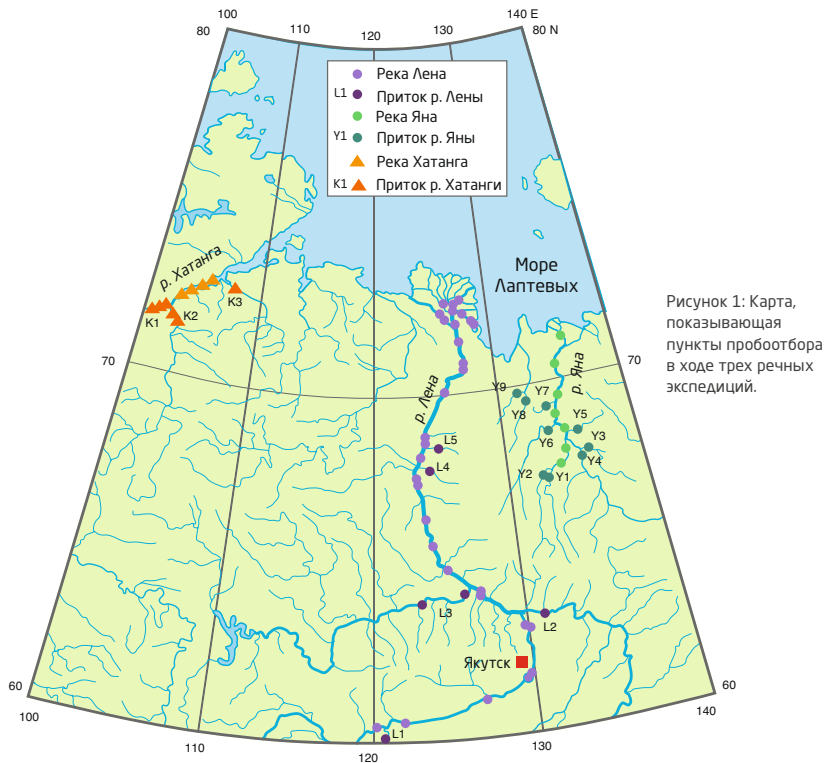


слоя. Из-за режима влажности почвы и наличия растительности только в защищенных рельефах, арктические пустынные почвы Северо-Западного архипелага были слабо развиты и функционировали как слабые поглотители углерода. Основными процессами почвообразования в этих полярных пустынях являются обогащение органического состава почв и транслокация оксидов железа под влиянием воды, а также криотурбация и образование полигонального грунта (см. Рисунок 4).

Дополнительные почвенно-растительные комплексы (см. Рисунок 5) были описаны как арктическая тундра с доминированием тундровых видов *Dryas octopetala*, *Salix polaris* и *Cassiope tetragona*. Лишайники, такие как *Acarospora putoranica* и *Sticta arctica*, были доминирующими растениями прибрежных арктических лугов. Лишайник *Teloshistes contortuplicatus* был определен как новый вид для этого арктического региона архипелага Северная Земля.

*Ева-Мария Пфайффер, Михаил П. Журбенко, Дмитрий Ю. Большиянов*

Рисунок 4: Полигональный рельеф и пример почвы, подверженной воздействию вечной мерзлоты (*Psammentic Aquiturbel*) на Острове Большевик, Северная Земля, 1995 (фото Е.-М. Пфайффер).  
Рисунок 5: Разнообразие и состав лишайников на песчаниках (с типичным *Protosysozetem*) острова Большевик, Северная Земля, 1995 г. (фото Е.-М. Пфайффер).



## Сибирские реки: гидрология, геохимия и перенос осадков - проект «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» в 1994-1997 гг.

Изучение сибирских рек составляло неотъемлемую часть российско-германского проекта «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ», финансируемого с 1994 г. германским Министерством образования и научных исследований и российским Министерством науки и технологий. Всеобъемлющей целью проекта было изучение особенностей системы Трансарктического течения в настоящее время и его изменчивости в геологическом прошлом. В настоящее время морские льды переносят большое количество осадочного материала в центральную часть Северного Ледовитого океана. Этот осадочный материал поступает в океан в основном с широких сибирских шельфов, где он вмораживает в морской лёд при его контакте с дном, доставляется на лёд с береговых склонов, навевается с берегов ветром. Район моря Лаптевых считается первичным источником возникновения морского льда с большим количеством осадков.



Проект «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» был сфокусирован на изучении минералогических и геохимических параметров, применимых для воссоздания механизма перемещения осадков с помощью морского льда в прошлом и для исследования этого процесса в настоящее время. Наша исследовательская группа, участвующая в проекте, фокусировала свое внимание на изучении и характеристике наносов сибирских рек (см. Таблицу 1). Другие группы участников проекта занимались изучением загрязнённого морского льда, морских поверхностных осадков на шельфе и в центральной части Северного Ледовитого океана, а также осадочных кернов, характеризующих динамику изменений осадконакопления в геологическом прошлом.

Программа отбора проб включала в себя отбор проб воды, донных отложений и осадочной взвеси для определения современного поступления осадочного материала из бассейнов рек. Пробы отбирались на многочисленных станциях вдоль основных рек и их притоков (см. Рисунок 1).

Научный анализ включал: а) количественную оценку воды и осадочного материала, получаемых по гидрологическим данным; б) характеристику минералогического и геохимического состава донных отложений. Были изучены несколько параметров, характеризующих осадочный материал каждой реки,

Рисунок 2: Судно «Профессор Маккаев», севшее на мель на р. Лене в июле 1995 г.

а также определены характеристики для выявления осадочного материала, транспортируемого различными реками. Результаты показали, что состав речных осадков отражает геологию водосборного района каждой реки. Для донных отложений каждой реки характерно наличие определенного состава тяжелых минералов. Такой состав может быть использован для определения особых районов сибирских шельфов, насыщенных тяжелыми минералами. Тяжелые минералы переносятся, однако, в основном придонным слоем воды. А анализ взвеси пригоден для понимания процессов переноса осадков скорее на большие расстояния. В определении ареалов рассеяния минералов, ассоциируемых с каждой отдельно взятой рекой, помог анализ минерального состава глинистого материала. Геохимические характеристики взвеси являются наиболее подходящими инструментами для идентификации осадочного материала, поступающего с речным стоком на шельфы и переносимого в дальнейшем в Северный Ледовитый океан. Состав редкоземельных элементов (РЗЭ) и изотопный состав (Sr и Os), тесно связанные с составом скальных пород на водосборных площадях, могут быть использованы, в частности, для определения аллювия на шельфах и осадочного материала материкового происхождения в кернах центральной части Северного Ледовитого океана. Итогом трех экспедиций стало опубликование 10 статей в престижных научных журналах.

*Фолькер Рахольд*

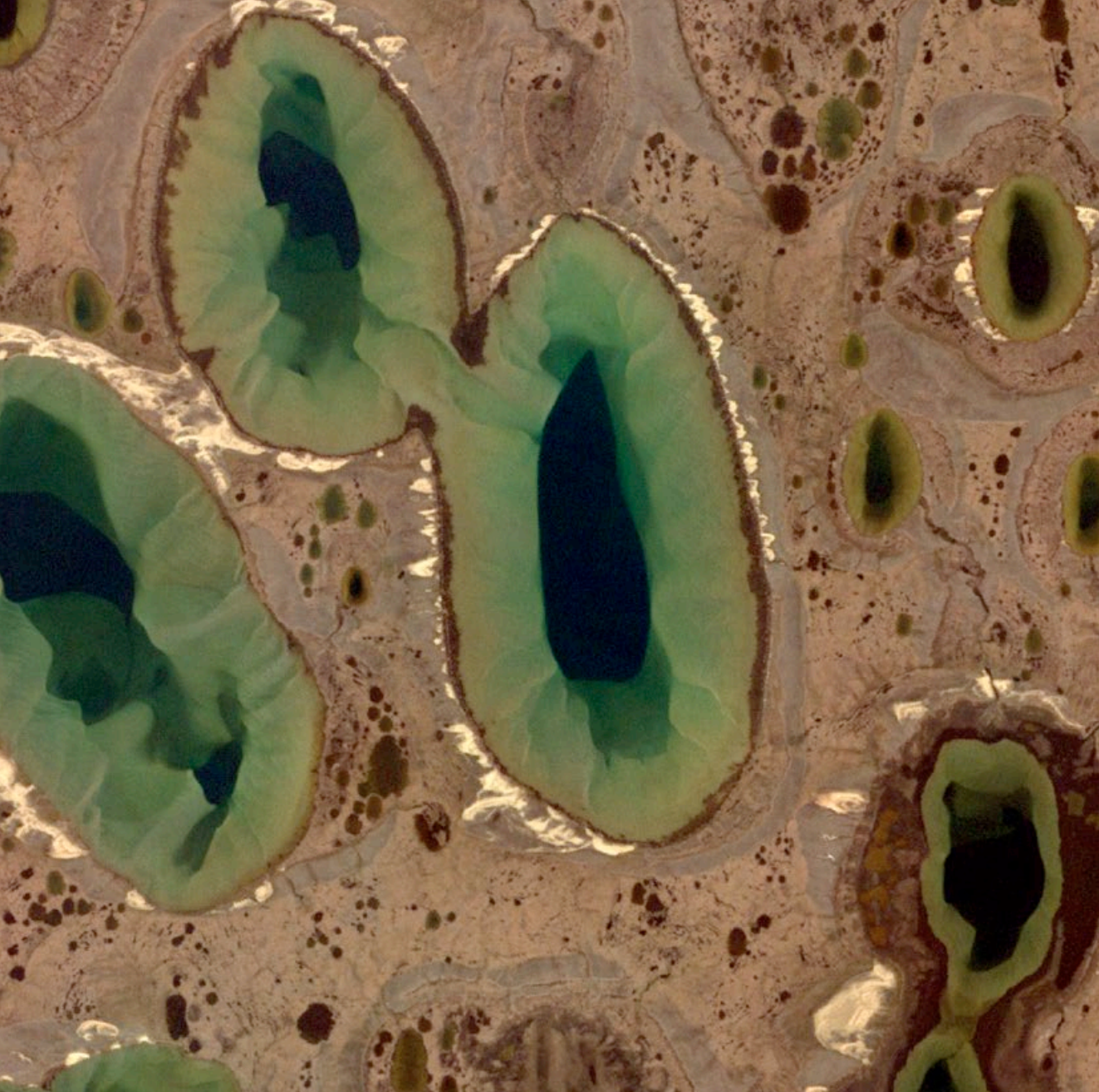
	«Лена 1994»	«Лена/Яна 1995»	«Хатанга 1996»
<b>Реки</b>	Река Лена, дельта реки Лены и ее притоки	Река Лена, дельта реки Лены, реки Яна, Омолой, Оленек и притоки	Река Хатанга и притоки
<b>Сроки</b>	5 июля - 3 августа	26 июня - 7 сентября	14 июля - 20 августа
<b>Суда</b>	«Проф. Маккавеев»	«Проф. Маккавеев», «Айсберг», «Заря 9»	«Лотсман»
<b>Участники</b>	Андрей М. Алабян, Йорг Хермель, Вячеслав Н. Коротаев, Фолькер Рахольд, Александр А. Зайцев	Андрей М. Алабян, Эрих Хоопс, Вячеслав Н. Коротаев, Фолькер Рахольд, Александр А. Зайцев	Эрих Хоопс, Ирина Й. Кирцидели, Фолькер Рахольд, Александр В. Уфимцев
<b>Организаторы</b>	АВИ Потсдам и географический факультет Московского государственного университета	АВИ Потсдам и географический факультет Московского государственного университета	АВИ Потсдам и Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ)

Таблица 1: С 1994 по 1996 гг. были организованы три экспедиции корабельного базирования на главных реках, впадающих в море Лаптевых.

Озера острова Арга (RapidEye\_2010-07-06) расположены на песчаной равнине и имеют широкие мелкие шельфовые области (глубина менее 2 м) и глубокие центральные области. Озеро Николай-Кюеле (частично покрытое льдом) имеет несколько впадин (максимальная глубина воды 17 м) и имеет максимальную длину и ширину 8 км.

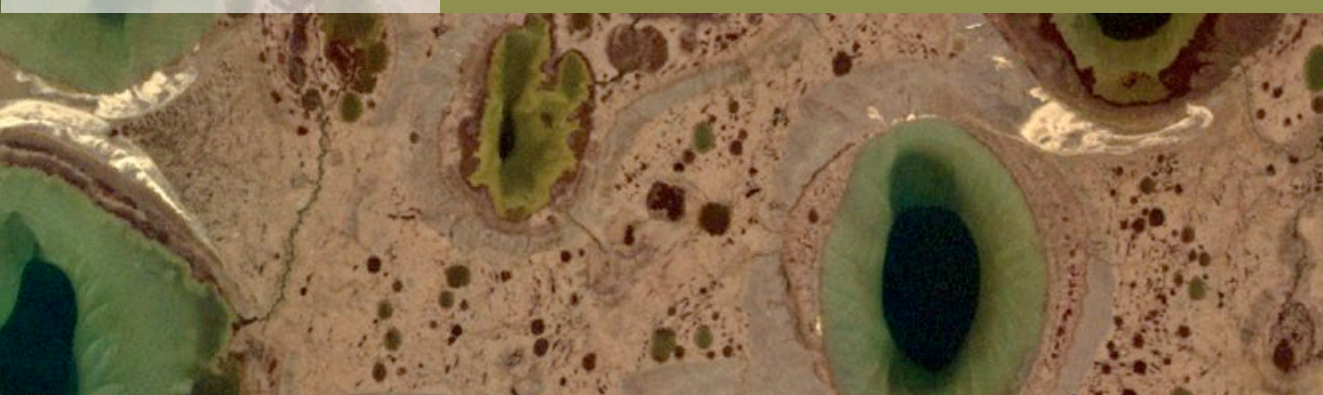


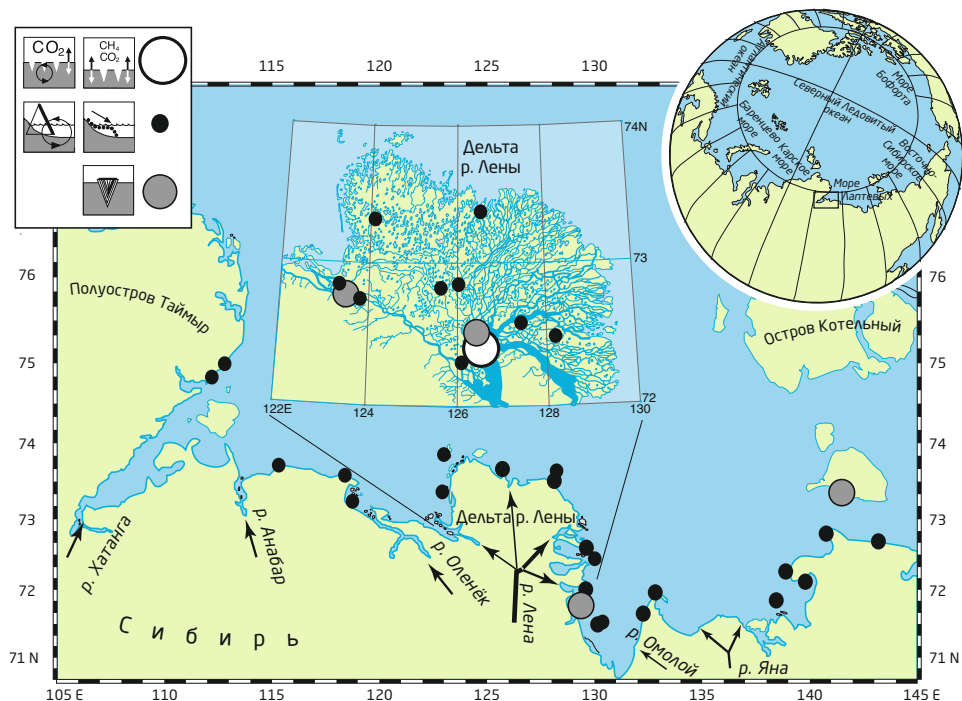




2.

Начало экспедиций  
«Лена»  
1998-2002 гг.





## Истоки научного проекта «Дельта Лены»: научная стратегия, сотрудничество и материально-техническое обеспечение

В конце 1996 г. были завершены работы в рамках проектов «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» и «ТАЙМЫР» и закончилось финансирование проектных работ. Представлялось целесообразным в следующем проекте объединить морские и наземные исследования. Концепция этого нового российско-германского проекта, получившая название «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ 2000», была разработана под руководством Хайдемари Кассенс (ГЕОМАР) и Ханса-Вольфганга Хуббертена (АВИ). Новый проект основывался на результатах предшествующих проектов «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» и «ТАЙМЫР», и в то же время был направлен на решение совершенно новых научных задач. В проекте были определены следующие темы исследований:

- A. Сезонная изменчивость и динамика в районах вечной мерзлоты
- Баланс парниковых газов (углекислого газа и метана) и системные исследования баланса метана
  - Процессы водо- и энергообмена в многолетнемерзлых грунтах
  - Микробные сообщества и движение диоксида углерода в многолетнемерзлых почвах

Рисунок 1: Обзорная карта районов работ экспедиций ЛЕНА 1998-2001 гг.

- V. Реагирование наземной и морской систем Сибирской Арктики на изменения в окружающей среде в последние 100 лет
  - Реакция морской системы и баланс осадочного материала
  - Атмосферное воздействие радионуклидов
  - Чувствительность и уязвимость морской экосистемы Арктики
- C. Взаимовлияние суши и океана и их воздействие на баланс наносов в дельте Лены
  - Изменения климата и окружающей среды в дельте Лены в исторической перспективе
  - Транспортировка частиц в шельфовую систему дельты
- D. Наземная система: тенденции развития климата в Сибирской Арктике в краткосрочной и среднесрочной перспективах
  - наземные высокольдистые многолетнемерзлые грунты под воздействием изменений климата
- E. Морская система: долгосрочные тенденции развития климата в Сибирской Арктике
  - причины и последствия изменений климата в районах вечной мерзлоты в краткосрочной и среднесрочной перспективах
  - акустические свойства субмаринной вечной мерзлоты

В ноябре 1997 в Университете г. Фрайберг было проведено рабочее совещание «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ», организованное Хайдемари Кассенс Кассенс при активном участии Мартина Антонова, где встретились российские и германские участники проектов «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» и «ТАЙМЫР». Это совещание стало краеугольным камнем в разработке научной программы нового проекта. Концепция проекта «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ 2000» была основана на проведении целого ряда наземных и морских экспедиций, планирование которых также обсуждалась во время рабочей встречи. В ходе совещания была достигнута договоренность о том, что морские экспедиции «ЛАПЭК/TRANSDRIFT» будут организованы сотрудниками ГЕОМАРА в сотрудничестве с коллегами из ААНИИ, а наземные экспедиции «ЛЕНА» - усилиями сотрудников АВИ в Потсдаме совместно с коллегами из ААНИИ, Института мерзлотоведения в Якутске и Усть-Ленского Заповедника.

Опыт, полученный в ходе предыдущих морских экспедиций «ЛАПЭК/TRANSDRIFT», помог в планировании и подготовке морских экспедиций нового проекта, в то время как организацию наземных экспедиций «ЛЕНА» пришлось начинать практически с нуля. Общие вопросы и проблемы, такие как получение разрешений на проведение научно-исследовательских работ, таможенные операции, подготовку полетов решала группа в ААНИИ, координируемая Дмитрием Ю. Большиановым. Для решения текущих организационных вопросов на месте было необходимо найти новых партнеров и создать необходимую базу поддержки экспедиций в районах исследований.



В апреле 1998 г. Мартин Антонов и Фолькер Рахольд прибыли в Якутск для встречи с Михаилом Н. Григорьевым с целью подготовки стартовой базы для проведения экспедиционных работ. План поездки включал проведение нескольких встреч и переговоров в Якутске и Тикси об организации материально-технической поддержки и транспортных операций в дельте Лены, а также заключение договоров. К сожалению, из-за неблагоприятных погодных условий коллеги застряли в Батагае на реке Яна. Необходимые договоренности были тем не менее достигнуты. Контакты, установленные в 1998 г., в первый год проведения экспедиций «ЛЕНА», например, с Дмитрием Мельниченко из Гидрографической базы п. Тикси и с Усть-Ленским Заповедником (в то время там работал Александр Гуков), оказались на поверку исключительно важными и плодотворными, и сотрудничество, начатое на этом первоначальном этапе, продолжается и по сей день, не теряя своей важности и актуальности и 20 лет спустя.

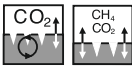
В ходе вышеназванной встречи было принято важное решение использовать в качестве опорной базы для наземных экспедиций по изучению вечной мерзлоты не станцию Лена-Норденшельд, а станцию на острове Самойловский в центральном районе устья Лены. Причина принятия такого решения Михаилом Н. Григорьевым и Фолькером Рахольдом заключалась в том, что станция Лена-Норденшельд расположена в гористой тундровой зоне, а не во влажном полигональном тундровом районе, типичном для устья реки Лены. Таким образом, для изучения влажной тундры в устье Лены участникам экспедиций пришлось бы пересекать Быковскую протоку дельты Лены на маленьких лодках, что возможно только при очень благоприятных погодных условиях. Таким образом, остров Самойловский был выбран в качестве плацдарма для проведения российско-германских наземных экспедиций по изучению вечной мерзлоты, исходя из соображений как научной целесообразности, так и практической доступности.

Рисунок 2: Команда «Самойловский» 1998 г.

Рисунок 3: Команда «Дельта Лены» 1998 г.



Уже спустя несколько месяцев после создания и подготовки плацдарма для работ смогла начать работу первая экспедиция «ЛЕНА-1998» в составе 30 человек под руководством Михаила Н. Григорьева и Фолькера Рахольда. Она была посвящена изучению наземных природных объектов проекта «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ 2000», с акцентом на исследование вечной мерзлоты. Исследования проводились тремя группами по следующим направлениям:



**«Команда Самойловский»**

- Сезонная изменчивость и динамика многолетнемерзлых грунтов в настоящее время
- Баланс парниковых газов (углекислого газа и метана) и системные исследования баланса метана
  - Процессы водо- и энергообмена в многолетнемерзлых грунтах
  - Микробные сообщества и движение диоксида углерода в многолетнемерзлых породах



**«Команда Дельта Лены»**

- Взаимовлияние суши и океана и их воздействие на баланс наносов в дельте р. Лены
- Изменения климата и окружающей среды в дельте Лены в исторической перспективе
  - Транспортировка частиц в шельфовую систему дельты



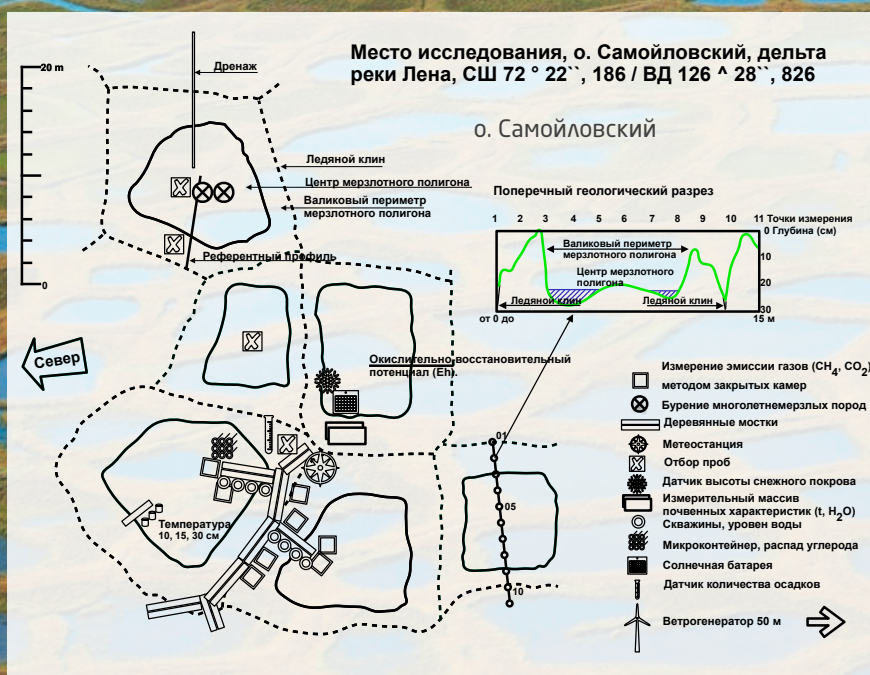
**«Команда Вечная мерзлота»**

- Наземная система: климатические тенденции в Сибирской Арктике в краткосрочной и среднесрочной перспективах
- Наземные высокольдистые многолетнемерзлые грунты в условиях изменений климата

Последующие экспедиции были организованы подобным же образом, хотя менялся как состав экспедиционных участников, так и районы работ отдельных групп исследователей.

*Фолькер Рахольд, Мартин Антонов, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Ева-Мария Пфайффер*

Рисунок 4: Команда «Вечная мерзлота» 1999 г.



## Первые годы почвенно-климатических исследований вечной мерзлоты на острове Самойловском и в его окрестностях (исследования 1998 - 2001 гг.)

Многопрофильные исследования вечной мерзлоты начались на острове Самойловский в 1998 году на базе результатов предыдущих исследований (Конференция в Пушино в 1992 и 1994 гг., «Море Лаптевых 2000», «Экспедиция Таймыр 1994-1997»). Они привели к возникновению многих открытий для исследования вопросов о климатически обусловленных процессах в многолетнемерзлых почвах, фактических условиях седиментации, истории условий окружающей среды в дельте реки Лены, а также других тем, связанных с льдонасыщенными многолетнемерзлыми грунтами.

В период с 1998 по 2001 год российские и немецкие ученые (до 15 человек в наиболее активное летнее время) делили друг с другом небольшую кухню, где они ели и общались, а также мастерскую для подготовки образцов (микроскопия, описание и сушка образцов и т. д.). Одна комната использовалась в качестве первой лаборатории ГХ для измерения содержания незначительных газовых примесей и микроорганизмов в почве, другая комната исполь-

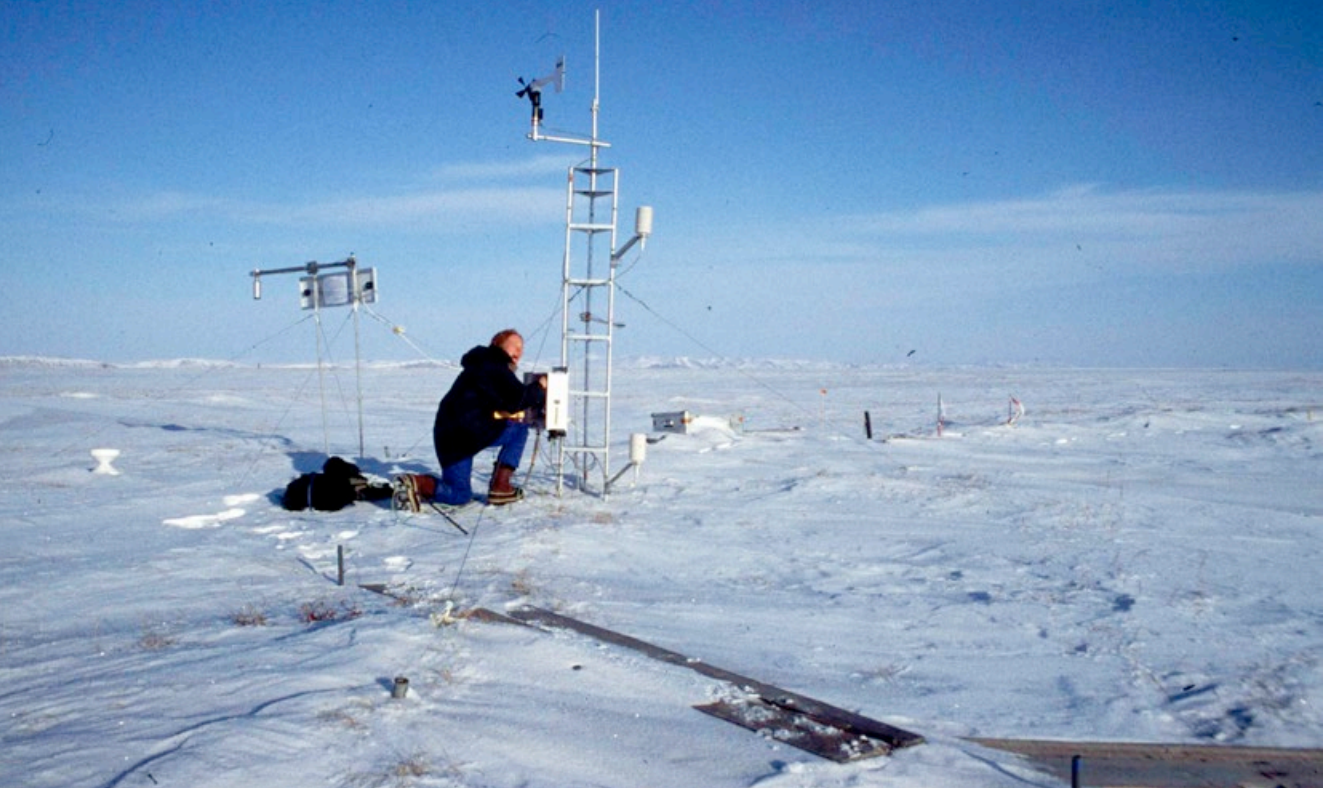
Рисунок 1: Схема установленных приборов метеорологической и почвенной станции на полигональной тундре острова Самойловский в 2001 году (эскиз, Г. Штофф, фото К. Пиль).

зовалась в качестве общежития для трех человек. Все остальные участники экспедиции жили в небольших палатках и раз в неделю наслаждались баней рядом с пресноводным озером. Питание членов экспедиции было в надежных руках повара из Усть-Ленского заповедника (УЛЗ), а хорошее питание означает, что усердно работающие ученые в дальнейшем будут в хорошем настроении. Многие немецкие участники узнали, как по-новому приготовить рыбу, мясо и хлеб. Вся группа отвечала за поддержание качества свежих продуктов, таких как яблоки, лимоны и капуста, находившихся в специальном контейнере в леднике (место хранения продуктов в мерзлом грунте), который надо было проверять каждую неделю, потому что других возможностей охлаждения не было.

При возникновении проблем с высокотехнологичным оборудованием участники научились быстро импровизировать. В большинстве случаев Гюнтер Штофф, инженер из АВИ, известный как «Хаусмайстер» (нем., досл. «домоправитель»), очень быстро мог предложить простые и практичные решения для устранения неполадок - рабочую программу экспедиций редко приходилось менять из-за технических трудностей.

Несмотря на длительные и трудные рабочие дни полевых исследований, продолжавшихся с 8 часов утра до 6 часов вечера или позже, участники из России и Германии никогда не упускали шансов поговорить о работе и планах на будущее. И если участники не чувствовали сильной усталости, то они с удовольствием вместе пели по вечерам, наслаждаясь напитком «пиво и компот» (отваром фруктов в сиропе с небольшим добавлением алкоголя - очень, очень вкусным). В эти часы ученые называли Самойловский «островом мечты» (нем. Trauminsel) в дельте, и именно так коллеги становились друзьями навсегда!

В первые годы работы на Самойловском основной целью исследования современных процессов была характеристика свойств углерода в почве и значения этих свойств для потоков энергии, воды и выбросов незначительных газовых примесей. Климатические наблюдения погодной станции острова Самойловский в течение почти 20 лет дают ценные сведения о параметрах погоды, почвы и вечной мерзлоты. Во время летней экспедиции в 1998 году была создана первая автоматизированная станция мониторинга погоды и состояния почвы. Датчики и детекторы этой первой станции позволяли измерять температуру воздуха, влажность, скорость ветра, излучение, осадки, высоту снежного покрова, температуру почвы, удельную электропроводность и объемное содержание влаги в грунте, а также тепловые потоки из почвы (см. Рисунок 1). Автоматизированное наблюдение особенно проблематично для климатических датчиков и источников энергии из-за экстремальных климатических условий с минимальными температурами зимнего воздуха ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ , скоростью ветра до 16 м / сек и длительной полярной ночью. Эти арктические условия могут привести оборудование к выходу из строя или полной поломке по непредвиденным причинам.



Первая автоматическая метеостанция успешно работала на аккумуляторе и солнечной энергии (Рисунок 2) в течение зимы 1998-1999 годов, что позволило продолжить наблюдения.

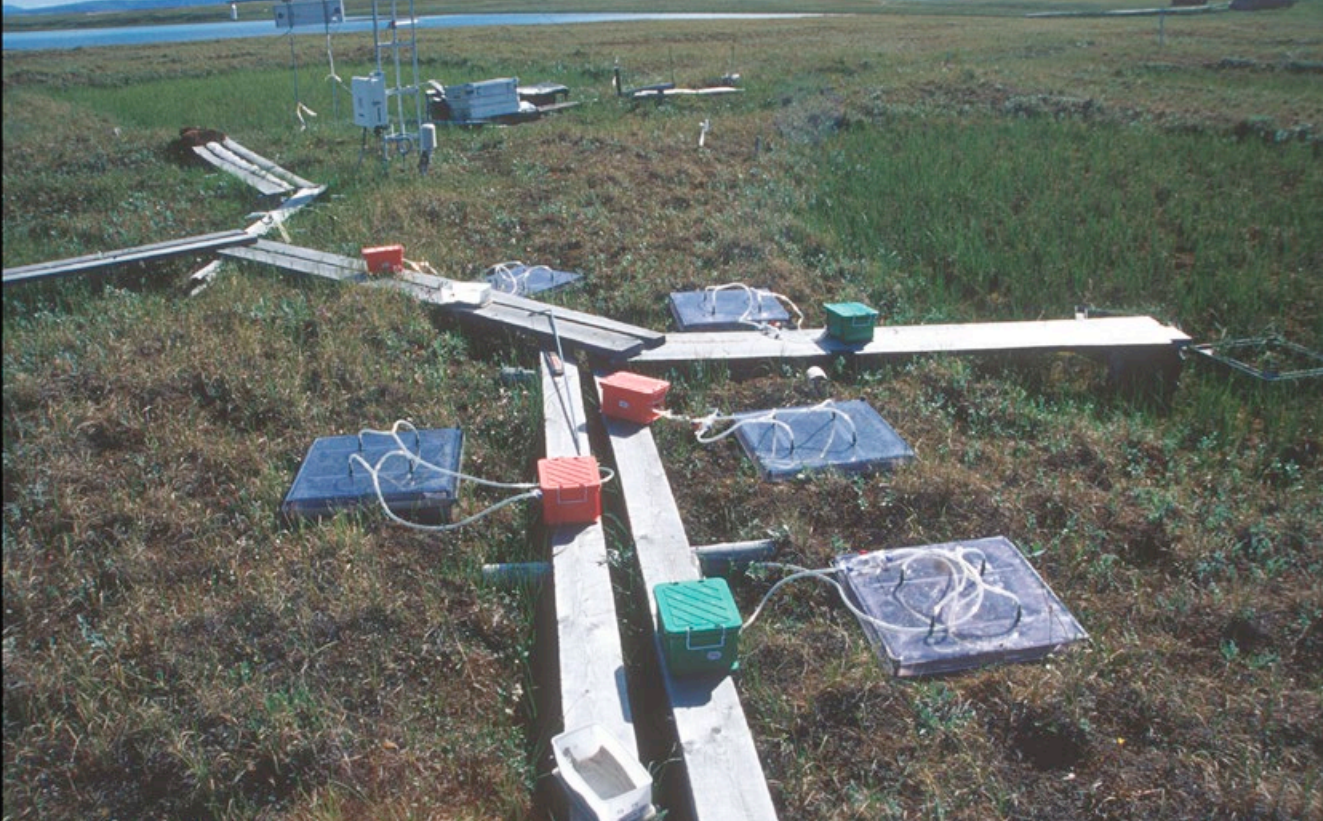
Изначально существование станции планировалось на 3 года, поэтому, после проверки в 2001 году, в августе 2002 года ее заменили на новую. Эта станция продолжает существование до сих пор, обеспечивая таким образом долгосрочный сбор данных. Данные широко используются (i.) для количественной оценки ответа экосистемы на движущие факторы климатических изменений, (ii.) для изучения сложных и длительных по времени процессов в экосистеме, и (iii.) для параметризации и проверки моделей Земной системы и почвенного покрова.

Эта станция длительного наблюдения на о. Самойловский служит платформой для совместной научной работы, способствующей мультидисциплинарным исследованиям. Остров Самойловский стал источником данных для нескольких международных программ, таких как CALM (Программа циркумполярного мониторинга деятельного слоя), FLUXNET (сеть пунктов регионального и глобального анализа метеорологических наблюдений, оборудованная микрометеорологическими мачтами) и других.

Исследование изменения количества углерода в почве и выбросов незначительных газовых примесей на острове Самойловском началось в 1998

Рисунок 2: Первая автоматическая метеорологическая и почвенная станция в полигональной тундре первой террасы острова Самойловский, созданная в августе 1998 года, успешно собрала первые данные за зиму 1998-1999 годов (фото В. Мюллер-Лупп).



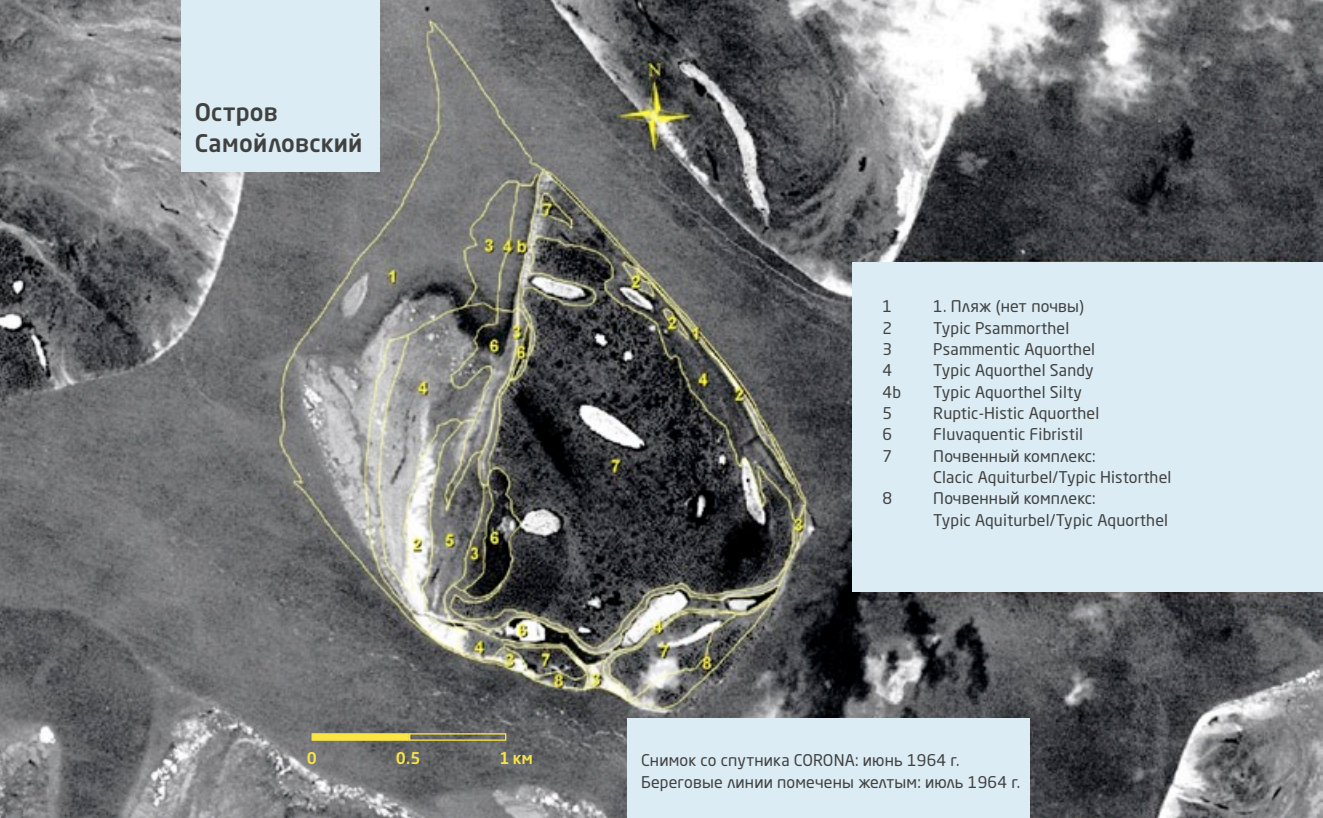


году. Данные измерений закрытой камерой (Рисунок 3) показали сильную изменчивость темпов выброса метана из полигональных почв мокрой тундры: низкие показатели  $<10 \text{ мг CH}_4 \text{ д}^{-1} \text{ м}^{-2}$  на границах полигонов и высокие показатели около  $70 - 80 \text{ мг CH}_4 \text{ д}^{-1} \text{ м}^{-2}$  в центрах полигонов. Изменчивость выброса  $\text{CH}_4$  в полигонах была вызвана гидрологией почвы (изменение кислородных почвенных условий на бескислородные в соответствии с глубиной), доступностью субстрата для производящей  $\text{CH}_4$  археи и скоростью потребления  $\text{CH}_4$  метаноокисляющими бактериями в верхних горизонтах поверхности аэрированной почвы. Первые исследования микробиологических процессов *in situ* начались в 2000 году и были сосредоточены на продуцировании  $\text{CH}_4$  в почве и концентрациях  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в ледяных клиньях с разных участков в дельте реки Лены.

Первые исследования азотного цикла микроорганизмов начались в нашей полевой лаборатории на острове Самойловский в 1999 году и были основаны на более ранних исследованиях российской экспедиции «Берингия». При помощи методов морфологического и иммунологического микробного анализа, применяемых к культурам накопления из почвенных материалов, было доказано сосуществование нитритокисляющих бактерий *Nitrobacter* и *Nitrospira*. При этом использовались образцы поверхности почвы, взятые с края полигонов с вогнутой поверхностью. В активном слое и более глубоких отложениях возрастом около 40 000 лет нитрифицирующая активность

Рисунок 3: Системы закрытых камер для измерения выброса метана в мокрой полигональной тундре на острове Самойловский в 2001 году (фото Е.-М. Пфайффер).

## Остров Самойловский



- 1 1. Пляж (нет почвы)
- 2 Typic Psammorthel
- 3 Psammentic Aquorthel
- 4 Typic Aquorthel Sandy
- 4b Typic Aquorthel Silty
- 5 Ruptic-Histic Aquorthel
- 6 Fluvaquentic Fibristil
- 7 Почвенный комплекс:  
Glacic Aquiturbel/Typic Historthel
- 8 Почвенный комплекс:  
Typic Aquiturbel/Typic Aquorthel

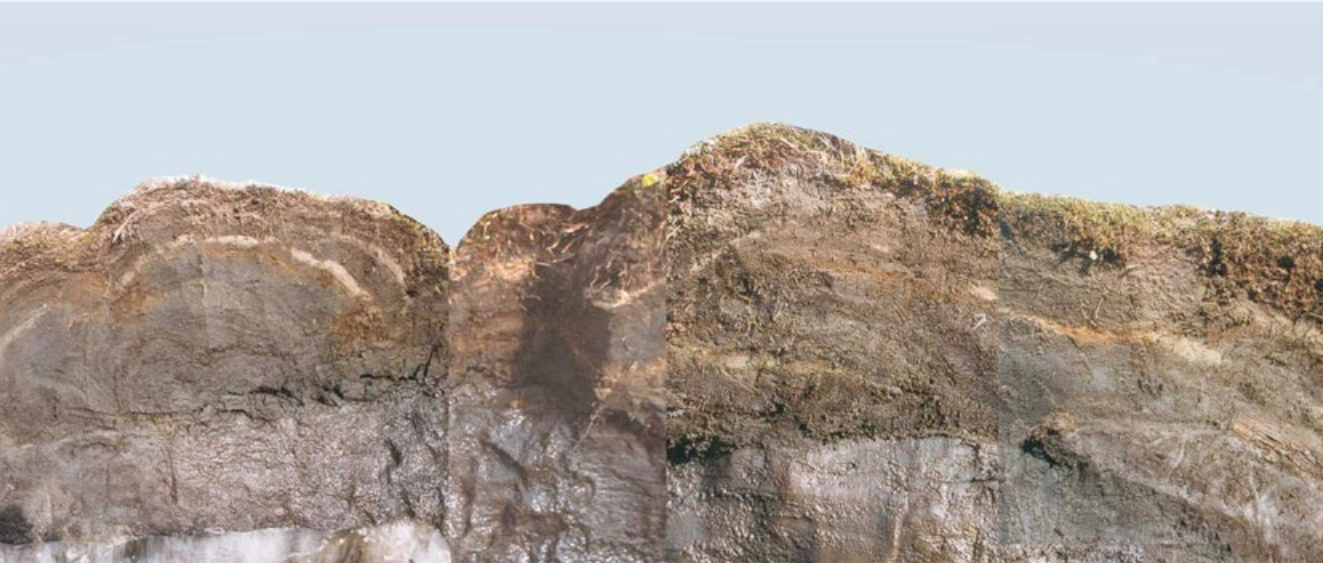
Снимок со спутника CORONA: июнь 1964 г.  
Береговые линии помечены желтым: июль 1964 г.

была выше при 28 °С по сравнению с 17 °С, тогда как в более древних отложениях (0,6 - 3 миллиона лет) бактерии предпочитали более низкую температуру 17 °С. В почвенных образцах, взятых в 2001 году из активного слоя трансекта от края полигона к центру, при низких температурах до 17 °С получилось выделить новый гемолитический автотропный нитритоксилирующий вид бактерий, который предлагалось назвать «*Candidatus Nitrotoga arctica*».

Первая почвенная карта острова Самойловский (см. Рисунок 4) была сгенерирована, основываясь на российской и американской системах почвенной классификации. Она показала разнообразие многолетнемерзлых почв острова. Первая терраса над поймами в восточной части острова Самойловский довольно однородно покрыта почвенным комплексом *Glacic Aquiturbel* и *Typic Historthels* (около 70% площади острова). Поперечное сечение репрезентативного почвенного слоя демонстрирует неоднородность многолетнемерзлых почв полигонов с вогнутой поверхностью на острове Самойловский (Рисунок 5), что объясняет высокую изменчивость скорости выброса углерода и незначительных газовых примесей.

Чтобы получить дополнительные данные об углеродном стоке в более глубоких мерзлотных отложениях, во время экспедиции «Лена 2001» впервые началось бурение вечной мерзлоты на островах Самойловский, Курунгнах и Сардах.

Рисунок 4: Первая почвенная карта острова Самойловский, основанная на изображении со спутника CORONA 1964 года и показывающая разнообразие многолетнемерзлых почв (Pfeiffer et al., 2001).



Эти почвоведческие исследования подготовили научную базу для дальнейшего изучения водного и энергетического баланса, поглотителей углерода (запасы, секвестрация, обмен) и его источников (выбросы углерода, эмиссии незначительных газовых примесей) в экосистемах арктической мокрой тундры в дельте реки Лены. Эти долгосрочные исследования климата, почвы и экологии необходимы для получения ключевых знаний об изменениях в окружающей среде, климате и биоразнообразии. Это особенно важно в арктических районах, где плотность наблюдательных пунктов на станции ниже стандартной, а круглогодичные измерения затруднительны. Поддержание высокого качества получаемых данных возможно только при регулярном проведении технического обслуживания, калибровки и частом посещении этих отдаленных пунктов.

*Ева-Мария Пфайффер, Юлия Бойке, Гюнтер Штооф, Ларс Кутцбах, Михаил Н. Григорьев, Ирина А. Якшина, Анна Н. Курчатова, Дмитрий Ю. Большиянов*

Рисунок 5: Поперечное сечение полигона с вогнутой поверхностью, в котором видны различные гелисоли и неоднородность криотурбированных почв (фото Л. Кутцбах).



## Полуостров Быковский: первая наземная экспедиция с акцентом на изучение палеоклимата

Первые совместные российско-германские экспедиции, объединившие усилия многих ученых из обеих стран, проводились на севере Сибири уже в 1993 г. Они стали основой для дальнейшего успешного сотрудничества между учеными России и Германии. Целью этих экспедиций было изучение экологического состояния окружающей среды в Арктике в настоящем времени, а также его изменений в прошлом. В 1998 было положено начало важному исследовательскому проекту «Система моря Лаптевых 2000». Первая экспедиция «Дельта Лены 1998» была проведена в июле-августе 1998 г. в рамках этого проекта. Задачей нашей исследовательской группы стало изучение сибирской вечной мерзлоты в контексте ландшафтных, экологических и климатических изменений.

Многолетнемерзлые грунты (или «вечная мерзлота») существуют в Сибири уже сотни тысяч лет. Экстремальный холод зимой и короткое лето приводят к тому, что за лето оттаивает только маломощный поверхностный слой. Основная часть пород сохраняется в мерзлом состоянии. При наращивании осадочной толщи мощность вечной мерзлоты постепенно увеличивается. Такие условия оставались неизменными на протяжении очень продолжительного времени: во многих районах Сибири такие условия господствуют начиная с ледникового периода и вплоть до настоящего времени. Это привело к формированию многолетнемерзлой толщи, мощность которой достигает многих сотен метров. Остатки животных и растений, характерные

Рисунок 1: Термозрозионный столб «Куно» на береговом склоне моря Лаптевых.

для прошедших времен и ландшафтов, переходили при этом очень быстро в мерзлое состояние, то есть мгновенно вмерзали в почву и таким образом хорошо консервировались.

В дополнение к таким «биоиндикаторам», то есть ископаемым остаткам растительности и животного мира, отражающим экологические и климатические условия во время накопления отложений и их перехода в многолетнемерзлое состояние, существуют и важные климатические индикаторы, такие как состав стабильных изотопов водорода в составе подземного льда. Одновременно с аккумуляцией осадочной толщи образовывались клиновидные тела подземных льдов. Они появлялись за счет замерзания атмосферных осадков в виде тонких годовых слоев в морозобойных трещинах, возникающих зимой и проникающих глубоко в мерзлую толщу. Изотопный состав образцов льда, последовательно отобранных из ледяных жил, позволяет реконструировать зимние температуры прошлых эпох.

В марте 1998 г. многие из нас только поступили на работу в Потсдамский филиал Института им. Альфреда Вегенера, а в конце марта мы уже полностью погрузились в подготовительные экспедиционные работы. В апреле было закуплено недостающее снаряжение для экспедиции, а в мае все было упаковано в контейнеры в Бремерхафене и отправлено в Россию. Наши российские коллеги из ГУ ААНИИ в Санкт-Петербурге продолжили организацию экспедиции. В конечном итоге, в июле мы уже летели в самолете над сибирской тундрой, часами смотрели в иллюминаторы, замороженные своеобразно расстилавшихся внизу мерзлотных ландшафтов. Многие из молодых ученых в наших рядах в тот момент еще не до конца осознавали, что для них началась новая жизнь - настоящая жизнь исследователей Арктики. Это чувство и восхищения, и благоговейного трепета и до сих пор охватывает многих участников арктических экспедиций.

Место наших экспедиционных работ - полуостров Быковский - располагается юго-восточнее дельты Лены. Главным объектом наших исследований здесь стали знаменитые обнажения льдистых толщ километровой протяженности - обрывы так называемого «Ледового комплекса» на восточном берегу полуострова. Выбранная нами территория немного напоминает знаменитый остров Пасхи. При таянии крупных ледяных жил между ними зачастую сохраняются мерзлые наносы в виде столбов в несколько метров высотой, с похожими на головы формообразованиями наверху таких столбов, имеющих весьма причудливые формы, напоминающие скульптуры о-ва Пасхи. Одну из них мы назвали «Куно» в честь Виктора Куницкого, нашего опытного коллеги из Института мерзлотоведения. «Куно» был особенно красивым экземпляром широко встречающихся здесь термокарстовых столбов (так называемой «байджарахи» по-русски). Крепко вмурованный в грязь, он возвышался на своих стройных ногах, горделиво поднимая главу к арктическому солнцу. Для нас этот столб представлял особенный интерес потому, что в нем находились почти 10 м мерзлых осадков, которые, по



позднее полученным датировкам, охватывали период около 20 тыс. лет. Но, по-видимому, мы слишком дотошно исследовали «Куно», распиливая и разрубая его на части. Буквально через два дня, прямо во время опробования, он неожиданно потерял свою голову. Мы вдруг услышали страшный грохот и наш «Куно» отныне остался без головы. К счастью, его такая горделивая в прошлом глава упала и откатилась в сторону моря, где в это время никто не работал.

В конце июля погода начала постепенно ухудшаться, стало ветрено и дождливо, температура упала до 8 градусов Цельсия. Мы боролись с непогодой, продолжая упорно работать на льдонасыщенных стенах с их опасными скользкими селевыми потоками. Нашей задачей было получение как можно большего количества образцов для последующих лабораторных исследований с целью реконструкции всей последовательности отложений и, таким образом, воссоздания характерных особенностей последнего периода в развитии Арктики. Во время работы мы зачастую выглядели так, как будто только что приняли грязевые ванны, потому что на самом деле так оно и было: несмотря на особую альпинистскую обувь, мы то и дело падали. Шел дождь или светило солнце – все равно, льдистая мерзлота постоянно оттаивала. В результате чего время от времени внезапно отрывались куски тающих пород и скатывались по склону. Мы постоянно слышали грохот «перемещаемых» пород, падающих на лед.

Рисунок 2: Подъем по термоэрозионному склону к стене ледового комплекса.



А когда накапливались большие объемы, то они, подобно лавинам, внезапно начинали ползти к берегу, причем иногда даже с кем-то из нас.

Но все это не меняло трудового настроения в нашем коллективе. Мы работали дружно и с большим энтузиазмом. Исследования на п-ове Быковском стали только началом. Вскоре мы проводили свои работы на Большом Ляховском острове, куда мы четыре раза возвращались в разные годы, чтобы дополнять полученные результаты. Позже экспедиции проводились непосредственно в дельте Лены и на западном берегу моря Лаптевых, а потом и в низовьях Колымы. Целью этих экспедиций было изучение общих закономерностей и региональных особенностей палеогеографического развития арктических регионов в позднем четвертичном периоде. На основе результатов первых лет были опубликованы почти 30 статей в реферируемых международных журналах, написан ряд дипломных работ, а также кандидатских и докторских диссертаций в России и Германии.

Многие из нас уверовали в одно - кто хоть раз поработал в Арктике, тот привязался к ней душой навсегда. Научных проблем здесь по-прежнему остается множество. Творческое взаимодействие российских и немецких ученых и их совместный труд в составе сложившегося к настоящему времени интернационального коллектива раскрывают большие возможности для их решения.

*Лутц Ширрмайстер, Гвидо Гроссе, Виктор В. Куницкий, Кристине Зигерт, Ханно Майер*

Рисунок 3: Обрыв ледового комплекса с ледяными жилами и вмещающими их осадками.

## Геоморфологические исследования и изучение эрозии прибрежной зоны в экспедициях корабельного базирования 1998-2002 гг. на судах «Дунай», «Нептун», «Софрон Данилов» и «Павел Башмаков»

Целью данных научно-исследовательских работ являлось изучение климата и окружающей среды в дельте Лены в исторической перспективе, анализ переноса частиц в шельфовую систему Лены, количественное определение и оценка прибрежной эрозии и связанного с ней переноса осадков и органического углерода в море Лаптевых. Исследования базировались на обширном отборе проб. На Рисунке 1 показаны места проведения исследовательских работ и отбора проб в ходе пяти экспедиций 1998-2002 гг. Экспедиции проводились в далеких и зачастую трудно доступных местах на различных типах судов, в том числе на специализированных НИС (см. Таблицу 1). Суда служили участникам экспедиции в качестве исследовательской базы, а высадки на побережье для проведения полевых исследований осуществлялись на небольших лодках. Все суда были зафрахтованы через Тиксинскую гидрографическую базу.

Малое каботажное судно «Дунай» (Рисунок 2) использовалось для работ в дельте Лены и в ее окрестностях (1998, 1999, 2001). В 2000 и 2001 году похожее судно «Нептун» (Рисунок 3) использовалось для гидрологических и гидроморфологических исследований в дельте реки Лены. Эти малогабарит-

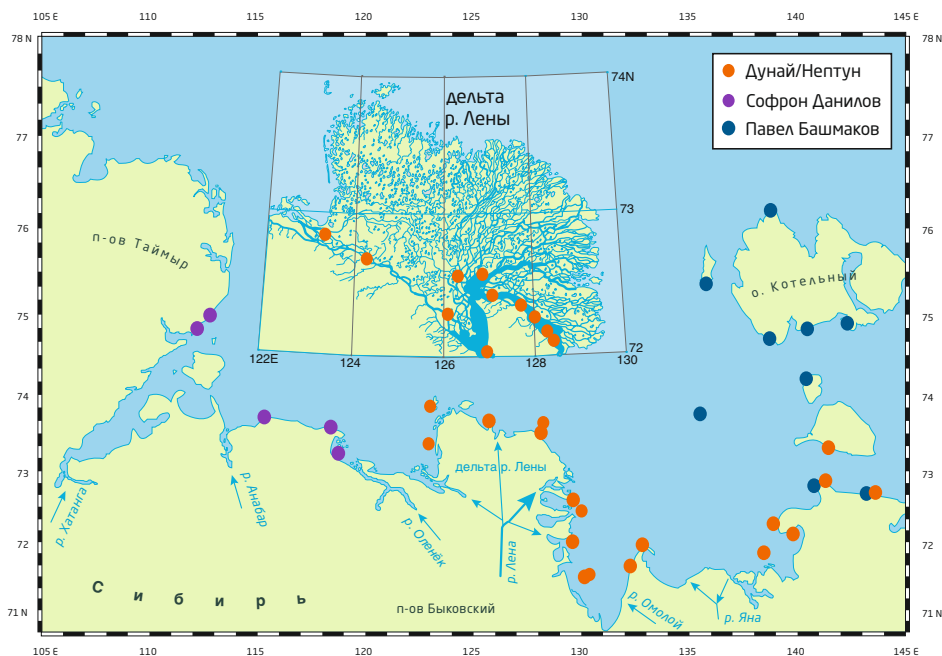


Рисунок 1: Станции в ходе экспедиций корабельного базирования 1998-2002 гг.





Год	Судно	Район работ	Полевые исследования
1998	Дунай	Рукава дельты Лены	Установка автономно-буйковых станций (АБС) с самописцами течений, термосолезондов (проводимость, глубина, температура), отбор проб осадков (для проведения седиментологического, минералогического и геохимического анализов, определения возраста пород методом оптически стимулированной люминесценции)
1999	Дунай	Восточная и центральная части дельты Лены	Батиметрические измерения (профилирование береговых склонов), малоглубинная сейсморазведка, отбор проб осадков (для проведения седиментологического, минералогического и геохимического анализов)
2000	Софрон Данилов	Западная часть моря Лаптевых	Батиметрические измерения (профилирование береговых склонов), малоглубинная сейсморазведка, отбор проб осадков (для проведения седиментологического, минералогического и геохимического анализов), съемка и картографирование береговой линии
2001	Дунай	Западная авандельта Лены и прибрежные острова	Батиметрические измерения (профилирование береговых склонов), малоглубинная сейсморазведка, отбор проб осадков (для проведения седиментологического, минералогического и геохимического анализов), съемка и картографирование береговой линии
2002	Павел Башмаков	Восточная часть моря Лаптевых и Новосибирские острова	Батиметрические измерения (профилирование береговых склонов), геоморфологические исследования, малоглубинная сейсморазведка, отбор проб осадков (для проведения седиментологического, минералогического и геохимического анализов), съемка и картографирование береговой линии

Рисунок 2: Каботажное судно «Дунай».

Таблица 1: Обзор экспедиций корабельного базирования для проведения исследований прибрежной зоны и геоморфологических исследований (фоновое фото: П. Верзоне).



ные суда также применялись для транспортировки нескольких экспедиционных групп к местам их исследований. В последующие годы для проведения исследований в более удаленных местах на побережье моря Лаптевых применялись крупногабаритные суда. В 2000 г. научно-исследовательские работы в западной части моря Лаптевых, включающие и отбор проб на станциях, проводились с использованием буксира «Софрон Данилов» (Рисунок 3). В 2002 был зафрахтован НИС «Павел Башмаков» (Рисунок 4) для проведения работ в восточной части моря Лаптевых, включая и остров Новая Сибирь. В Таблице 1 показаны рабочие планы пяти экспедиций, включая районы морских и полевых исследований.

Экспедиционное судно служило не только непосредственной базой для проведения исследований прибрежной зоны, надежным транспортным средством для доставки участников экспедиции к различным местам исследования и незаменимым средством материально-технического снабжения экспедиции, но и являлось важным координационным центром для всей экспедиции в целом. Экспедиционные группы, одновременно работавшие на различных участках в дельте Лены или в районе моря Лаптевых, поддерживали связь по спутниковому телефону, координируя таким образом проведение исследовательских работ.

*Фолькер Рахольд, Вальдемар Шнайдер, Михаил Н. Григорьев,  
Ханс-Вольфганг Хуббертен, Феликс Э. Арэ, Дмитрий Ю. Большиянов*

Рисунок 3: Речное судно «Нептун».

Рисунок 4: Буксирное судно «Софрон Данилов».

Рисунок 5: НИС «Павел Башмаков».



## Озерные исследования на острове Арга: история и формирование дельты реки Лены

Современная речная дельта сформировалась в восточной части дельты реки Лены со времен раннего голоцена. Напротив, северо-западная часть дельты Лены, также известная под названием остров Арга-Муора-Сисе, характеризуется многочисленными несвязанными между собой озерами и отсутствием крупных речных рукавов. Ширина и длина этих озер измеряется несколькими сотнями метров. В их центральных районах наблюдаются необычные глубокие субаквальные впадины, окруженные очень мелкими песчаными шельфами. Каково происхождение столь необычной озерной морфологии и почему многие из этих озер имеют настолько вытянутую форму и такую ярко выраженную ориентацию?

Чтобы ответить на этот вопрос, мы решили провести зимние и летние полевые работы на острове Арга. В 1998 и 1999 годах мы объединили геофизические исследования с неглубоким бурением отложений, чтобы уточнить происхождение этих необычных озерных окружений. Нашу версию дополнило цифровое моделирование.

Мы сосредоточились на определении возраста и происхождения озера Николай-Кюеле, самого крупного и наиболее заметного среди озер Арги. Мы полагали, что оно может дать нам надежные сведения об истории острова Арга. Одной из целей этого исследования было разрешение научных споров о том, являются ли эти озера ледниковыми или перигляциальными; другими словами, прояснение истории развития острова Арга в течение позднего четвертичного периода.

Свидетельства эволюции озера с раннего голоцена были собраны с помощью неглубоких сейсмических профилей по всей котловине, дополнитель-

Рисунок 1: Озера острова Арга (RapidEye\_2010-07-06) расположены на песчаной равнине и имеют широкие мелкие шельфовые области (глубина менее 2 м) и глубокие центральные области. Озеро Николай-Кюеле (частично покрытое льдом) имеет несколько впадин (максимальная глубина воды 17 м) и имеет максимальную длину и ширину 8 км.



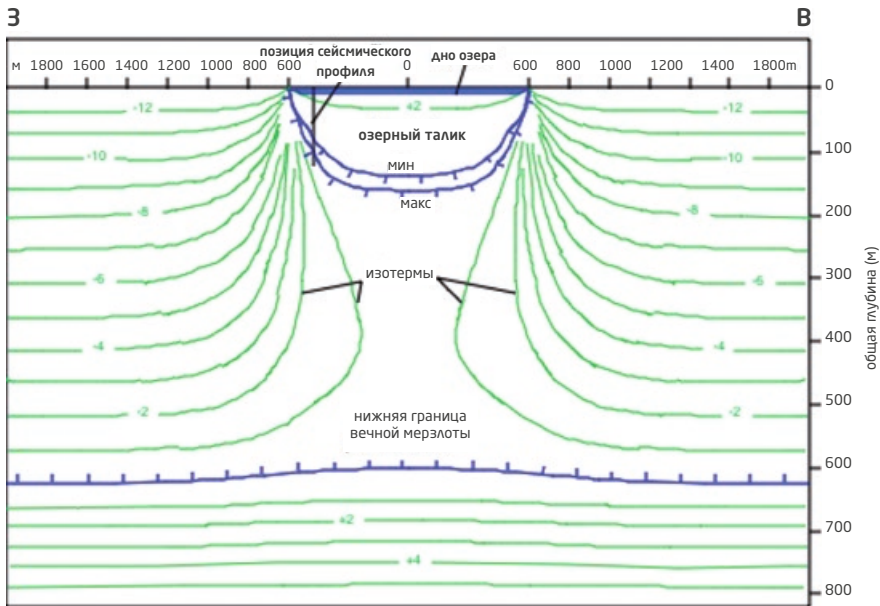
ного профилирования обледенелых краев озера на мелководье грунто-проникающим радаром (ГПР) и проб осадочных кернов, взятых из одного из глубоких центральных участков озера Николай-Кюеле. Верхние метры рельефа второй песчаной террасы дельты реки Лены, где находится озеро Николай, сформировались в конце позднего плейстоцена (14,500 - 10,900 лет до настоящего времени (BP)) и представляют собой свидетельство того, как выглядела окружающая среда до образования озера. Свойства наносов указывают на действие флювиальных процессов и создание наслоений в русле реки. После начальной стадии водно-болотных угодий началось формирование озерной котловины в песчаной среде из-за термокарстового проседания поверхности 7000 лет назад. Согласно анализу пыльцы, начало обширного термокарста совпадает с региональным голоценовым климатическим оптимумом.

Сейсмические профили показали существование мощных участков незамерзающей породы (называемых «таликами»), окруженных вечной мерзлотой, под центральными глубинами озера. Это было также подтверждено математической моделью роста и распространения талика под озером. Основываясь на результатах геологических и геофизических исследований можно утверждать, что гипотеза о гляциальном происхождении морфологии данной области не обоснована. Это было выведено из результатов использования методов дистанционного зондирования другими авторами. Напротив, постепенная миграция речного канала с запада на восток оставила за собой песчаную долину, водоемы которой превратились в термокарстовые котловины. Слияние некоторых термокарстовых озер приводило к созданию озер-близнецов, таких, как большое озеро Николай.

Исследования острова Арга были продолжены в 2001, 2005 и 2009 годах и включали дальнейшее бурение и исследование обнажений. Результаты всех

Рисунок 2: Грунтопроникающий радар, установленный на льду, был использован для получения снимков, отражающих батиметрические характеристики и геометрию отложений в озерах.

Рисунок 3: Бурение отложений помогло проверить наличие геофизических отражателей в подпочвенном слое и предоставило материал для реконструкции исторических этапов развития окружающей среды этой области.



исследований были использованы для написания нескольких кандидатских и магистерских диссертаций.

Возможно, стоит упомянуть об одном важном моменте. Давайте представим, что существует пирамида, отражающая состав полевой группы. Вершина пирамиды указывает на малое количество участников с определенным научным стажем, а ее основание – на большее их количество. На начальном этапе наших исследований в дельте реки Лены молодые ученые, то есть соискатели, находились на вершине этой пирамиды, а в полевых группах присутствовало много старших исследователей, и общение между ними было веселым и непринужденным. Однако, с некоторых пор все изменилось, и теперь молодые исследователи, включая студентов-ассистентов, находят на широком основании данной пирамиды, и их значительно больше, чем старших ученых, лишь немногие из которых присутствуют на ее вершине. Это, возможно, показывает увеличение региональной базы знаний и навыков, необходимых для подготовки и проведения полевых работ, а также говорит о технической подкованности молодых ученых и увеличении автоматизации процессов.

*Георг Швамборн, Михаил Н. Григорьев, Фолькер Рахольд, Владимир Е. Тумской, Лутц Ширрмайстер, Гвидо Гроссе*

Рисунок 4: Цифровое моделирование подтвердило выводы о распространении озер в песчаной местности, оставшейся после прошлой флювиальной стадии развития реки Лены, благодаря проседанию почв из-за вытаивания подземного льда (термокарст).

## Микробная трансформация углерода в сезонно-талом горизонте и вечной мерзлоте

### Введение

Еще несколько десятилетий назад вечная мерзлота считалась «стерильной» и погребенный в ней углерод, который при таянии мерзлоты неизбежно возвратится в круговорот, что, в свою очередь, может оказать воздействие на климат, не вызывая особого беспокойства. Однако, ситуация изменилась. Начиная с 1998 года, в дельте р. Лены проводятся исследования микробной трансформации углерода, которые являются частью глобального изучения круговорота углерода в мерзлотных экосистемах и, в частности, продукции и окисления мощнейшего парникового газа метана. Благодаря микробиологическим исследованиям, проведенным в дельте р. Лены, выявлено, что диапазон температур жизненной активности микроорганизмов, выделяющих и потребляющих метан, охватывает более чем 30°C, включая отрицательные температуры. Эти микроорганизмы великолепно адаптированы к экстремальным условиям регулярного замораживания и оттаивания или постоянной заморозке. В целом, количество клеток и активность микроорганизмов в почвах, подстилаемых вечной мерзлотой, в дельте р. Лены примерно такие же, как и в почвах менее экстремальных регионов. И, кроме того, микробные сообщества глубоких, постоянно замороженных слоев, являются как бы отпечатком прошлых изменений окружающей среды и определяют граничные условия предстоящей реакции экосистемы на таяние вечной мерзлоты. Разнообразие микрорельефа, гидрологических условий и растительности, присущее ландшафту арктической полигональной тундры, служит обрамлением сложившихся в экосистеме процессов выделения и потребления метана микроорганизмами. Например, сосудистые растения, в частности, *Carex sp.* и мхи обеспечивают микроорганизмы пищей и кислородом, в то время как стоячая вода в центрах морозобойных полигонов способствует накоплению торфа и процессам разложения углерода в бескислородных условиях. Полевые работы в далекой северной тундре (и не только микробиологические) означают недосып, море работы, быть постоянным объектом атак мириадом кровожадных насекомых, таская тяжеленное оборудование и образцы через кочки и грязевые лужи. Но незабываемые моменты с чудесными коллегами компенсируют всю эту борьбу. Две нижеприведенные истории иллюстрируют перипетии исследований экологии микроорганизмов почв дельты р. Лены.

### Метаноген отправляется с острова Самойловский в космос

Полевые работы лета 2002 года (Рисунок 1, слева) положили начало необыкновенному путешествию микроорганизма с особыми свойствами. Между обнаружением способности выделять метан образцами почвы с северной оконечности острова Самойловский до опубликования статьи, описывающей новый вид микроорганизма, метаноген *Methanosarcina*

*soligelidi*, прошло 11 лет. Этот метаноген в настоящее время служит моделью микроба, потенциально способного жить на Марсе. Жизнь в условиях длительных периодов регулярной заморозки и последующего оттаивания позволила этому микробу превратиться в невосприимчивый к высоким нагрузкам микроорганизм, устойчивый к высушиванию и способный выжить при чрезвычайно высоких уровнях солености и радиации. Обладая такими способностями, *M. soligelidi* стала пассажиром наружной платформы совместного российско-европейского проекта «EXPOSE-R2», закрепленной на базе российского модуля «Звезда» МКС (Рисунок 1, в середине и справа). Платформа подвергалась воздействию радиации в течение 18 месяцев, а микроорганизм в ней находился в «марсоподобной» атмосфере, содержащей 95% CO<sub>2</sub>.



### **Потребляющие метан бактерии, сосуществующие со мхами: пример исследования, основанного на импровизации**

Работа в отдаленных районах всегда требует гибкости и импровизации, особенно если что-то пошло не так. Эта история произошла в июле 2009 года, когда полевое оборудование застряло где-то в дебрях российских аэропортов, и коллеги-исследователи ничего не могли с этим поделать из-за визовых сложностей.

Коллективные прогулки по острову соратников, лишенных возможности начать полевые измерения, привели к появлению множества новых идей совместной работы, которые можно было бы претворить в жизнь, используя оборудование, доступное на станции.

Благоприобретенное время было использовано для разработки и обсуждения новых гипотез, планирования экспериментов, полевых измерений и сбора образцов, которые должны были подтвердить вновь возникшие гипотезы.

В результате такой стихийно адаптированной полевой работы было впервые установлено тесное взаимодействие между коричневыми мхами (*Scorpidium scorpioides*, *Meesia triquetra*) и потребляющими метан бактерия-

Рисунок 1: Отбор образцов почвы на острове Самойловский (фото: Г. Штоф, 2005), международная космическая станция (МКС) и экспозиционная платформа «EXPOSE-R2» на базе российского модуля «Звезда» МКС (источник: DLR).

ми, живущими ниже уровня грунтовых вод в многочисленных полигонах на острове Самойловский (Рисунок 2).

Используя кислород, вырабатываемый коричневыми мхами в результате фотосинтеза, потребляющие метан бактерии окисляли почти весь метан, образовывавшийся в бескислородном придонном слое пруда.

Пруды иногда становились даже стоком атмосферного метана, хотя придонная почва была им (метаном) насыщена, что до сих пор никак не упоминалось в литературных источниках, ни для каких затопленных почв. Более того, используя инструменты, установленные на крыше старой станции на острове, было показано, что значительная часть углерода, зафиксированного мхами, была получена в результате окисления метана микроорганизмами.

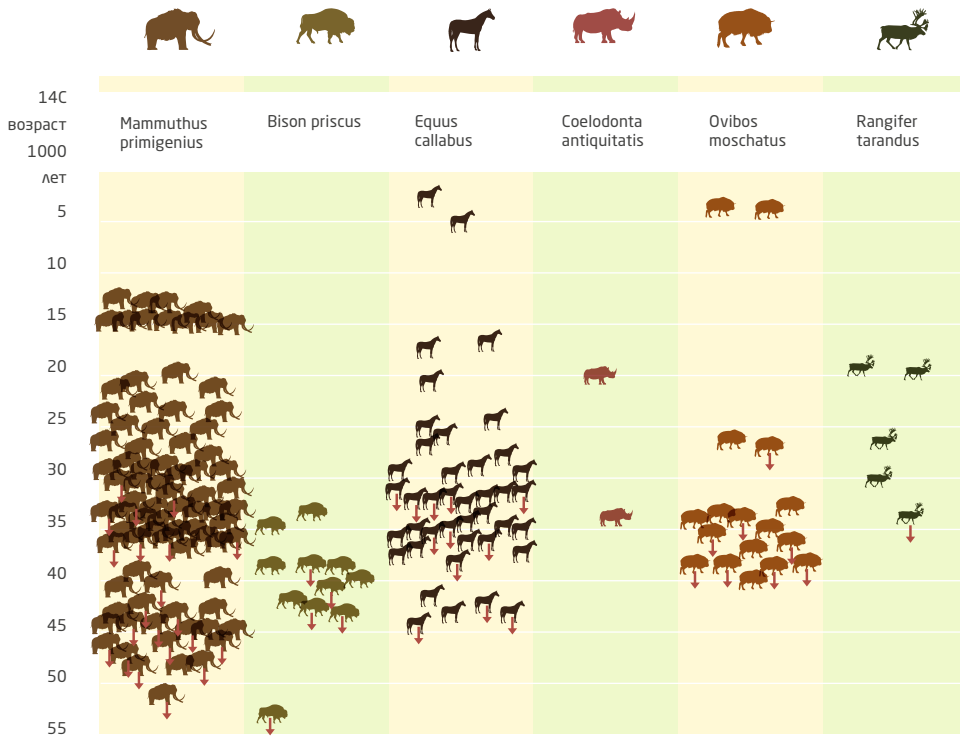


Широкоформатные исследования процессов микробной трансформации органического вещества мерзлотных экосистем дельты р. Лена и их регуляции параметрами окружающей среды и биологическими взаимодействиями играют немаловажную роль и привносят новаторские идеи в область изучения микробной экологии в условиях вечной мерзлоты. С самого начала исследования собрали вместе ученых из России (Красноярск), Германии (Гамбург, Потсдам, Кельн, Мюнхен) и Швейцарии (Цюрих), что в значительной степени способствовало улучшению понимания особенностей эмиссии и круговорота парниковых газов в экосистемах Сибири, подстилаемых вечной мерзлотой, в условиях изменяющегося климата.

*Сюзанне Либнер, Кристиан Кноблаух, Ева-Мария Пфайффер, Светлана Ю. Евграфова, Дирк Вагнер*

Рисунок 2: Отбор проб подводного коричневого мха на о. Самойловский (слева) и вид коричневого мха *Scorpidium scorpioides* под водой (справа). Мох живет во взаимопользующей связи с метаноокисляющими бактериями, обеспечивая им кислород и, в свою очередь, получая  $\text{CO}_2$ .





## Полевые работы по реконструкции палео- окружающей среды

Важными индикаторами палеоклимата и характера растительности в позднем плейстоцене являются не только ископаемые остатки растений, но и многочисленные крупные млекопитающие Мамонтовой фауны. Вместе с шерстистым мамонтом (*Mammuthus primigenius*), давшим название этому сообществу, к этой фауне относятся также крупные копытные: лошадь (*Equus caballus*), шерстистый носорог (*Coelodonta antiquitatis*), северный олень (*Rangifer tarandus*), антилопа (*Saiga tatarica*), степной бизон (*Bison priscus*), овцебык (*Ovibos moschatus*). Они все являются травоядными животными, которые имеют значительные потребности в питании. Наши находки также показывают, что в это же время здесь обитали хищники, такие как пещерный лев (*Panthera spelaea*), волк (*Canis lupus*) и другие хищники поменьше. Это позволяет предполагать, что существовало достаточное количество животных, на которых можно было охотиться. Несомненно, такое сообщество животных свидетельствует о теплом летнем климате и сухих

Рисунок 1. Радиоуглеродное датирование ископаемых остатков основных представителей мамонтовой фауны, собранное во время совместной германо-русской экспедиции в 1998 году на Быковском полуострове. Стрелки вниз указывают минимальный возраст.



тундровых ландшафтах. В настоящее время такое сообщество животных не существует, что является доказательством значительных изменений в характере окружающей среды. Сегодня здесь живет сообщество млекопитающих с более бедным видовым составом, в котором доминируют животные средних и мелких размеров – олени, волки, зайцы, лемминги и песцы. Из крупных животных только белый медведь иногда появляется на островах с пакового льда.

Об удивительном богатстве ранее существовавшей здесь фауны говорят многочисленные находки костей, бивней, а иногда и остатки мяса и шкур в мерзлоте. При таянии мерзлоты по берегам моря и рек они постепенно освобождаются. Еще полярные исследователи XIX – начала XX веков писали о таких удивительных находках в этих регионах. Люди, конечно, обратили особое внимание на бивни мамонтов, которые и до сих пор являются ценной добычей искателей на суровом севере. Наш интерес, однако, был сосредоточен на поиске костей. Лишь во время нашей экспедиции в 2002 г. на Новосибирские острова удалось собрать несколько сотен ископаемых остатков – начиная с ребра лошади до лопатки мамонта, все они определялись и каталогизировались нашим палеонтологом Татьяной В. Кузнецовой – специалистом по мамонтовой фауне.

Рисунок 2. Татьяна Кузнецова очищает первую коллекцию костей млекопитающих (Быковский п-ов, 1998).



На п-ве Быковском в географических обозначениях часто встречается название Мамонт. Это связано с многочисленными находками мамонтовых костей, которые здесь сохранились в многолетнемерзлых толщах. Еще в 1799 году местный охотник нашел здесь полный скелет мамонта, который в 1806 году был собран биологом Михаилом Адамсом, исследован и передан в Зоологический музей в Санкт-Петербурге, где он до сих пор является одним из главных экспонатов выставки.

Рисунок 3. Игорь Сыромятников с мамонтовой бедренной костью (Быковский п-ов, 1998).



В 1998 году во время нашей первой экспедиции на п-ов Быковский нам удалось собрать богатую коллекцию костей. Были найдены кости двух типов мамонта, многочисленные кости лошади, северного оленя, бизона, овцебыка, пещерного льва, зайца и грызунов. Все находки перевезти в Москву для дальнейшего исследования было, конечно, невозможно. Поэтому, каждая экспедиция заканчивалась работами по отбору проб. Чтобы определить возраст животных, которые когда-то шагали по тундростепи, надо было отобрать от каждой крупной кости конечностей и бивней большой кусок. Виктор В. Куницкий показал нам, как для этой цели искусно можно пользоваться бензопилой. Одевались защитные очки, рабочие перчатки и - как на линии сборки, клались кости на колоду и разрезались по отмеченной линии. Все участники экспедиции стояли обычно вокруг и участвовали в этой палеонтологической церемонии.

Самой северной точкой нашей экспедиции на Новосибирские острова в 2002 году стал мыс Анисий - северная оконечность о-ва Котельный. И здесь были сделаны интересные находки. Вблизи одного байджараха огромная бедренная кость мамонта торчала почти вертикально из земли. Ее нижняя часть находилась еще в мерзлом грунте, а на верхней мы нашли следы от зубов голодных песцов. Вокруг было найдено еще несколько мамонтовых костей. Эти находки доказывают, что в ледниковье стада мамонтов, лошадей, северных оленей и овцебыков достигали 76° северной широты и находили здесь корм.

Через несколько дней мы работали на побережье - на Ойгоском Яру у устья реки Кондратьева. За несколько лет до нас здесь работали русские ученые, которые сообщили нам о прекрасных обнажениях мерзлых толщ. Якутское название «Ойгос Яр» переводится как «крутой берег, на котором съели жеребенка», что, по-видимому, напоминает об историческом пикнике. Крутой обрыв тянется здесь на многие километры вдоль пролива Дмитрия Лаптева. В некоторых местах обрыв достигает 40 метров высоты и выглядит так, будто он состоит из чистого подземного льда. Здесь можно понять, почему некоторые полярные исследователи еще в девятнадцатом веке считали эти льды погребенными ледниками. Однако позже было доказано, что это не остатки ледников, а огромные ледяные жилы. Достигающие нескольких десятков метров в высоту и до 6 метров в ширину, они выдавливали во время своего роста окружающую породу так, что мы находили лишь отдельные блоки мерзлого грунта среди оттаивающих ледяных жил. Местами из мерзлой стены торчит кость крупного животного. Прямо перед стеной всегда образуется непролазная грязь. Но именно здесь нас ждет наибольшее число ископаемых костей. У Татьяны было много дел и ей требовалось много рук в помощь, чтобы 369 находок - от небольшого зуба лошади до лопатки мамонта - перенести к причалу.



Во время наших полевых работ с 1998 по 2007 годы было собрано более четырех тысяч ископаемых остатков представителей Мамонтовой фауны позднего плейстоцена. Для многих костных остатков удалось получить данные по абсолютному возрасту, что позволило реконструировать историческое развитие фауны в регионе моря Лаптевых (Рисунок 1). Результаты вошли во многие публикации.

*Лутц Ширрмайстер, Татьяна В. Кузнецова, Андрей А. Андреев, Франк Кинаст, Дмитрий Ю. Большаянов*

Рисунок 4. Татьяна Кузнецова с ископаемым бивнем мамонта (Ойгоский Яр, 2007).

Станция «О. Самойловский», слева показано главное здание, а справа - новая пристройка. Летом для участников экспедиции ставили палатки (фото Г. Штооф).





3.

Изучение процессов динамики  
вечной мерзлоты  
2002-2006 гг.



## Бурение подводной вечной мерзлоты в ходе экспедиции «COAST 2005»

Мерзлые породы, залегающие в пределах шельфа арктических морей от береговой линии до глубины в 100 метров, считаются реликтовыми, сформировавшимися на суше во время регрессии моря во время последнего ледникового максимума.

Известно, что эта подводная вечная мерзлота содержит скопления газогидратов - кристаллических соединений, образующихся в океанических глубинах из воды и газа при низких температурах и высоком давлении. В толще подводной мерзлоты или под ней содержатся большие объемы метана в форме газогидратов. Стабильность этой газогидратной зоны основана на существовании вечной мерзлоты. Деградация вечной мерзлоты и связанная с этим дестабилизация газогидратов могут значительно увеличить выброс парникового газа метана в атмосферу.

В апреле 2005 г. в западной части моря Лаптевых проводилось научное бурение в береговой и прибрежной зонах в рамках программы «COAST». Основными целями программы было исследование подводной мерзлоты в ее переходе из прибрежной в морскую, и воздействие соленой морской воды на эволюцию подводной вечной мерзлоты в процессе её протаивания. Прибрежные районы служат естественной лабораторией для этой цели, так как в процессе разрушения побережья под влиянием береговых процессов размыва вечная мерзлота постоянно превращается в подводную, морскую. На время её протаивания влияет удаленность от современной береговой линии. Оно может быть определено с расчетом известной скорости размыва побережья.

На Рисунке 1 показан полевой лагерь исследователей на морском льду. Две мобильные жилые системы, контейнеры с лабораториями и буровую уста-

Рисунок 1: Полевой лагерь исследователей на морском льду в западной части моря Лаптевых в ходе экспедиции «COAST 2005».





новку перевозили на санях по морскому льду из п. Тикси с помощью двух гусеничных вездеходов-тягачей. Экспедиционная команда была доставлена вертолетом. Этот район моря Лаптевых мало подвержен воздействию теплой и менее соленой речной воды, поэтому он был избран в качестве места проведения исследовательских работ, несмотря на его удаленность и труднодоступность и в силу этого сложное и дорогостоящее материально-техническое снабжение экспедиции.

Материковое побережье в данном районе было уже тщательно изучено. Было известно, что многолетнемерзлые породы Сибирского ледового комплекса характеризовались высокой льдистостью. Научные модели предсказывали наличие слоя сплошной вечной мерзлоты мощностью до 400-600 метров и в прибрежной зоне.

Было проведено бурение 5 скважин и отобраны керны на 12-километровом перпендикулярном к береговой линии разрезе с глубинами моря от 0 до 6 метров. Применялась техника сухого бурения. Обсадная труба в скважине предотвращала проникновение морской воды в керны. Полевые исследования включали геокриологическое описание кернов, определение внутрипоровой воды, солености льда и температур в скважинах бурения. На Рисунке 2 показан образец бурового керна из льдонасыщенных отложений подводной вечной мерзлоты, на Рисунке 3 - буровые работы, на Рисунке 4 - отжимный пресс для отделения внутрипоровой воды ото льда. В ходе последующих лабораторных исследований анализировались концентрация изотопов кислорода и водорода во внутрипоровой воде. Разрезанные в

Рисунок 2: Образец бурового керна из льдонасыщенной подводной многолетнемерзлой породы.



в мерзлом состоянии керны изучались методами: литологическим, геохимическим, диатомовым. Произведено определение возраста осадков методами радиоуглеродным и инфракрасной оптически стимулированной люминесценции.

В 2005 году подводная вечная мерзлота была еще недостаточно изучена, в основном из-за отсутствия материалов наблюдений непосредственно на месте ее залегания. Результаты экспедиции «COAST» дали важные импульсы в понимании феномена подводной вечной мерзлоты, обнаружив и некоторые неизвестные ранее и неожиданные аспекты. Все прибрежные керны содержали мерзлые отложения, причем глубина нахождения мерзлых отложений возрастала по мере удаления от берега.

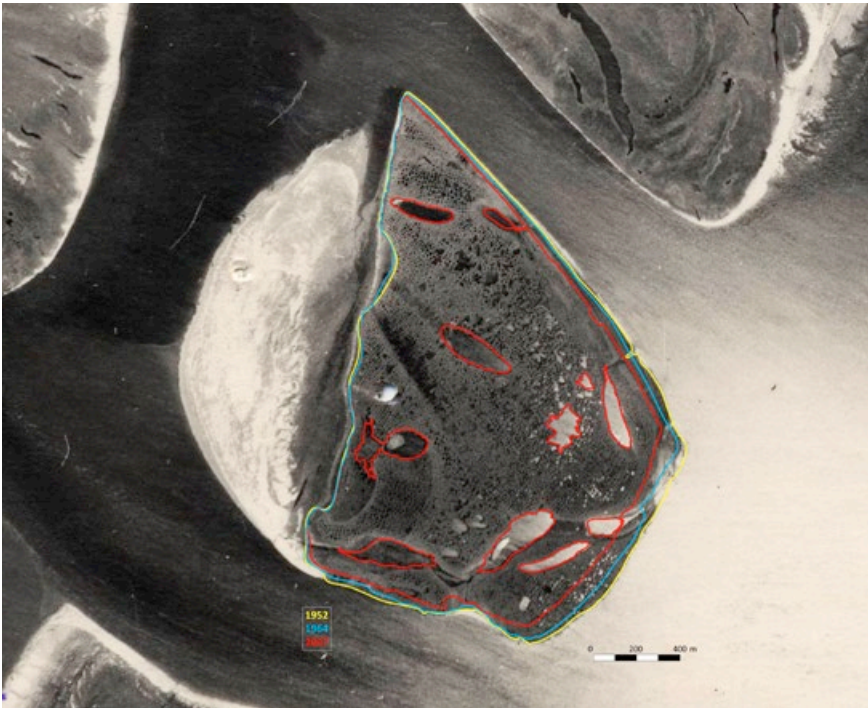
Исследования типичной криотекстуры и изотопного состава внутриводной воды мерзлых отложений подтвердили гипотезу возникновения последних в результате затопления и протаивания Сибирского ледового комплекса. Используя последние данные скорости размыва побережья, можно прийти к выводу, что в результате протаивания и разрушения ледового комплекса пород в течение последних 2500 лет верхняя граница мерзлоты углубилась до 35 метров под уровень моря на расстоянии до 12 км от современного берега. Неожиданным результатом явился факт обнаружения практически незамерзших и полностью свободных ото льда отложений в наиболее удаленной от берега буровой скважине на глубине 64,7 метра ниже уровня моря. Это полностью противоречило рассчитанным ранее моделям, предсказывавшим наличие сплошного слоя подводной вечной мерзлоты мощностью в 400-600 метров в этом районе.

В целом, результаты экспедиции показали, что подводная вечная мерзлота может иметь более высокие температуры и меньшие ареалы распространения, чем предполагалось ранее, особенно в районе шельфа моря Лаптевых, большая часть которого была затоплена более чем 6000 лет назад.

*Фолькер Рахольд, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большиянов, Вальдемар Шнайдер*

Рисунок 3: Работа на буровой установке.

Рисунок 4: Отбор проб внутриводной воды (льда) в полевых условиях.



## Старая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский» и ее расширение в 2005 году

В 1998 году первая из нынешних 20 экспедиций отправилась в дельту реки Лены, одну из крупнейших дельт (32000 км<sup>2</sup>) в полярном регионе. В этой экспедиции под названием «Экспедиция ЛЕНА 1998» приняли участие около 30 российских и немецких ученых, студентов и техников из разных исследовательских областей. НИС «О. Самойловский» стала логистической базой для начала долгосрочных исследований образования и таяния вечной мерзлоты, продуцирования и выброса парниковых газов (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), а также тепловых и гидрологических условий в активном слое почвы.

Остров Самойловский (72° 22'N, 126° 28'E) является типичным для активной и самой молодой части (8 000-9 000 лет) дельты реки Лены. Его площадь составляет около 1200 га, а высота над уровнем моря - от 2 до 14 м (Рисунок 1). Западное побережье острова характеризуется современными процессами накопления флювиальных и эоловых отложений. Можно выделить три поймы с различной частотой затопления и составом растительности.

Рисунок 1: Остров Самойловский и земля, потерянная в результате береговой эрозии в 1952, 1964 и 2007 годах (Г. Штофф).



В структуре аккумулярованных отложений преобладает мелкий и средний песок. На восточном побережье острова Самойловский, напротив, преобладают эрозионные процессы, которые образуют абразионный берег. Эта его часть состоит из отложений периода среднего голоцена, занимающих около 70% общей площади острова.

Старая небольшая НИС «О. Самойловский» в Усть-Ленском заповеднике (УЛЗ) стала идеальным местом для прибрежных и наземных полярных исследований. До станции можно добраться из Тикси (где есть аэропорт, из которого отправляются рейсы на Москву, Санкт-Петербург и Якутск) на вертолете, примерно за 45 минут, или на корабле, примерно за 12 часов.

Сама станция состояла из большого основного деревянного дома на сваях, укрепленных в вечной мерзлоте, наружные стены которого были покрыты штукатуркой. К ней также относились здания прачечной, сауны, трех складов и большого ледяного хранилища, устроенного в мерзлой земле (ледника) (Рисунок 2). Этот архитектурный ансамбль органично вписывается в ландшафт полигональной тундры дельты реки Лены.

Общая площадь станции составляет около 190 м<sup>2</sup>, из которых 120 м<sup>2</sup> могут быть использованы для экспедиционных работ.

Рисунок 2: Научно-исследовательская станция «О. Самойловский»: Главное здание и складские помещения, вид с юго-запада (фотография с вертолета, 2001 г.).



Ее западная часть используется руководителем Усть-Ленского заповедника (УЛЗ). Имеющиеся комнаты включают кухню (10,7 м<sup>2</sup>), спальню и две лаборатории для научной работы. Дизельный генератор 6 кВт (Honda ECT 6D) служит источником энергии для совокупного оборудования станции и научных приборов (ГХ, компьютеров и т. д.).

В первые три года работы питьевую воду приходилось привозить на станцию цистерной, однако, сейчас вода подается насосной системой. Баня расположена в 300 м от станции на берегу озера. Туалетная кабинка находится на расстоянии около 50 м от станции.

Универсальная лаборатория имеет площадь около 15 м<sup>2</sup> и оборудована двумя рабочими местами общей длиной 6,5 м. Вторая лаборатория занимает около 12 м<sup>2</sup> и оснащена газовым хроматографом (Chrompack CP-9003, ПИД, ДТП) и генератором водорода (Dornick Hunter UHP-20H) для анализа незначительных газовых примесей (Рисунок 3).

В 2005 году к существующему зданию была добавлена пристройка, располагающаяся по отношению к нему под углом 90° (Рисунок 4), и соединенная с ним тамбуром (см. стр. 66-67). Новая пристройка добавила к зданию еще 68 м<sup>2</sup> пространства, которое было отведено под три спальни и одну большую общую комнату. Особенное внимание было уделено утеплению пристройки, чтобы сделать возможным проведение исследовательской деятельности в дельте реки Лены в зимний период. Зимой на обновленной станции могут работать восемь ученых, а летом - до шестнадцати исследователей, поскольку возможна установка палаток.

Участки для долгосрочных экспериментов, в том числе автоматические метеорологические станции наблюдения за климатическими и почвенными ус-

Рисунок 3: Лаборатория для анализа незначительных газовых примесей (например, оснащенная газовым хроматографом и генератором водорода) и подготовки образцов для микробиологического и почвенного анализа (фото Д. Вагнер).

Рисунок 4: Строительство новой германо-российской НИС «О. Самойловский», организованное АВИ и Усть-Ленским заповедником. На заднем плане: старая станция «О. Самойловский» (фото Г. Штооф).



ловиями, находятся в двух минутах ходьбы от главной станции. Эти участки служат источником надежных температурных данных о климате и почве с 1998 года. Несколько лет спустя к измерениям добавилось и полуавтоматическое отслеживание уровня незначительных газовых примесей.

В 2002 году долгосрочные исследования динамики углерода были дополнены микрометеорологической системой измерения ковариации вихревых пульсаций, разработанной для непрерывного отслеживания турбулентных потоков углекислого газа и метана, а также тепловой, импульсной и водной динамики в пограничном слое атмосферы. Впервые эта комплексная система измерения была использована во время экспедиций «ЛЕНА 2002» в дельту реки Лены в северной Сибири. Измерения потоков проводились

Рисунок 5: Потеря земли в районе станции на острове Самойловский из-за эрозии прибрежной зоны в период с 2003 по 2016 год. Также видна старая станция и южная часть новой (Г. Штофф).

параллельно с мониторингом стандартных метеорологических данных и физических свойств почвы в течение вегетационного периода. Полученные наборы данных позволили связать энергетический и водный баланс мерзлотных ландшафтов с процессами углеродного обмена между многолетнемерзлыми почвами, тундровой растительностью и атмосферой. Такие исследования были необходимы для тестирования и совершенствования моделей процессов, с помощью которых оценивалось воздействие экологических и климатических изменений на арктические экосистемы.

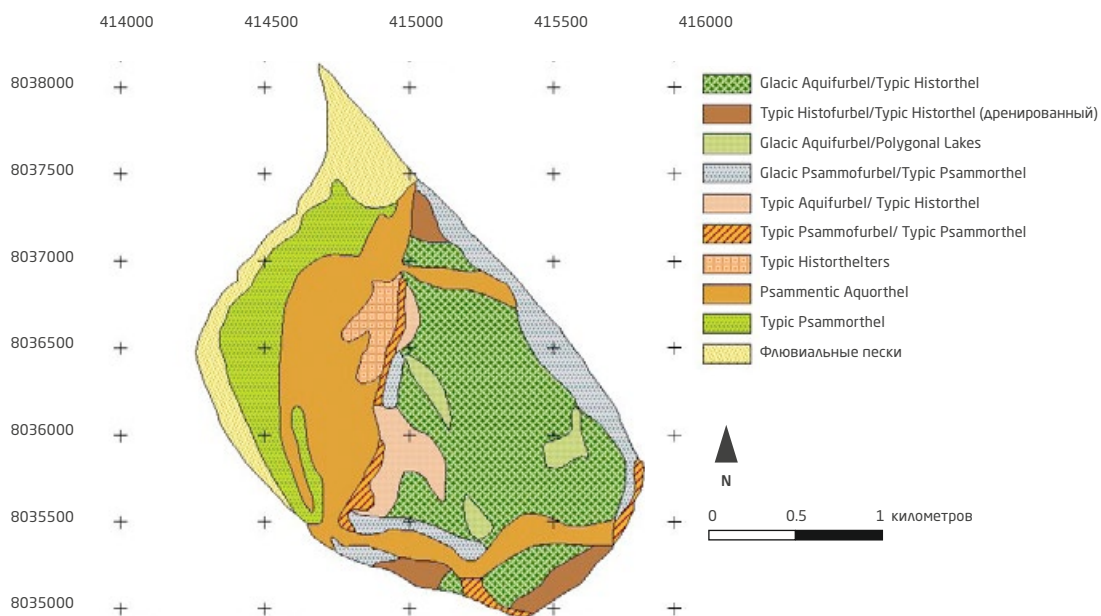
Более того, широкий спектр исследований был проведен на острове Самойловский и в его окрестностях, куда можно попасть с использованием резиновых лодок или небольших речных судов. В течение последних 20 лет участники российско-германских экспедиций использовали НИС «Остров Самойловский» для гидробиологических исследований в дельте реки Лены, изучения современного криогенеза, наблюдений за водно-энергетическим балансом тундры в рамках нескольких пространственных и временных шкал, геоморфологических исследований в дельте, а также исследований позднего четвертичного периода.

Из-за эрозии береговой линии острова Самойловский под воздействием течения реки Лены (см. Рисунок 6), особенно во время разрушения ледяного покрова, старая станция оказалась лишь на 10 м удалена от обрыва, что стало угрожать ее стабильности и сроку службы. В результате этого Институт полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера (АВИ) совместно с Усть-Ленским заповедником решили построить новую станцию на более высоком месте.

Летом 2010 года обе стороны подписали соглашение и строительные материалы были доставлены на остров. Строительство новой станции началось с укрепления свай в мерзлой земле и продолжилось вплоть до лета 2011 года. Однако в том же году оно было прервано и возобновлено позднее, уже по инициативе Президента Российской Федерации Владимира Путина (см. Рисунок 5).

С открытием новой НИС «О. Самойловский» и началом первых экспедиционных работ весной 2013 года старая станция на острове Самойловский стала использоваться на равных правах российской и германской стороной. С тех пор она используется руководителем Усть-Ленского заповедника, а также как дополнительное сооружение.

*Ханс-Вольфганг Хуббертен, Юлия Бойке, Ева-Мария Пфайффер, Гюнтер Штоф, Александр Ю. Гуков*



Почвенная карта о. Самойловский  
 проекции: поперечная проекция Меркатора (Пулково - 1942 г., зона 22), эллипсоид Красовского

## Установка наблюдений на острове Самойловский - Многолетнемерзлые почвы и парниковые газы (исследования 2002-2006 гг.)

Быстрые изменения полярных ландшафтов Северо-Восточной Сибири с ее чувствительными многолетнемерзлыми почвами, уникальными экосистемами тундры и льдонасыщенными грунтами побудили российских и немецких исследователей вечной мерзлоты к решительным действиям. Ученые установили на острове Самойловский современные измерительные приборы для изучения всех основных компонентов углеродного цикла и в особенности - баланса парниковых газов.

### Успехи в изучении многолетнемерзлых почв

Новая автоматическая метеорологическая станция с функцией измерения параметров почвы была установлена на острове Самойловский в августе 2002 года для преодоления некоторых технических проблем, возникавших

Рисунок 1: Распространение многолетнемерзлых почв (гелисолей) на острове Самойловский. Карта основана на данных исследования почвы в ходе экспедиции «ЛЕНА 2001» (согласно Pfeiffer et al., 2002).





на первой станции, установленной в 1998 году. Основываясь на подробных сведениях (полученных в ходе экспедиций 1998-2001 гг.) о морфологии, свойствах и распространении почв (см. Рисунок 1), ученые нашли участок для новой метеостанции, а почвоведы и техники экспедиционной группы объединили усилия для инсталляции новой станции (см. Рисунок 2). Благодаря датчикам станции стало возможно измерить изменчивость таких параметров, как температура и влажность воздуха, скорость ветра, солнечная радиация, осадки, высота снежного покрова, температура почвы, объемное содержание воды в почве и тепловые почвенные потоки.

Программа мониторинга глубины оттаивания была начата в 2002 году в непосредственной близости от новой станции (см. Рисунок 3). В пределах области площадью 28 м x 18 м лазерным тахеометром была размечена и зафиксирована сетка из 150 точек измерения с интервалами 2 м x 2 м. Сезонная динамика глубин оттаивания регулярно измерялась в этих 150 точках во время всех экспедиций с 2002 года по настоящее время.

Рисунок 2: Установка новой метеорологической станции с функцией измерения параметров почвы: использование ледяного бура для отбора кернов для установки датчиков в полигонально-жильный лед.



Вместе с микрометеорологическими замерах потоков между землей и атмосферой, автоматическая метеорологическая станция с функцией измерения параметров почвы (см. ниже) позволяет анализировать связь водно-энергетического баланса мерзлотных ландшафтов с углеродным обменом (например,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) между гелисолями, растительностью тундры и приземным пограничным слоем атмосферы. Почвенные данные важны для оценки вероятности того, превратилась ли полигональная тундра сибирских низменностей, где преобладает вечная мерзлота, из поглотителя в источник углерода. Для правильности этой оценки необходима дальнейшая техническая поддержка метеостанции длительного срока использования на острове Самойловский. Это позволит более широко исследовать изменения углеродного баланса и пространственные колебания объемов выбросов незначительных газовых примесей. Накапливаемые станцией данные необходимы для измерения степени воздействия на Сибирскую Арктику продолжающегося в настоящий момент потепления и выбора разумного курса развития нашего общества в меняющемся мире.

Рисунок 3: Измерение глубин оттаивания с помощью щупа для определения глубины промерзания грунтов и наличия вечной мерзлоты (стальной стержень) в сентябре 2003 года (фото У. Циммерманн).

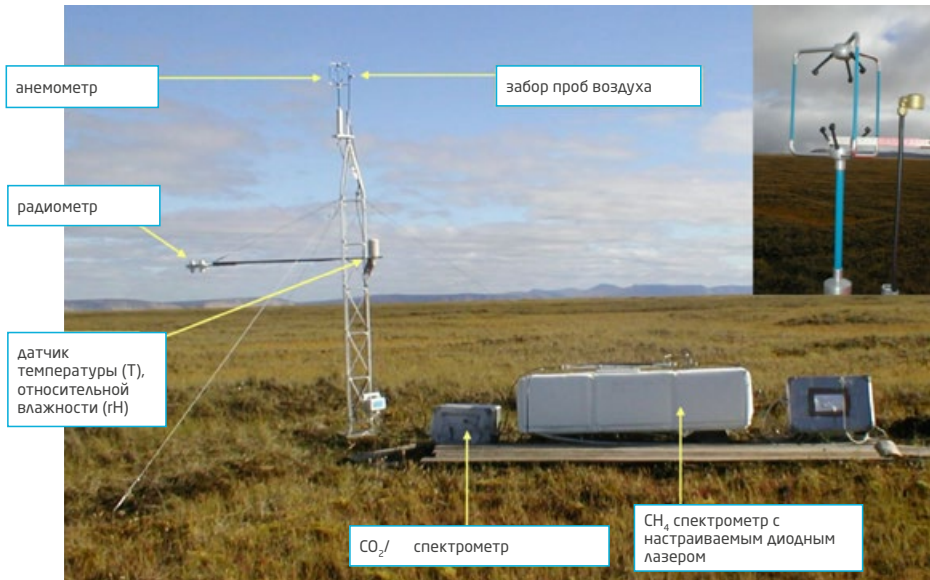


Рисунок 4: Команда, проводившая измерения методом ковариации вихревых пульсаций на острове Самойловский в июне 2002 года в суровых погодных условиях. Тем не менее, члены команды рады, что чувствительное оборудование и топливо для генератора достигли острова.

Рисунок 5: Измерительная система, использующая метод ковариации вихревых пульсаций, включала трехосный звуковой анемометр (на вершине метеорологической мачты, более подробно см. на приближении), инфракрасный датчик-анализатор  $\text{CO}_2 / \text{H}_2\text{O}$ , анализатор  $\text{CH}_4$  на основе настраиваемого лазера для ИК-спектроскопии и источник питания.

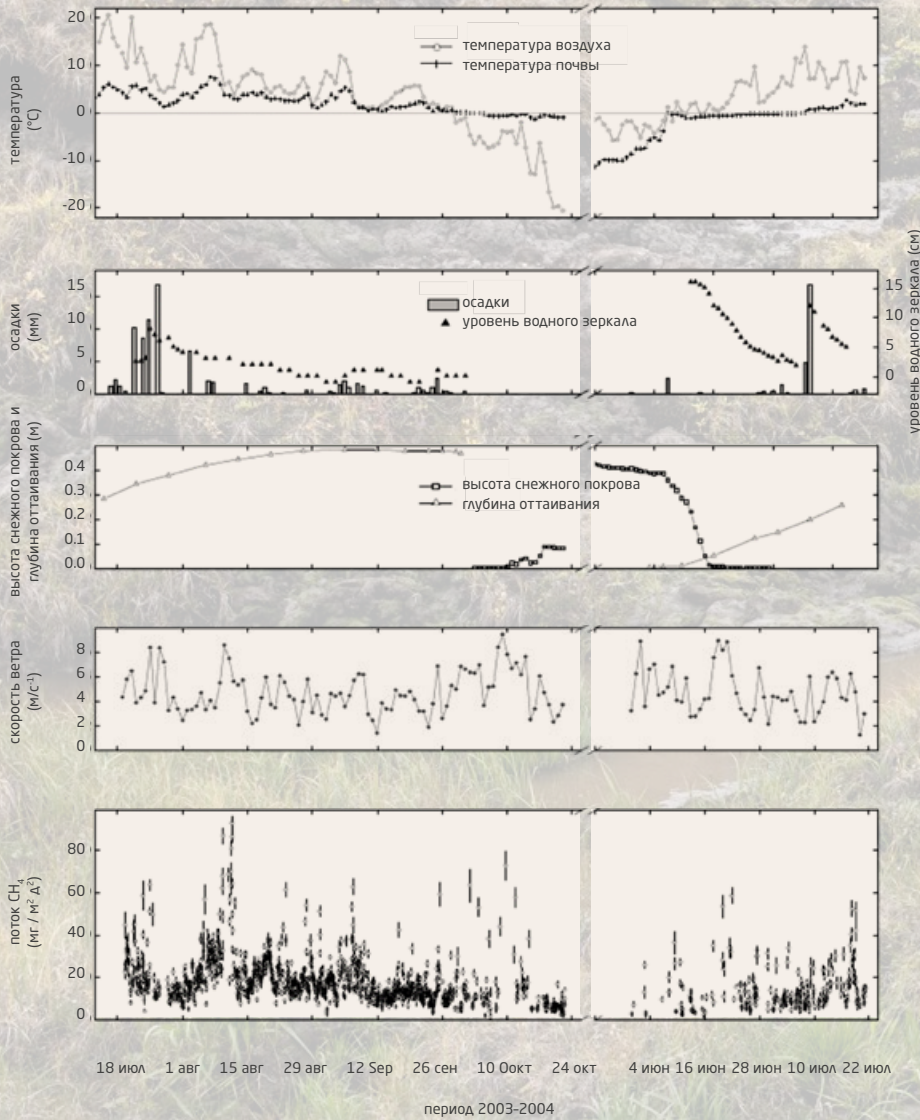


Рисунок 6: Данные, собранные системой, использующей метод ковариации вихревых пульсаций, включая объемы выбросов CH<sub>4</sub> за июль-октябрь 2003 года и июнь-июль 2004 года (Wille et al., 2008). (Фоновая фотография сделана П. Верзоне.)

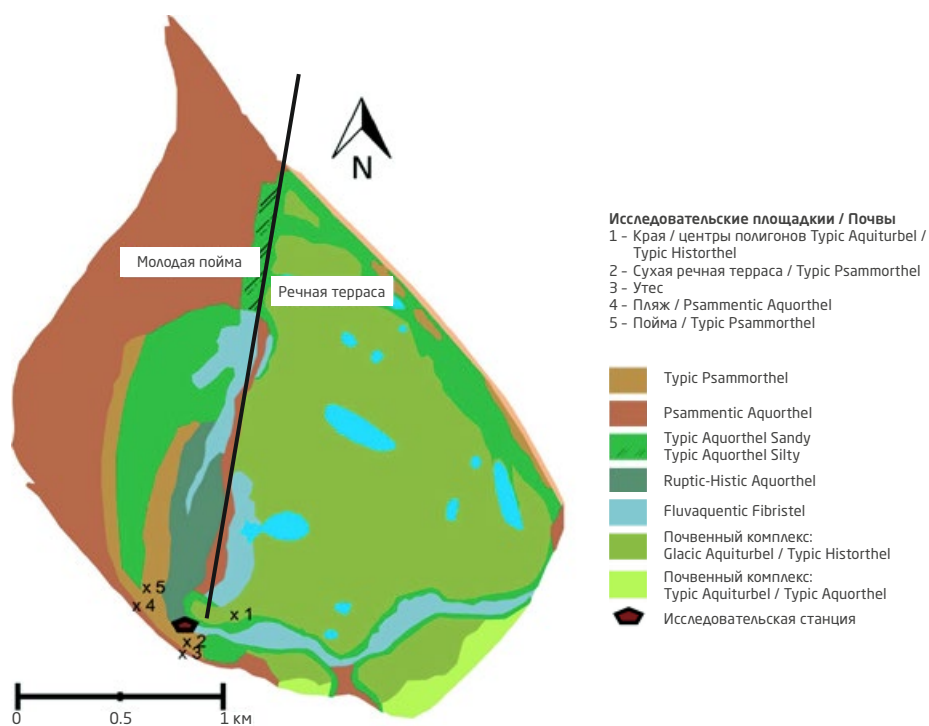
### **Метод ковариации вихревых пульсаций для исследований выбросов парниковых газов на острове Самойловский**

Исследования микробных процессов и простые измерения закрытой камерой за период 1998 - 2001 гг. дали интересные первичные сведения о сложном углеродном цикле полигональных тундр. Однако, в 2002 году, для лучшей количественной оценки временной изменчивости баланса  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , исследования парниковых газов были выведены на новый уровень путем создания на территории острова Самойловский микрометеорологической системы измерения турбулентных потоков методом ковариации вихревых пульсаций (см. Рисунок 4). Метод ковариации вихревых пульсаций позволяет измерять потоки газов с высоким временным разрешением, использовать эти измерения в масштабе ландшафтов и не затрагивать почвенно-растительный покров изучаемых экосистем. Основные компоненты системы, использующей метод ковариации вихревых пульсаций, показаны на Рисунке 5. Данная система первого поколения была установлена в июне 2002 года в центре полигональной тундры на первой речной террасе острова Самойловский.

После решения требовавших терпения и времени технических проблем, происходивших с оборудованием, начиная с генератора и заканчивая настраиваемым диодным лазером, экспедиционная группа, наконец, смогла установить на острове Самойловский оборудование для измерений методом ковариации вихревых пульсаций, чтобы работа с ним успешно продолжалась во время многих последующих экспедиций. Эта современная измерительная система позволила получить данные долгосрочных измерений потоков, что сделало возможной первоначальную оценку способности полигональной тундры дельты реки Лены поглощать и выделять  $\text{CO}_2$  и метан (см. Рисунок 6). Расширение этого уникального набора данных о потоках углерода в России имеет важное значение для международной науки о системе Земля (см. стр. 177-179).

Следующие выводы из анализа потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  являются наиболее важными: (1.) Полигональная тундра Северной Сибири большую часть времени по-прежнему является активным поглотителем углерода и углекислого газа. (2.) Тем не менее, жара может настолько уменьшить поглощение  $\text{CO}_2$  в летний период, что тундра становится годовым источником углерода. (3.) Потоки  $\text{CH}_4$  сравнительно малы и не влияют на углеродный баланс, однако, они достаточно велики, чтобы компенсировать охлаждающее воздействие радиационного форсинга на климат из-за годового поглощения  $\text{CO}_2$ , даже в годы, температурные условия которых были нормальными.

*Ларс Кутцбах, Кристиан Вилле, Торстен Закс, Давид Холл, Гюнтер Штооф, Юлия Бойке, Михаил Н. Григорьев, Ева-Мария Пфайффер*

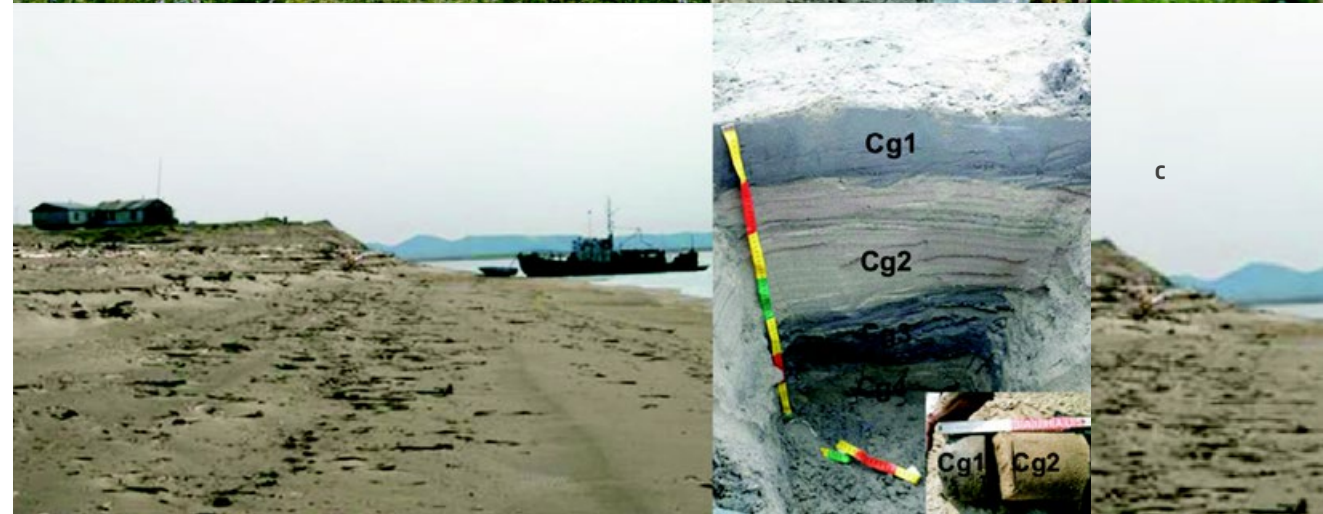
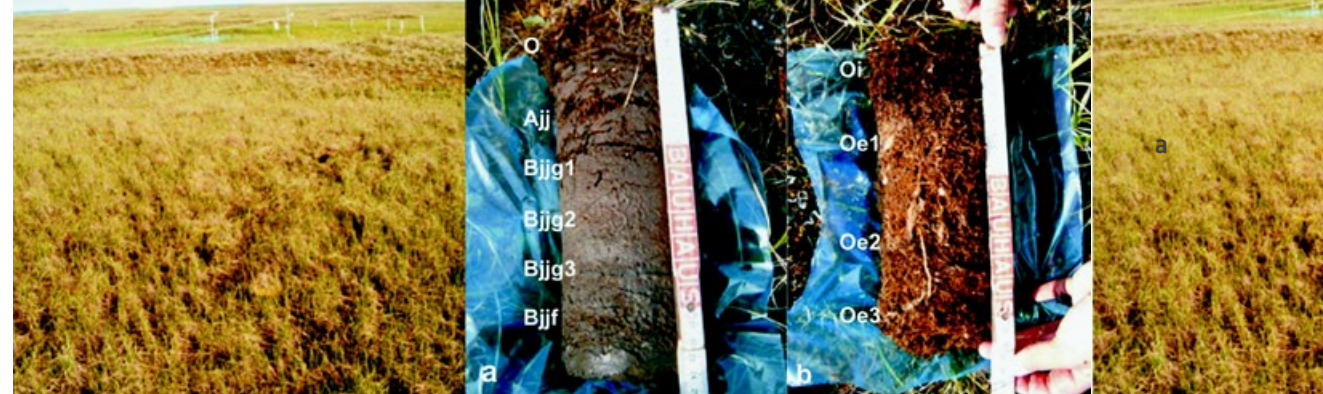


## Микробная трансформация азота в активном слое почвы и более глубоких мерзлотных отложениях в дельте реки Лены

Полевые исследования на острове Самойловский в 2004 и 2005 годах показали, что азотный цикл в многолетнемерзлых почвах зависит главным образом от влажности и структуры почвы. Таким образом, разница в размерах конверсии азота существует в небольших пространственных масштабах. Аммоний накапливался в почве в центре полигонов в анаэробных и влажных условиях, где отмечалось содержание метана, тогда как нитриты и нитраты были представлены в низких концентрациях. Эти данные коррели-

Рисунок 1: Карта почв острова Самойловский, на которой отмечено местонахождение исследованных областей (Sanders et al., 2010). Черная линия показывает границу разделения почв острова на менее бедные азотом (типы *Typic Psammorthel*, *Psammentic Aquorthel*, *Typic Aquorthel Sandy* и *Silty*) в молодой пойме и на сухой речной террасе в западной части острова, и более бедные азотом почвы полигональной тундры, особенно тип *Typic Historthel*, на влажной речной террасе в восточной части острова.

Рисунок 2: Участок и почвенный профиль почв речной террасы (а: Участок 1, б: Участок 2 на Рисунке 1) и молодой поймы (с: Участок 4, д: Участок 5 на Рисунке 1) (Sanders et al., 2010). а: *Typic Aquorthel* на краю полигона и *Typic Historthel* в центре полигона, б: *Typic Psammorthel* возле старой станции, с: *Psammentic Aquorthel* на пляже, д: *Typic Psammorthel* в пойме.



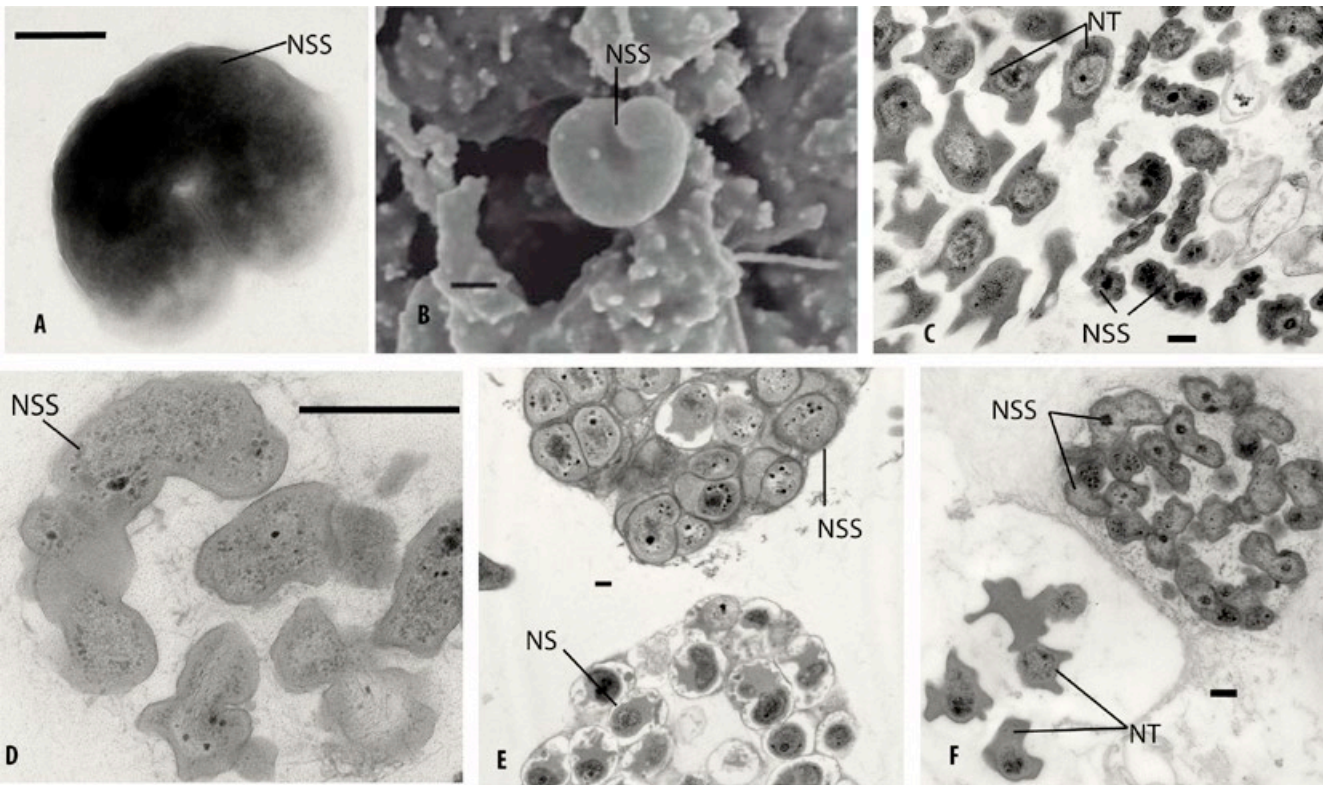
руют с низким числом клеток и низкой активностью микробных сообществ, окисляющих аммиак. Напротив, в аэробных, более сухих условиях краев полигона высокий уровень содержания нитратов и низкая концентрация подавляющего активность метана коррелируют с большим количеством клеток и высокой активностью бактерий, окисляющих аммиак.

Исследования цикла азота во время летней экспедиции в 2008 году включали не только полигональную тундру, но и почвы менее влажных речных террас, клифов и молодых пойм. Концентрация растворенного азота зависит от количества органических веществ, температуры воздуха и почвы, и растительного покрова. Аммоний был обнаружен только в богатых органическими веществами почвах в начале вегетационного периода (до  $10 \text{ мкг/г}^{-1}$  сухого вещества (dw)). Обеспеченность почвы нитритами прослеживалась только в относительно холодные дни с температурой ниже  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  (до  $2,3 \text{ мкг/г}^{-1}$  сухого вещества). В конце вегетационного периода обеспеченность нитратами наблюдалась только в почвах, где не было растительности (до  $90 \text{ мкг/г}^{-1}$  сухого вещества). Показатели нитрификационной способности сухих песчаных почв поймы и менее влажной речной террасы были относительно высокими. В полигональной тундре нитрификационная способность обнаруживалась только в минеральном горизонте краев полигонов.

Таким образом, результаты исследований показали, что многолетнемерзлые почвы в целом не отличаются нехваткой азота, недостатком неорганического азота или микроорганизмов, участвующих в круговороте азота. Однако существуют вариации величин нехватки азота в почве в небольших пространственных масштабах. В целом почвы молодой поймы и края полигонов на речной террасе не были так бедны азотом, как почвы в центре полигонов (Рисунки 1, 2). Почвы, не отличающиеся нехваткой азота, характеризуются меньшей влажностью, меньшим соотношением C / N, более высоким значением pH. В этих почвах активно идут процессы нитрификации и минерализации азота. Соответственно, в течение вегетационного периода происходит уменьшение содержания аммония и накопление нитратов, особенно в почвах без растительного покрова (Рисунок 2с). Кроме того, было показано, что почвы, рельеф и микротопография играют решающую роль в контроле состава микробного сообщества бактерий, окисляющих аммиак в круговороте азота. В данном сообществе преобладали бактерии рода *Nitrosospira*, а не археи (Рисунок 3).

На основании результатов изучения круговорота азота и понимания того, что происходит широкомасштабная деградация вечной мерзлоты, были проведены дополнительные исследования выбросов неорганического азота на других участках в арктической зоне Восточной Сибири в 2012 году. Результаты моделирования для полигонального гребня на острове Самойловский показали наибольшее увеличение толщины активного слоя по сравнению с восточными сторонами Индигирской низменности и дельты реки Колымы до 2100 года. На острове Самойловский, по сравнению с





другими участками, общее содержание углерода, азота и аммония в вечной мерзлоте было выше, чем в активном слое, но это не распространялось на нитраты. Накопление растворенного неорганического азота (DIN) в вечной мерзлоте может привести к его значительному высвобождению на краях полигонов ( $22 \pm 4$  мг N год<sup>-1</sup> м<sup>-2</sup> и  $(8 \pm 3)$  N мг год<sup>-1</sup> м<sup>-2</sup> в центре полигонов, но этот поток достаточно невелик по сравнению с общим азотным балансом экосистемы.

Клавдия Финке, Тина Сандерс, Фабиан Берманн, Елена Е. Лебедева, Ева-Мария Пфайффер

Рисунок 3: Изображение культур обогащающих почву бактерий, окисляющих аммоний и нитриты, из почв на острове Самойловский, сделанное электронным микроскопом.

1. А: Изображения результатов негативного контрастирования, В: изображения, полученные при помощи электронной сканирующей микроскопии (СЭМ), С: изображения, полученные просвечивающим электронным микроскопом (ПЭМ) с *Nitrosospora*-подобными и *Nitrotoga*-подобными клетками. Бары = 0,2 мкм, NSS: *Nitrosospora*, NT: *Nitrotoga* (фото Т. Сандерс).



## Геокриологические и палеоклиматические исследования в береговой зоне моря Лаптевых (Новосибирские острова)

Во время экспедиции «ЛЕНА 2002» гидрографическое судно «Павел Башмаков» доставило в восточную Арктику объединенную группу российских и германских исследователей. В период с 14-го августа по 9-е сентября 2002 года они проводили свои полевые наблюдения на двенадцати участках, расположенных по берегам Новосибирских островов и в береговой зоне Яно-Индибирской низменности. Главной целью этой группы было получить данные об истории развития природной среды в районе Новосибирского архипелага и попутно исследовать здесь динамику морских берегов.

Участники российско-германской группы изучали естественные обрывы вечной мерзлоты. Они документировали криогенные особенности их строения. Отбирали образцы мерзлых пород и пробы ископаемого льда для лабораторных исследований. Проводили сбор извлеченных из вечной мерзлоты

Рисунок 1: Высадка на остров Новая Сибирь.



и вытаявших из неё костных остатков крупных и мелких млекопитающих. Находки таких остатков пополняли коллекцию нашей Татьяны Кузнецовой - специалиста-палеонтолога. Эта коллекция позволяла определять видовой состав и время развития мамонтовой фауны.

Благодаря геоморфологическому многообразию рассматриваемых участков, нам удалось исследовать многолетнемерзлые толщи различного строения и возраста. Много нового открывала нам каждая высадка на сушу с борта корабля «Павел Башмаков». Об одной из таких высадок подробно рассказывается ниже.

21-го августа мы посетили юго-восточную часть острова Новая Сибирь. «Павел Башмаков» бросил якорь далеко от береговой линии, так как близко подойти к ней не позволяла осадка судна. Прибой был не сильный, но нам предстояло еще около часа хода на лодке к острову. Только перед самым берегом, к которому мы стремились, стало ясно, что слишком мелкая вода не позволит нам подойти здесь непосредственно к пляжу. Уже в 50 м от берега лодка коснулась дна. Вокруг нас плавали многочисленные льдины.

Рисунок 2: Исследовательское судно «Павел Башмаков» в дрейфующем льду.



Мы быстро обсудили положение и решили высадиться. Все 15 участников высадки в своих болотных сапогах быстро оказались в воде и понесли рабочий инструмент с разным оборудованием к берегу. Конечно, при этом не обошлось без затекания холодной воды в некоторые сапоги. На суше мы сразу установили постоянную радиосвязь с экипажем судна, чтобы быть в курсе изменений погоды. Другие наши коллеги разожгли костер из плавника, чтобы мы могли погреться и просушить мокрые ноги и сырые сапоги. Затем мы небольшими группами приступили к выполнению плана намеченных работ. Мы проводили береговые измерения. Исследовали обрывы и отбирали образцы мерзлых пород, а также подземного льда. Занимались поиском костей ископаемых животных и остатков растений. Погода нас не очень баловала. Наполз туман и начался морозящий дождь. Несмотря на это, нам удалось полностью исследовать мощный разрез по берегу Новой Сибири. Стоя в холодной грязи, мы отобрали образцы мерзлых наносов и подземного льда, провели GPS-привязку мест их отбора, описали осадочные и криогенные текстуры пород. Особенно радовались мы находке мелких органических остатков, для которых мы надеялись определить их абсолютный возраст. При этом мы сползли вниз по грязи, все ближе к морю. Отложения морского генезиса мы нашли в нескольких сотнях метров западнее большо-

Рисунок 3: Морские отложения с дробстоунами на уровне пляжа.

Рисунок 4: Подготовка к отбору проб подземного льда из предположительно захороненного ледникового остатка.

го разреза. Здесь береговой обрыв, высотой над уровнем моря до 3 метров, был нацело сложен морскими отложениями. В этих глинистых осадках с мелкими раковинами моллюсков мы сразу увидели большой камень. Положение его указывало на транспортировку этого камня айсбергом. Позже мы наблюдали еще несколько подобных камней. Все это было свидетельством того, что наблюдаемые нами глинистые отложения с обломками раковин аккумуляровались во время высокой активности айсбергов. Возник вопрос - можно ли положение морских осадков здесь, на значительной высоте над уровнем моря, считать следствием тектонического поднятия этой территории, или же это - следствие понижения уровня моря? Дискуссия была прервана яркой вспышкой красной ракеты. Это был сигнал о том, что нам следует прекращать свои работы и возвращаться на судно. Нам, конечно, было ясно, почему нас срочно звали обратно. Мы уже заметили усиливающийся с моря ветер и легкую пену на волнах. При возвращении к месту высадки мы увидели, что наша лодка приблизилась к берегу. А туман всё густел, и ветер с моря всё выше гнал воду на пляж. Посадка в лодку стала непростым делом. Но после нескольких попыток мы, наконец, благополучно уселись в лодку. Началось наше часовое плавание на ней. С трудом мы пытались разглядеть что-либо впереди по курсу. Не видно было ни зги. И вдруг мы с радостью увидели, что прямо перед носом лодки вынырнул из тумана «Павел Башмаков». Оказалось, что видимость вдоль нашего пути была менее двадцати метров. На корабле нас встретили очень тепло: бокалом водки и подогретой до 120 °С финской баней. До сих пор мы с удовольствием вспоминаем этот полный приключений, но интересный и плодотворный день.

Экспедиция 2002 года с привлечением гидрографического судна «Павел Башмаков» имела рекогносцировочный характер. Она позволила нам наметить новые объекты исследования и провести их предварительную разведку. Полученные этой экспедицией данные, в частности, результаты лабораторного изучения проб ископаемого льда и вмещающих его пород, обогатили содержание ряда публикаций, появившихся после 2002 года. Вместе с тем они стали основой для дальнейших полевых исследований вечной мерзлоты, которые позже проводились нами в этом регионе Арктики.

*Лутц Ширрмайстер, Гвидо Гроссе, Ханно Майер, Кристине Зигерт, Михаил Н. Григорьев, Виктор В. Куницкий*



## Долговременные наблюдения за водной фауной в озерах и прудах дельты реки Лены

Дельта р. Лены - это территория тундры с огромным количеством больших и маленьких проток и озер, постоянных и временных водоемов различного происхождения. Все эти водоемы населены разнообразными многочисленными и малоизученными свободноплавающими беспозвоночными животными, прежде всего, ракообразными и коловратками. Эти представители водной фауны, несмотря на сравнительно мелкие размеры, играют большую роль в потоках вещества и энергии в тундровых экосистемах. Они являются важным звеном пищевых цепей в водоемах и объектом питания для многих хищных беспозвоночных, молоди рыб и водоплавающих птиц.

Наши исследования водных экосистем дельты р. Лены начались в 1987 году на о. Сагастырь, на самом севере, и на о. Тит-Ары, на самом юге дельты. На-

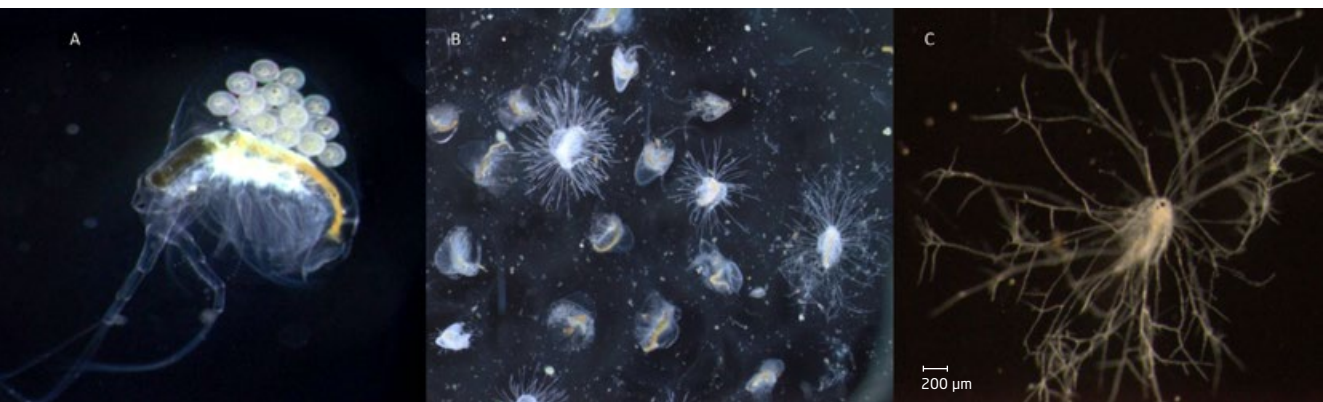
Рисунок 1: Наш гидробиологический уголок на старой станции (слева) и комната с микроскопами в лаборатории на новой НИС «О. Самойловский» (справа).

чиная с 2000 года, ежегодные наблюдения за пелагическими сообществами проводятся нами на о-ве Самойловском. В то время экспедиция «Лена-Дельта» базировалась на старой станции, принадлежащей Усть-Ленскому природному заповеднику. Мы все работали в двух небольших комнатах, выделенных под лаборатории. В углу одной из этих комнат стояли два наших бинокля МБС-10 и банки с пробами. Это был наш гидробиологический угол, где мы проводили большую часть рабочего времени, обрабатывая пробы зоопланктона (Рисунок 1).

Около 120 видов планктонных организмов были обнаружены нами за 18 лет (2000 - 2017) мониторинговых исследований в водоемах о. Самойловский. Более 20 из них являются новыми видами для фауны дельты р. Лены. Некоторые впервые отмечены для Палеарктики и ранее были известны только из водоемов Аляски и северной Канады. Последнее подтверждает единое происхождение и родство фаун этих Арктических областей.

В последние десятилетия из-за потепления климата было зафиксировано увеличение стока и усиление сезонных колебаний уровня воды в крупных арктических реках. В этих условиях река Лена может оказывать большое влияние на пойменные водоемы ее обширного водосборного бассейна, способствуя активному переселению фауны умеренных широт в северном направлении. Это ведет к изменению ареалов распространения ряда видов, влияя на биоразнообразие, как на местном, так и на региональном уровнях. В годы с чрезвычайно высоким весенним половодьем проникновение видов, не характерных для этого района, может носить катастрофический характер. Например, массовое вторжение рачка *Holopedium gibberum* Zaddach, 1855 (Рисунок 2) в одно из озер на острове Самойловский весной 2014, привело к быстрой реструктуризации биоценоза озера и нарушило экологический баланс в нем, что спровоцировало развитие паразитарной эпизоотии среди водных беспозвоночных. Несмотря на ежегодное влияние речной воды, тундровые водоемы сравнительно устойчивы к появлению новых видов. Организмам из умеренных широт трудно адаптироваться к низким температурам воды, конкурировать за пищу с местной фауной и выдерживать пресс хищников. Большинство видов-вселенцев исчезают после первой зимовки. Но те, кому удается выжить, постепенно расселяются в близлежащие тундровые водоемы, формируя локальные популяции.

С открытием современного научного стационара «О-в Самойловский» появились новые возможности для полевых и экспериментальных исследо-



ваний в разные сезоны года. Современные микроскопы Olympus с цифровой камерой теперь позволяют проводить более детальный таксономический анализ разных по сложности групп организмов. Выяснилось, что некоторые из них прекрасно существуют и размножаются в полярную ночь, подо льдом толщиной около 2 м. Обилие зимнего зоопланктона в глубоких озерах иногда сопоставимо с летней численностью планктонных организмов в них. Другие беспозвоночные вмерзают в лед или осадок в мелких водоемах, сохраняя жизнеспособность в течение 8-10 месяцев, и немедленно переходят в активное состояние при появлении свободной воды. Все живое стремится в полной мере использовать короткое полярное лето, успеть размножиться и оставить жизнеспособное потомство, которому предстоит пережить следующую суровую арктическую зиму.

Плодотворное сотрудничество с группой немецких ученых под руководством Юлии Бойке (АВИ, Потсдам) дает нам возможность получить информацию о вариациях различных параметров водной среды в течение всего года, что очень важно для анализа биологических процессов в водоемах. Несмотря на комфортные условия проживания и работы на новой станции, всегда приятно встретиться по вечерам в уютном старом деревянном доме. Посидеть за общим столом и вспомнить, как все начиналось. Сколько

Рисунок 2: Женская особь *Holoopedium gibberum* с яйцами в выводковой камере (А), общий вид популяции, инфицированной паразитическим грибом (В), мертвая особь (С).





разных, интересных людей и событий помнят стены этого дома. Это было прекрасное время. Спасибо большое всем за эти замечательные экспедиции, за помощь и многолетнее сотрудничество!

*Екатерина Н. Абрамова, Ирина И. Вишнякова, Григорий А. Соловьев, Анна А. Абрамова*

Рисунок 3: Участники, сидящие вместе за кухонным столом старой станции на о. Самойловский (слева направо: Федор Селяхов, начальник новой станции; Молло (Гюнтер) Штоф, «Хаусмайстер» старой станции; Екатерина Абрамова) (фото Х.-В. Хуббертен).



Рисунок 5: Обеденный перерыв перед  
утесом из жильного льда на о. Муостах, 2012  
(фото В. Кохан, RBB).

4.

Период без крупного  
проектного финансирования  
2007 – 2012 гг.





## Динамика берегов моря Лаптевых

Арктические берега Восточной Сибири, сложенные многолетнемерзлыми породами, восприимчивы к меняющимся факторам природной среды, совокупность действия которых в настоящее время приводит к увеличению темпов термоабразии, перемещения минеральных наносов и углерода на мелководье шельфа. Нелитифицированные мерзлые породы слагают 65% протяженности береговой линии Северного Ледовитого океана. На 25% береговой линии моря Лаптевых (из общей протяженности в 7500 км), к крутым береговым уступам, подходят заболоченные тундровые низменности, сложенные континентальными сингенетически промерзшими позднеплейстоценовыми отложениями ледового комплекса. Широкое распространение этих высокольдистых отложений определяет специфику берегов восточного сектора Российской Арктики, средняя скорость разрушения которых составляет 1,9 м/год. Вынос материала в береговую зону моря Лаптевых, связанный с разрушением берегов, составляет величины того же порядка, что и объем наносов, поступающих с речным стоком, что подчеркивает значение процессов разрушения берегов и определяет необходимость выполнения более точных оценок.

Рисунок 1: Обнажение ледового комплекса в 30-ти метровом береговом уступе на мысе Мамонтов Клык (Хуббертен, 2008).



Наблюдаемые в настоящее время быстрые изменения режима морских льдов и летних температур воздуха могут в значительной степени изменить динамику морских берегов в регионе, что уже проявляется в увеличении скорости термоабразии. Учитывая низкую температуру многолетнемерзлых пород в регионе, термоабразия сейчас является лидирующим геоморфологическим процессом, определяющим возможность мобилизации запасов углерода, содержащихся в мерзлых толщах. Задача первоначальной оценки вклада абразии мерзлых берегов в вынос углерода в морские экосистемы Северного Ледовитого океана была решена в рамках проекта Динамика Арктических Берегов (Arctic Coastal Dynamics – ACD), реализованного под эгидой Международного арктического научного комитета (International Arctic Science Committee – IASC). В этом контексте инвентаризация и сегментация участков берегов, а также предпринятые работы по мониторингу темпов термоабразии, были основными задачами серии из почти 20 совместных Российско-Германских экспедиций на побережьях западной, центральной и восточной частей моря Лаптевых. Особое внимание было уделено картографированию береговой зоны по результатам профилирований, выполненных во время морских экспедиций в западной части моря Лаптевых на борту судна «Софрон Данилов» в 2000 году, вдоль пролива Дмитрия Лаптева и вокруг Новосибирских островов на борту судна «Павел Башмаков» в 2002 году. В рамках морских экспедиций на больших судах организовывались береговые высадки с использованием небольших моторных лодок. В ходе этих высадок подробно изучались механизм и темпы абразии берегов.

Мониторинг отступающих берегов обычно проводится путем наблюдений за положением береговой линии в разное время с использованием либо повторных полевых измерений, либо данных дистанционного зондирования.

Рисунок 2: М.Н. Григорьев и Х.-В. Хуббертен измеряют темпы разрушения берегов пролива Дмитрия Лаптева (2002).



Из-за труднодоступности и значительной протяженности береговой линии исследуемого региона, натурные полевые наблюдения в основном ограничены ключевыми участками, где топографическая съемка была выполнена в ходе перечисленных экспедиций, в частности, к областям вокруг мыса Мамонтов Клык, мыса Терпай-Тумус, барьерных островов к западу от дельты Лены, Быковского полуострова и острова Муостах. Были предприняты активные усилия по учету пространственной изменчивости динамики берегов и составлению баз данных значительного временного охвата. В 2011 году, когда произошло очень раннее весеннее освобождение акватории от морского льда, планы экспедиции были внезапно остановлены появлением любопытствующего белого медведя на мысу Мамонтов Клык, из-за которого выполнение запланированных работ стало затруднено. Экспедиционная группа, состоявшая из семи российских и немецких ученых, оперативно адаптировала свои планы к возникшей ситуации и переместилась на остров Муостах для интенсивного исследования деградации мерзлоты на дне моря и динамики морских берегов на этом важном ключевом участке по изучению взаимодействия в системе суша-море в Арктике.

Продолжительный мониторинг абразии берегов моря Лаптевых ведется только на двух участках: Мамонтовая Хаята на Быковском полуострове и на острове Муостах. Благодаря этим уникальным временным рядам, остров Муостах стал известен своими очень высокими скоростями термоабразии. Так, за время между повторными полевыми наблюдениями 2011 и 2012 годов, северная часть острова отступила примерно на 39 м. В ходе нескольких исследований регионального масштаба выполнено сопоставление положения береговой линии по архивным историческим аэрофото- и спутниковым

Рисунок 3: Ночевка в ходе экспедиционной высадки на северный мыс полуострова Буор-Хая (фото Ф. Гюнтер, 2010).  
Рисунок 4: Высадка рядом с северным мысом полуострова Буор-Хая (фото Ф. Гюнтер, 2010).

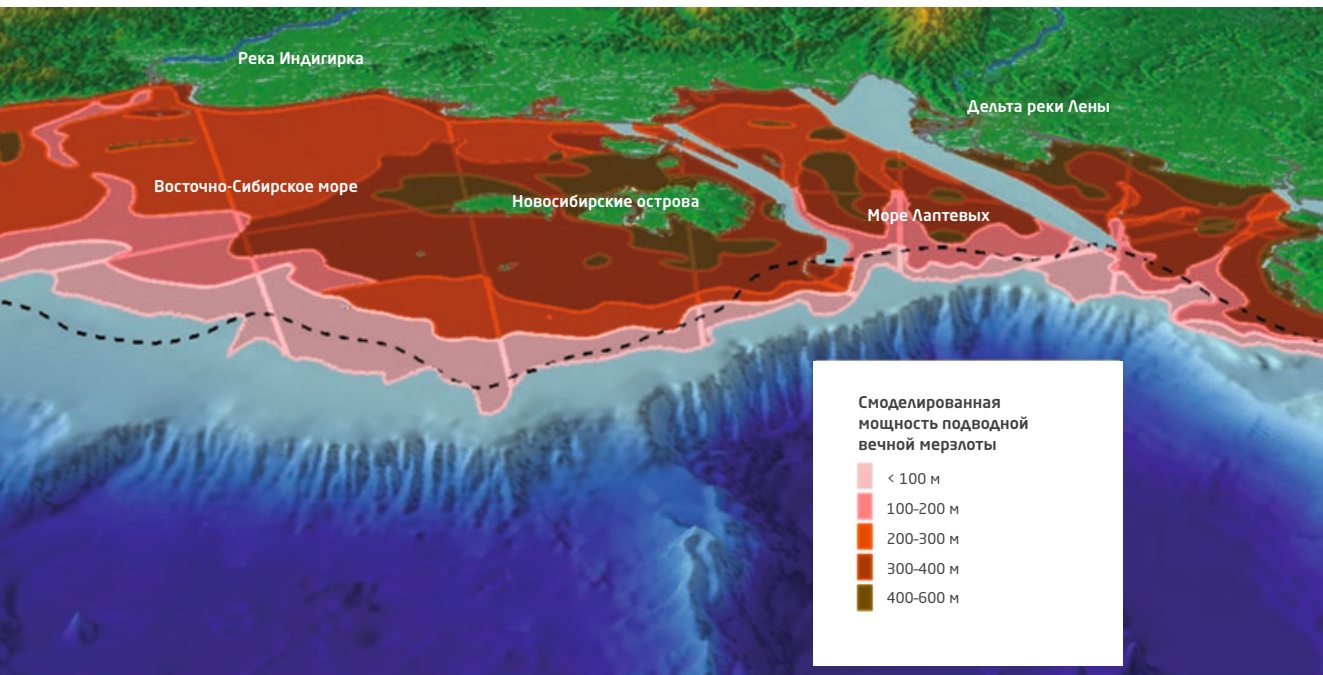


снимкам, снятым в 1950-60-е годы, и по данным современной спутниковой съемки высокого разрешения. В результате этих работ установлено, что в пределах материкового побережья моря Лаптевых (включая остров Муостах) современные скорости термоабразии почти в два раза выше, чем средние за период наблюдений.

Темпы отступления арктических берегов в значительной степени изменяются как в пространстве, так и во времени. При этом, продолжающееся сокращение морских льдов приведет не только к росту температуры морской воды и дальнейшему стерическому повышению уровня моря за счет расширения океана, но, в конечном счете, к усилению волнового воздействия и, возможно, дальнейшему ускорению темпов абразии, поскольку анализ волновой активности и штормов показал, что именно они являются главными действующими факторами разрушения морских берегов. Наши многолетние береговые исследования, охватившие широкий круг ключевых участков и различных типов берегов, позволили сформировать научные концепции и представления о преобладающих процессах и получить данные о темпах разрушения берегов. Эти результаты представляют собой не только ценные с научной точки зрения знания о комплексе происходящих на побережье процессов, которые могут быть применены для других арктических регионов с близкими геологическими условиями, но также могут использоваться для планирования рационального природопользования и развития хозяйственной инфраструктуры региона.

*Франк Гюнтер, Михаил Н. Григорьев, Пьер Пауль Овердуин, Хьюг Лантуи, Ханс-Вольфганг Хуббертен*

Рисунок 5: Береговой уступ высотой 21 м в северо-восточной части острова Муостах (фото М. Григорьев, 2012).



## Полевые работы, цифровое моделирование подводной вечной мерзлоты и вопрос существования в ней газовых гидратов

Подводная вечная мерзлота - это мерзлые породы, которые находятся под морской водой, температура которой ниже 0 °С, как минимум два года подряд. Ее отличие от наземной вечной мерзлоты в том, что ее верхняя температура зависит от взаимодействия поверхностных отложений с толщей морских вод, а не от теплообмена между землей и атмосферой. Арктическая подводная мерзлота - это, как правило, реликтовая наземная вечная мерзлота, которая ушла под воду после последней ледниковой эпохи, когда уровень моря был примерно на 125 м ниже, а сотни километров пород, составляющих нынешний шельф, были подвержены влиянию очень холодного воздуха, что привело к образованию вечной мерзлоты мощностью сотни метров. В связи с повышением уровня моря в конце последней ледниковой

Рисунок 1: Вид на юг от Северного Ледовитого океана к шельфовым морям шельфа моря Лаптевых и Восточно-сибирского шельфа. Показаны топография и батиметрия, на которые наложена модель областей толщи подводной вечной мерзлоты на основе модели Романовского и др. (2005). Черная пунктирная линия показывает распространение подводной мерзлоты, данные о котором представлены на карте в этом регионе, составленной Международной ассоциацией по мерзлотоведению (IPA).



эпохи, вечная мерзлота была затоплена морской водой, и в настоящее время происходит ее деградация под воздействием воды, покрывающей шельф. Более 80% потенциально существующей подводной вечной мерзлоты залегает под Восточно-Сибирским шельфом, что делает ее изучение затруднительным.

Идея изучения формирования и деградации подводной мерзлоты заинтересовала ученых еще со времени начала сотрудничества между АВИ и российскими экспертами. Начало этого плодотворного сотрудничества, отмеченного многочисленными высокорейтинговыми публикациями, связано в основном с активной позицией профессора Николая Н. Романовского из Московского государственного университета (Рисунок 4). Практически каждое лето 1990-х годов Николай проводил несколько недель в Потсдаме в качестве приглашенного исследователя, часто в сопровождении студентов или коллег из Москвы. День за днем, конструктивное обсуждение помогало в разработке новых теорий и концепций, связанных с эволюцией, стабильностью и деградацией подводной вечной мерзлоты. В дальнейшем эти теории были количественно проверены и протестированы с помощью цифрового моделирования. Николай наслаждался неторопливым течением жизни в академической атмосфере Потсдама. Он выходил на пробежку из гостевого дома в Телеграфенберге через парк Бабельсберг и плавал в реке Хавель. Он всегда приезжал в институт полным энергии и новых идей.

Моделирование показало, что подводная вечная мерзлота деградирует сверху и снизу из-за теплопередачи и, вероятно, также диффузии соли. Моделирование показывает, что вечная мерзлота сохраняется на сибирских шельфах по крайней мере последние 400 000 лет (Рисунок 1).

После публикации нескольких статей о стабильности и деградации подводной вечной мерзлоты основное внимание в совместной работе стало уделяться вопросу о существовании метана в виде газовых гидратов в подземной вечной мерзлоте или под ней. Поиск ответа на этот вопрос стал целью дальнейших экспериментов по моделированию. Приарктическая подводная вечная мерзлота представляет собой резервуар и ограничитель распространения парниковых газов, независимо от того, находятся ли они в растворенной, свободной или гидратной форме. Большое количество газа, потенциально содержащегося и удерживаемого в подводной вечной мерзлоте, означает, что протаивание вечной мерзлоты, находящейся под океаном, может привести к значительным выбросам парникового газа в атмосферу в течение короткого климатического времени. Зона, в которой газовые гидраты стабильны, связана с холодной подводной вечной мерзлотой, поэтому аккумуляция подводной вечной мерзлоты означает увеличение числа потенциальных резервуаров газовых гидратов.

Германо-российские исследования, направленные на увеличение базы знаний о процессе перехода вечной мерзлоты из наземной в подводную, например, во время отступления береговой линии или в результате морской трансгрессии, а также о распространении вечной мерзлоты на шельфе



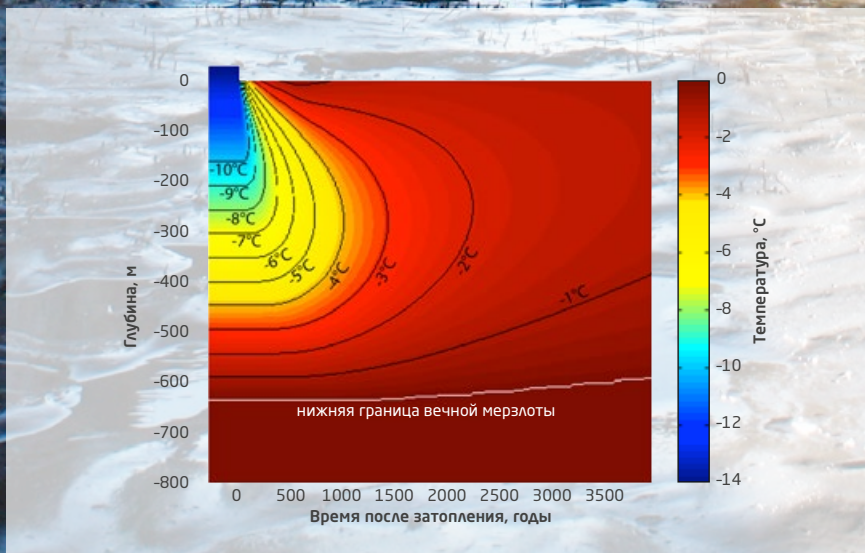
Сибири, привели к планированию и проведению буровой кампании «COAST 2005» и последующих буровых экспедиций (Рисунок 2).

Существование подводной вечной мерзлоты на мелководье стало возможно доказать с помощью бурения ряда скважин. Это подтвердило результаты, полученные в 1950-х и 1960-х годах Н. Ф. Григорьевым, отцом соавтора данной публикации Михаила Н. Григорьева. Измерения температуры показали, что затоплению земли сопутствует быстрое потепление, что подтвердилось и при моделировании теплового потока в отложениях (Рисунок 4). Осадочные керны помогли реконструировать палеоэкологические условия, существовавшие до последней ледниковой эпохи.

Из-за сложностей с разрешениями морское бурение не было доступно в течение многих лет, но ему были найдены альтернативы, включая отбор проб и геофизические работы вблизи берега. Начиная с 2008 года прибрежная работа включала измерения донной температуры и солёности в центральной части моря Лаптевых и применение геофизических (сейсмических и геоэлектрических) методов для обнаружения мерзлых отложений. Большая работа была проделана по методам исследования, в том числе по тестированию усовершенствованных геоэлектрических устройств и разработке сенсора для низкочастотного сейсмического зондирования, чтобы измерить мощность немерзлых отложений над вечной мерзлотой. Испытания последнего проводились по северной оконечности острова Муостях в 2013 году и далее.

Рисунок 2: Буровая установка на морском льду в западной части полуострова Буор-Хая в 2012 году. В этом месте бурение проводилось до глубины 52 м ниже морского дна. Извлеченный осадочный керн показал, что по мере оттаивания вечной мерзлоты, находившейся на 25 м ниже морского дна, происходило таяние и высвобождение метана.

Рисунок 3: Николай Н. Романовский, Ханс-Вольфганг Хуббертен и президент Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA) Хью Френч в квартире Николая в Пушчине.

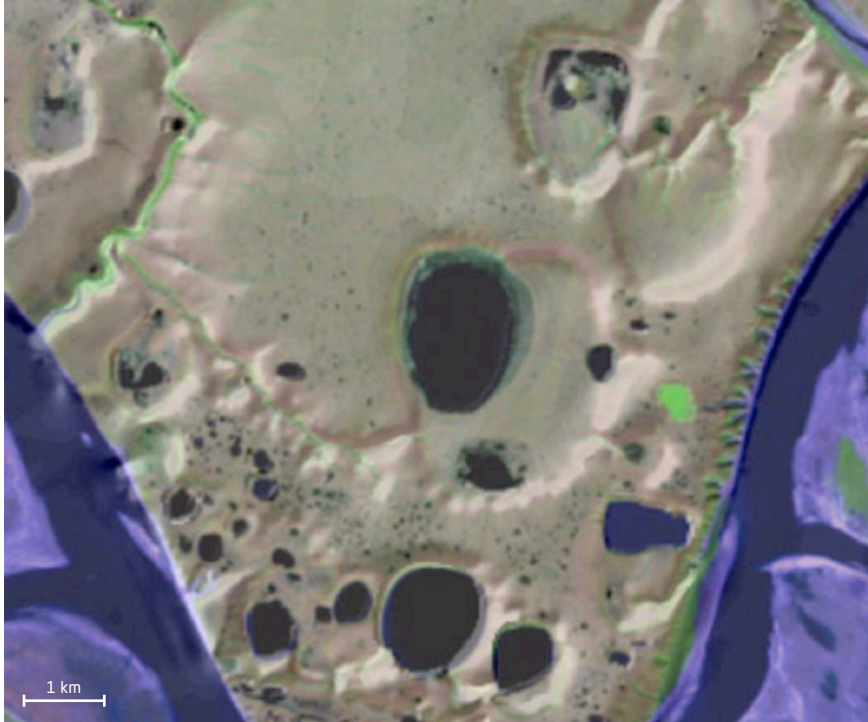


Необходимы дальнейшие исследования, в частности, для изучения роли подводной вечной мерзлоты в современных наблюдениях за выбросами метана со дна шельфовых морей шельфа Сибири. Было показано, что части дельты реки Лены, области продельты и центральной части моря Лаптевых являются сверхнасыщенными метаном. Наблюдения за высоким содержанием метана в толще вод моря Лаптевых и в дельте Лены предполагают наличие его глубоких и непрерывно функционирующих источников и путей выброса, которые с равной вероятностью могут или не могут быть сдержаны вечной мерзлотой. Объединенная российско-германская буровая кампания в 2012 году в центральном море Лаптевых показала, что метан выделяется из вечной мерзлоты, но в малых количествах, достаточных для того, чтобы поглощаться бактериями по мере выброса.

Вечная мерзлота на шельфе и побережье остается объектом германо-российских совместных исследований, проводимых при участии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в Якутске и Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН в Новосибирске и при поддержке Смешанной комиссии Российской Федерации и Федеративной Республики Германия по научно-техническому сотрудничеству (СКНТС). Учитывая современные меняющиеся климатические условия в Арктике, существует необходимость в лучшем понимании этого компонента климатической системы.

*Ханс-Вольфганг Хуббертен, Пьер Пауль Овердуин, Себастьян Веттерих, Михаил Н. Григорьев*

Рисунок 4: Протаивание вечной мерзлоты после затопления показано посредством цифрового моделирования. Используя характеристики отложений и вечной мерзлоты, полученные после изучения кернов, извлеченных во время экспедиции «COAST 2005», мы можем протестировать такие модели на основании проведенных наблюдений и улучшить наше понимание сдерживающей функции подводной вечной мерзлоты в отношении выбросов парниковых газов (рисунок предоставлен Фабианом Кнайером, 2018). Фоновая фотография сделана Т. Заксом.



## Деградация вечной мерзлоты, термокарст и термоэрозия - полевые работы на острове Курунгнах

Летом 2008 года группа из шести молодых исследователей начала интенсивное исследование деградации вечной мерзлоты на острове Курунгнах. Студенты и аспиранты из Гамбурга и Потсдама разбили полевой лагерь на узком песчаном восточном берегу острова, под впечатляющим обрывом Ледового комплекса у стока из термоэрозионной долины, с крутыми склонами. Место было выбрано вблизи объектов исследования - больших термокарстовых котловин, глубоко врезающихся в льдонасыщенную вечную мерзлоту острова Курунгнах.

Но зачем же выбирать участок, до которого надо полчаса добираться на лодке, вместо того, чтобы оставаться на уютной станции «Остров Самойловский»? Не для того, чтобы избежать пристального внимания скептически настроенных старших техников, проживающих на станции, или не упустить возможность поучаствовать в приключениях и насладиться романтикой полярной жизни, а потому, что вечная мерзлота на Курунгнахе полностью отличается от вечной мерзлоты на Самойловском. В то время как Самойловский относится к современной активной дельте с голоценовыми многолетнемерзлыми отложениями, Курунгнах является остатком аккумулятивной долины, сформировавшейся во время позднего плейстоцена, и включает в себя отложения Ледового комплекса над речными песками Палео-Лены. Отложения Ледового комплекса представляют собой очень

Рисунок 1: Рельеф острова Курунгнах с характерными для деградации вечной мерзлоты ландшафтными формами: термокарстовыми озерами и котловинами, а также термоэрозионными долинами (Landsat-7 ETM +, RGB 4-5-3, над ЦМР-затенением рельефа).



льдонасыщенные многолетнемерзлые отложения толщиной до десятков метров. Этим отложениям, широко распространенным в Арктике, уделяется пристальное внимание, поскольку они подвержены таянию при потеплении климата. Процессы деградации влияли на эти плейстоценовые отложения на протяжении всего голоцена. Быстрое протаивание вечной мерзлоты под районами запруживания (термокарст) привело к созданию термокарстовых озер; когда вода из этих озер стекает, оставшиеся термокарстовые котловины могут иметь ширину в несколько километров и глубину до двадцати метров. Быстрое протаивание вечной мерзлоты под воздействием проточной воды (термоэрозия) создало овраги, долины и сети долин, которые также глубоко врезаются в остров. Все эти виды рельефа играют важную роль в гидрологии ландшафта, его энергетическом балансе и круговороте углерода. Возникает вопрос: каким будет их развитие в будущем?

Шесть молодых ученых начали изучение морфометрии и эволюции образцовых термокарстовых озер и котловин на острове Курунгнах. Чтобы провести обширные геодезические и батиметрические съемки всей трехкилометровой термокарстовой котловины и трех озер в нем, приходилось носить оборудование на себе, но итог того стоил: был получен ценный набор геоданных, которые можно было соотнести с in-situ измерениями излучения, толщины деятельного слоя, растительных сообществ и седиментологическим анализом образцов. Исследователи были особенно рады поддержке со стороны российских ученых, которые прибыли с острова Самойловский, чтобы убедиться, что группа в порядке, и поделиться своими запасами

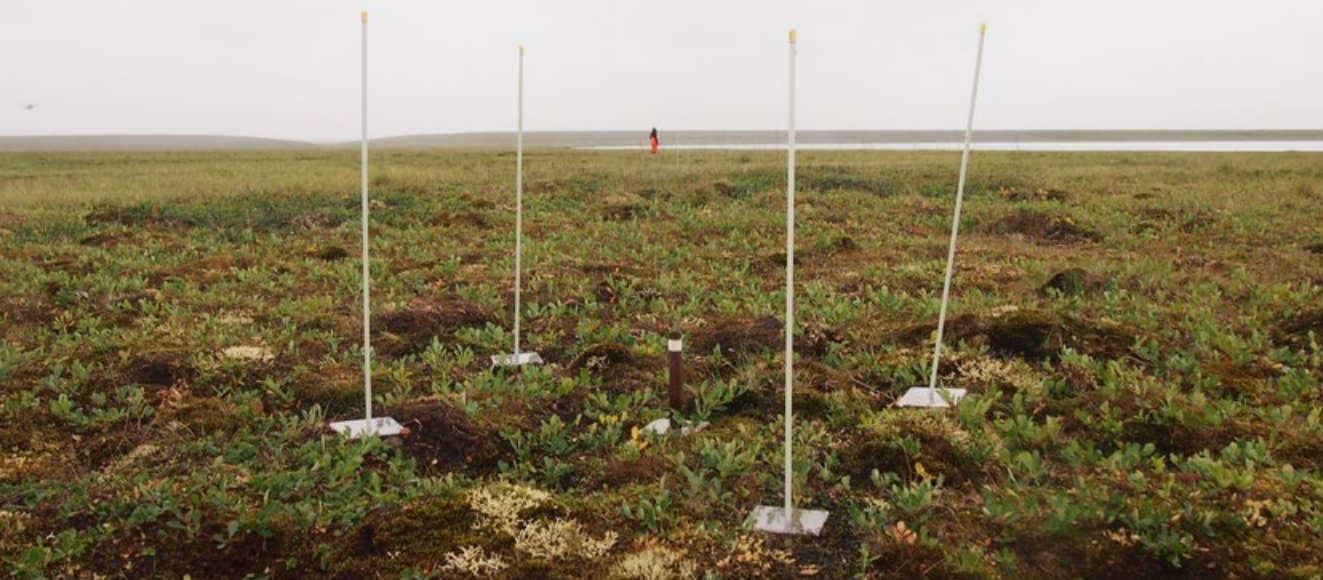
Рисунок 2: Проведение тахеометрической съемки включает выполнение двух отдельных задач: работа с прибором и пробегка по тундре с зеркальным отражателем. В то время как последняя из них немного согревает, из-за первой пальцы оператора почти отмерзают.



свежего мяса и рыбы, что добавило разнообразия в питании в лагере. Прибывшие ученые частично разделяли научные интересы группы, поэтому приняли участие в совместном отборе проб и проведении измерений.

Вернувшись обратно в институты, исследователи объединили полевые данные с данными анализа спутниковых изображений и цифровых моделей рельефа (ЦМР), чтобы распространить детализированные знания об исследуемом полевом объекте на более крупные географические области и понять процессы, происходящие в масштабах всего ландшафта. Они обнаружили, что только одна треть острова Курунгнах обладает условиями для дальнейшего формирования термокарстовых и термоэрозионных форм, поскольку термокарст и термоэрозия уже охватили большую площадь во время голоцена. Начиная развитие формы рельефа не смогут вырасти до таких больших размеров, как уже существующие голоценовые термокарстовые формы, поскольку для этого нет достаточного пространства. Существующие формы рельефа различаются по своей активности: некоторые термокарстовые озера и термоэрозионные долины расширяются и активно размывают отложения Ледового комплекса, многие другие продолжают сохранять стабильность уже десятилетия, а площадь некоторых озер сокращается, или происходит их сток, что позволяет вечной мерзлоте восстановиться. Различия гидрогеохимического состава воды в термокарстовых озерах и потоках в термоэрозионных долинах также отражают вариации эрозионной активности: образцы воды из участков, подверженных эрозии, имеют более высокую концентрацию растворенного органического углерода, чем образцы из стабильных участков. Обитатели лагеря стали свидетелями впечатляющей демонстрации процесса термоэрозии, когда поток очень мутной темной воды (= богатой органическими осадками) внезапно пронесся через

Рисунок 3: Сток термоэрозионной долины в реку Лену а) во время и б) после паводкового потока с льдонасыщенной вечной мерзлоты.



прилегающую к лагерю термоэрозионную долину и смыл в Лену значительную часть лагерного «пляжа». Это продлилось всего несколько минут; затем бурный поток снова превратился в ручеек с практически чистой водой. Оказалось, что часть льдонасыщенной вечной мерзлоты в верхней части долины играет роль плотины для текущего вниз водотока и приводит к образованию запруживания. В определенный момент под влиянием запруды произошло оттаивание плотины, и вода стекла по долине, тем самым увеличивая ее эрозию.

Пять лет спустя уже другие молодые исследователи продолжили намеченный путь и дополнили исследования различных видов деградации вечной мерзлоты на Ледовом комплексе. Равномерная деградация вечной мерзлоты происходит из-за повсеместного протаивания подземного льда. Этот процесс невидим глазу, поскольку не всегда приводит к явному изменению ландшафта, такому как, например, термокарст или терморозия. Однако такая изотропная деградация может быть обнаружена путем повторных измерений высоты местности. Для проведения этих измерений на острове Курунгнах в 2013-2014 годах были установлены несколько реперных реек. Эти рейки вбиты примерно на 1 метр ниже глубины сезонного протаивания и, следовательно, обеспечивают фиксированную точку нивелирования. Чтобы обнаружить изменения высоты, расстояние между поверхностью земли и верхним концом рейки периодически измеряется. Реперные рейки располагаются довольно далеко друг от друга, поэтому преодоление расстояния между ними может быть сложной задачей. Самые свежие измерения показывают, что Ледовый комплекс просел в среднем на 9 см за последние четыре года.

Рисунок 4: Реперные рейки для измерения изменений высоты поверхности. Рейки закреплены в вечной мерзлоте; диски движутся вверх и вниз, когда высота поверхности изменяется.



Ускоренная деградация вечной мерзлоты на примере впечатляющих береговых обрывов острова Курунгнах может оказать опасное воздействие на инфраструктуру в Арктике. Здесь скорость эрозии была изучена с помощью уникального временного ряда, полученного при дистанционном зондировании в период с 2015 по 2017 год с использованием радара с синтезированной апертурой (РСА), установленного на немецком спутнике TerraSAR-X.

Исследователи также провели полевые измерения на вершине обрыва острова Курунгнах для проверки результатов дистанционного зондирования. Измерения показали, что вершина обрыва отступает с постоянной скоростью в течение всего сезона, и что осадки, наряду с температурой воздуха, оказывают значительное влияние на ее эрозию. Результаты гидрохимического анализа показали, что потоки талой воды, стекающие с этого эрозионного уступа, имеют гораздо более высокое содержание общего количества растворённых частиц, более высокие концентрации минеральных компонентов, а также отличаются значительно большей мутностью по сравнению с водами из термоэрозионных долин и термокарстовых озер. Летом водный сток этих потоков, текущих с Ледового комплекса, однако, пренебрежимо мал по сравнению со стоком рукава Лены, в который они вливаются. Таким образом, потоки талой воды практически не влияют на состав рукава реки Лены на пути в Северный Ледовитый океан. Российские и немецкие ученые, работающие на острове Курунгнах уже десять лет, обладают большим опытом в изучении вечной мерзлоты. С началом исследовательской деятельности ИНГГ СО РАН в дельте реки Лены их опыт также был дополнен и геофизическими измерениями. Эти измерения дают ценную информацию о подповерхностных структурах и процессах термокарста и термоэрозии льдонасыщенных многолетнемерзлых пород (см. стр. 171-173).

Рисунок 5: Измерение эрозии берегового уступа на острове Курунгнах: измерительный участок снимался на таймлапс-камеру каждые четыре часа; затем измерения были сопоставлены со спутниковыми наблюдениями, что показало наличие эрозии в течение всего сезона.





Результаты полевых работ на острове Курунгнах важны не только для изучения льдонасыщенных многолетнемерзлых пород в Арктике. Они также послужили аналогом наземных данных для исследования деградации вечной мерзлоты на Марсе. Например, крупная термокарстовая котловина, образовавшаяся в отложениях Ледового комплекса на острове Курунгнах, изучалась в качестве наземного аналога находящихся на Марсе впадин с фестончатым рельефом образованных в мантийных отложениях, богатых летучими веществами.

Результаты полевых исследований, моделирования инсоляции и геоморфометрических анализов на острове Курунгнах указывают на боковой характер развития там термокарста и миграцию озер на север. Свидетельством в пользу этого вывода большая крутизна склонов, ориентированных на юг. Инсоляция и температура поверхности земли являются ключевыми факторами, напрямую влияющими на стабильность и крутизну термокарстового склона. По прямой аналогии было сделано предположение, что климатически обусловленное развитие фестончатого рельефа впадин на Марсе происходило в первую очередь на крутых склонах, обращенных к полюсам, в направлении экватора.

*Анне Моргенштерн, Ирина В. Федорова, Антонина А. Четверова, Франк Гюнтер, Матиас Ульрих, Фабиан Берманн, Себастиан Зубржицкий, Софья А. Антонова, Самуэль Штеттнер, Юлия Бойке*

Рисунок 6: Измерения излучения на склонах термокарстовой котловины на острове Курунгнах. Результаты были также использованы для аналоговых исследований термокарста на Марсе.



## От бензопилы до моделирования климата. Ледяные жилы как архив зимнего климата

Ледяные жилы (полигонально-жильные или повторно-жильные льды) широко распространены в ландшафтах зоны вечной мерзлоты. Они имеют клиновидную форму и хорошо видны в прибрежных и речных обнажениях как огромные впечатляющие ледяные блоки шириной 2-3 м и высотой до 6 и более м. В плане они образуют полигональные решетки. Образование ледяных жил связано с процессами морозобойного растрескивания в зимний период, когда сильное охлаждение приводит к открытию морозобойных трещин, которые весной заполняются талыми снеговыми водами. Низкие отрицательные температуры почвы ( $-10^{\circ}\text{C}$  и ниже) приводят к немедленно замерзанию этой талой воды, что вызывает образование ледяной жилки (элементарной ледяной жилки или ледяного ростка). Этот процесс повторяется год за годом и, таким образом, образуется ледяной клин, состоящий из множества отдельных вертикальных ледяных прожилок, содержащих изотопную запись предыдущего зимнего снега.

Для формирования ледяных клиньев (ледяных жил) требуется вечная мерзлота с отчетливо отрицательными температурами и, наоборот, ледяные клинья являются диагностическим признаком вечной мерзлоты. Везде, где есть ледяные жилы, пейзаж структурирован в обширные многоугольные узоры необычайной красоты, которые могут напоминать с вертолета или самолета карты городов. Эти многоугольные узоры указывают на положение ледяных клиньев и убедительно показывают, что эти удивительные объекты имеют широкое распространение в областях распространения сплошной вечной мерзлоты. Следы ледяных клиньев в ландшафтах указывают, что в этих регионах существует вечная мерзлота. Псевдоморфозы по вытаявшим жильным льдам, заполненные осадочными породами, известны в средних широтах Европы как свидетели бывших вечномерзлых ландшафтов.

С середины 1990-х годов полигонально-жильные льды изучались в тесном российско-германском сотрудничестве в экспедициях с участием AWI

Рисунок 1: Утес из жильного льда на о. Муостах, 2012 (фото Т. Опель).





на озере Лабаз и на мысе Саблера. Работы были продолжены в 1998 году на Быковском полуострове и в 1999 году на острове Большой Ляховский. Ледяные жилы стали ключевым объектом палеоклиматических и геокриологических исследований. Исследования жильных льдов были также связаны с пониманием процессов генезиса ледяных жил, времени морозобоинного растрескивания, формирования ежегодных ледяных жилок, сохранности климатического сигнала в подземных льдах.

Изучение полигонально-жильных льдов важно для понимания особенностей накопления осадочных отложений в условиях вечной мерзлоты на приморских аккумулятивных равнинах, что наиболее впечатляюще видно в районах распространения отложений Ледового комплекса. Стоя перед крупным утесом сероватого льда высотой 25-30 м, который был сформирован многими элементарными ледяными жилками в течение десятков тысяч лет, начинаешь понимать Арктику немного лучше, и это является волшебным моментом. Стоя там, легко понять, почему ученые сначала ошибочно полагали, что ледники построили эти стены почти чистого льда.

В первые годы сотни образцов из ледяных жил были отобраны специальными ледобурами. Со временем стало ясно, что лед и мерзлые породы в исходном состоянии могут быть лучше отобраны при помощи цепных пил (бензопил) и более сложных буровых инструментов. Для сохранения образцов в мерзлом состоянии до проведения лабораторных исследований использовались морозильники в полевых лагерях и специальные ящики из пенополистирола для транспортировки. Это позволило точно отбирать нужные образцы жильного льда и включения в нем в холодной лаборатории в Германии. Из образцов извлекалось органическое вещество для прямого радиоуглеродного датирования данного кусочка льда. Так были датированы хорошо сохранившиеся во льду зеленые листья с хлорофиллом, менее све-

Рисунок 2: Полигонально-жильные льды на западе дельты р. Лены (фото Х. Майер).



жие остатки растений, а также многочисленные остатки помета леммингов. Возраст органических остатков в ледяных жилах составлял около 30 000 лет. Это позволило точно определить возраст соответствующих ледяных жил и создало предпосылки для создания временных рядов, необходимых для реконструкции климата.

С годами стало очевидно, что ледяные жилы, поскольку они образованы талым снегом, прямо связаны с атмосферными осадками и, следовательно, могут отражать прошлые климатические условия, особенно зимнего сезона. Было сделано довольно много радиоуглеродных датировок, чтобы использовать ледяные клинья в качестве климатических архивов в более чем тысячелетнем разрешении. Кроме того, понадобилось немного удачи, чтобы сопоставить три ключевых объекта исследования: один в Барроу, Аляска, второй в дельте Лены и третий на побережье Ойгосского Яра, что позволило достичь еще более точной (столетней) шкалы  $^{14}\text{C}$ -датированной реконструкции зимнего климата в голоцене и позднем плейстоцене. Понимание зимнего изменения температуры имеет особое значение, поскольку нынешнее арктическое потепление наиболее сильно зимой.

Палеоклиматическая информация, содержащаяся в ледяных жилах, охватывает зимний сезон, и она показывает, что в дельте Лены естественное постепенное потепление за последние 7000 лет достигло последнего максимума (как показано во многих публикациях). Это контрастирует с летним охлаждением голоцена, наблюдаемым по другим арктическим климатическим палеоиндикаторам (например, по пыльце), но подтверждает то, что предсказано палеоклиматическим моделированием.

*Ханно Майер, Томас Опель, Александр Ю. Деревягин*

Рисунок 3: Отбор проб плейстоценового жильного льда на п-ове Быковский в 1998 г. с помощью ледобуров (фото Х. Майер).

Рисунок 4: Отбор проб плейстоценового жильного льда с помощью бензопилы (фото Л. Ширрмайстер).



## Исторические и современные изменения границы лесной зоны и озер северной Сибири в связи с потеплением

В последние годы произошло резкое потепление климата на севере Сибири. В результате ожидается, что бореальные леса распространятся на север. Это может привести к потере уникальных экосистем тундры, существующих в настоящее время только в узкой полосе к северу от тайги и к югу от побережья Сибирской Арктики.

Расширение бореальных лесов также может вызвать изменения в химических характеристиках и биологическом составе озер. Однако наши знания о передвижении границы лесной зоны в ходе глобального потепления, затрагивающего север Сибири, в настоящее время практически полностью основаны на имитационном моделировании с использованием глобальных моделей растительности. В отличие от всех других приарктических регионов, граница распространения леса в Сибири образована лиственницей (*Larix* sp.), листопадным хвойным деревом. В связи с этим применимость большинства экологических моделей к этому региону вызывает сомнения. Лиственницы обладают длинным периодом размножения, а время задержки, с которой они реагируют на повышение температуры, все еще не известно. Это также означает, что мы не знаем, как долго последнее потепление будет оказывать влияние на экологические изменения в будущем.

Наша команда, состоящая из российских и немецких (палео)экологов, уже более десяти лет проводит исследования в зоне перехода тайги в тундру в северной Сибири с целью изучения динамики изменения численности популяции лиственниц из-за потепления и того, как эти изменения влияют на экологию северных озерных систем. Наши исследования включали

Рисунок 1: Экспедиционные группы часто совершают пешие походы на несколько километров через тундру и тайгу, чтобы добраться до районов, где планируется проводить изучение растительности и отбор проб (фото Ш. Крузе).



проведение полевых работ в нескольких районах границы распространения сибирского леса вдоль трансекта, идущего с запада на восток. Эти районы включали: южную часть полуострова Таймыр (в 2011 и 2013 годах), район реки Анабар (в 2007 году), район нижней части реки Лены (в 2009 году), район реки Омолой (2014 год), район нижней части реки Колымы (2008, 2012 годы) и центральную часть Чукотки (2016 год). Особый интерес представляли участки, которые охватывали трансекты от бореальных лесов до области тундры. До них добирались вертолетом, чтобы минимизировать эффект воздействия реки и человеческого фактора на растительность и озера.

Полевые работы состояли из анализа растительности, включая анализ участков растительного покрова, измерения тысяч отдельных деревьев и отбора сердцевин деревьев для дендрохронологического анализа. Мы также исследовали озера с помощью (палео)лимнологических методов, путем измерения параметров озера, отбора проб озерной воды, зообентоса и фитопланктона и сбора кернов озерных отложений. Полевая работа означает неделями жить в палатках в суровых условиях. Дни были полны тяжелой работы и увлекательных моментов, таких как выгрузка более тонны полевого оборудования из вертолета, зависшего в метре над торфяным грунтом, или встречи с бурыми медведями, регулярно посещавшими наши полевые лагеря на Чукотке.

Наши полевые исследования растений, диатомовых водорослей, хирономид (не кусающихся комаров-звонцов) и ветвистоусых раков (*Cladocera*), среди прочего, показали, что наземные и водные экосистемы тундры сильно отличаются от лесных участков. Озерные отложения представляют собой архивы прошлых экологических изменений и могут предоставлять информацию о существовавшей в прошлом зависимости между развитием экосистем и климатом.

Рисунок 2: Осадочные отложения из арктических озер - это естественные архивы, в которых сохранились биоиндикаторы. Их анализ позволяет восстановить историю растительности в области и изменения условий окружающей среды с течением времени (фото Е. Захаров).

Рисунок 3: Лиственницы могут расти в форме криволесья в периоды, когда условия окружающей среды неблагоприятны, как это видно здесь, на юге полуострова Таймыр в северной Сибири (фото Ш. Крузе).

Мы исследовали микроископаемые, такие как пыльца, диатомовые водоросли и древняя ДНК, в нашей совместной «Российско-германской лаборатории по изучению экологического состояния Арктики (Биологический мониторинг-Биом)». Результаты показали, что растительность (возможно, под влиянием изменения климата), скорее всего, станет более важным фактором изменения озер, чем непосредственные климатические изменения.

Мы также обнаружили, что в середине голоцена граница распространения леса на п-ове Таймыр была расположена на несколько сотен километров дальше на север, несмотря на то, что тогда климатические тепловые параметры были сходны с современными. Наша гипотеза такова, что это несоответствие между нынешним расположением границы распространения леса и климатическими условиями является результатом резкого потепления в недавнем прошлом, которое привело к неравновесности в соотношении «растительность-климат».

Наши исследования динамики численности популяции лиственницы показали, что плотность лиственничных лесов увеличивается в открытых лесных районах, но ареал их распространения расширяется на север достаточно медленно. Чтобы получить лучшее понимание механизмов процессов, происходящих внутри лиственничной популяции, мы создали модель растительности, которая имитирует жизненный цикл миллионов деревьев и их ответные реакции на климатические условия.

Моделирование показало, что медленный ход этой реакции на севере, вероятно, связан с недостаточной выживаемостью молодых особей из-за ограниченного рассеивания семян и их низкого качества. Несмотря на то, что темпы продвижения границы лесной зоны на север малы, этот процесс будет длиться сотни лет даже в том маловероятном случае, если потепление быстро прекратится.

Скорее всего, это приведет к необратимой потере уникального биоразнообразия Арктики. Более того, результатом расширения лесной зоны станет дальнейшее потепление, вызванное влиянием растительности на климатические условия из-за изменения отражательной способности поверхности Земли.

В дальнейшем, полевые (палео)экологические исследования в сочетании с дистанционным зондированием и моделированием растительности помогут точнее прогнозировать будущие изменения лесов в северной Сибири и определить их значение для биоразнообразия и климата в местном, региональном и глобальном масштабах.

*Ульрике Херцшу, Людмила А. Пестрякова, Лаура С. Эпп, Лариса А. Фролова, Руслан М. Городничев, Биргит Хайм, Флориан Ельч, Юлиане Клемм, Штефан Крузе, Лариса Б. Назарова, Бастиан Нимейер, Анатолий Н. Николаев, Катлен Р. Штооф-Ляйксенрин, Ральф Тидеманн, Марейке Вичорек, Евгений С. Захаров, Хайке Х. Циммерманн*





## Значимость органического вещества и оценка запасов углерода на севере Сибири

Северо-Восточная Сибирь находится в зоне сплошного распространения мерзлоты и, таким образом, является территорией повышенного риска в связи с глобальными климатическими изменениями. Разрушение мерзлоты может осуществляться несколькими путями, такими как абразия берегов (Рисунок 1), просадка поверхности почвы вследствие увеличения глубины сезонного протаивания, а также в результате развития таких процессов, как формирование термокарстовых озер, эрозия и оползни.

Таяние мерзлоты на севере может иметь значимые глобальные последствия, связанные с большими запасами органического вещества, содержащегося в многолетнемерзлых отложениях этого региона. Это органическое вещество, представленное остатками древних растений и животных, было законсервировано в мерзлоте на протяжении тысячелетий. Таким образом, оно было исключено из глобального биогеохимического цикла углерода. Деградация мерзлоты, происходящая в настоящее время, делает это органическое вещество доступным для разложения микробным сообществом, что приводит к усилению климатического потепления за счет дополнительной эмиссии в атмосферу парниковых газов (метана и  $\text{CO}_2$ ). Это, в свою очередь, означает ускорение деградации мерзлоты и высвобождение еще большего

Рисунок 1. Обнажение отложений Едомы, содержащих большое количество органического углерода, включая погребенные торфяники. Остров Собо-Сисе, дельта реки Лены, 2014 (фото М. Фукс).



количества углерода. Таким образом, процесс становится самоускоряющимся. В связи с этим, понимание того, как быстро и какое количество углерода будет высвобождаться, является критически важным для прогноза последствий таяния мерзлоты в Арктике. Наши исследования в рамках совместных экспедиций в дельте реки Лены направлены на изучение характеристик, происхождения, запасов, распределения и уязвимости органического вещества на севере Сибири.

До конца 90-х годов прошлого века предполагалось, что холодный климат и связанная с этим низкая продуктивность растительности обуславливают незначительное накопление органического вещества и относительно низкие запасы углерода в почвах этого региона. С возрастанием понимания того факта, что низкие температуры и высокая водонасыщенность мерзлотных почв ведут к снижению скоростей разложения органики, а также с учетом процессов, способствующих захоронению органики, таких как криотурбация и быстрое осадконакопление, в начале 2000-х годов эта точка зрения изменилась.

В рамках экспедиций "Лена" на основе многочисленных полевых исследований мы смогли по-новому оценить запасы погребенного углерода в мерзлотных толщах на севере Сибири. Мы отбирали образцы органического углерода из древних мерзлых отложений мощностью более 50 м, а также из периодически оттаивающей верхней части, летом и зимой, из жильных льдов и даже из пузырьков метана, сохранившихся в озерном и морском льдах (Рисунок 3). Мы обнаружили впечатляющие свидетельства фауны последнего ледникового периода, такие как бивни и черепа мамонтов, кости шерстистых носорогов и даже волоски меха мамонтов. Одной из сложностей во время летних экспедиций было сохранение образцов в мерзлом

Рисунок 2: Приземление вертолета МИ-8 на отдаленном участке в дельте реки Лены после доставки группы ученых, исследующих характеристики органического вещества (фото Й. Штраусс, 2014 год).



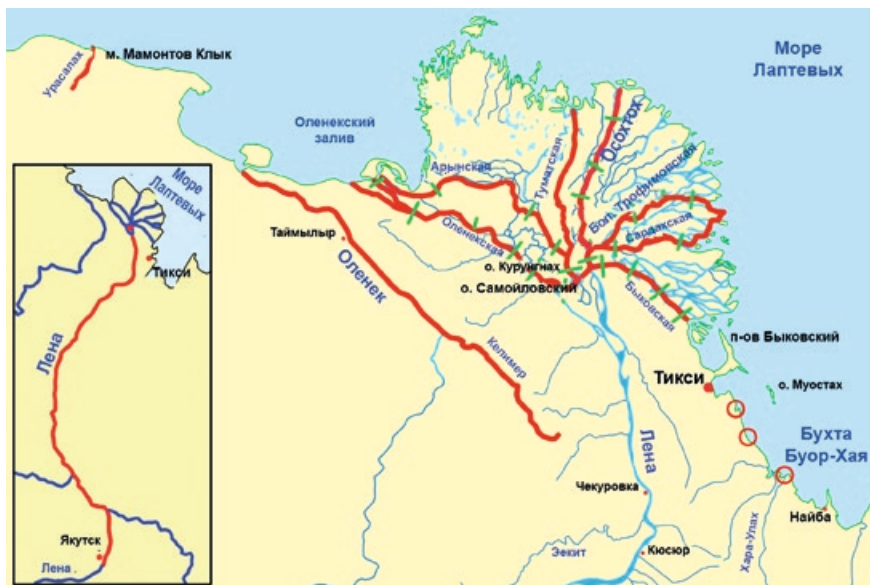
состоянии для избежания их оттаивания после отбора. Из-за этого иногда возникали забавные ситуации, например, работающий морозильник на вечной мерзлоте, который привезли на вертолете.

Используя уникальные возможности экспедиций "Лена" и анализируя образцы в наших лабораториях, мы получили возможность пересмотреть расчеты конкретно для района дельты р. Лена (и внесли важный вклад в оценку запасов почвенного углерода циркумарктической мерзлотной зоны). Мы считаем, что запасы органического вещества, накапливавшиеся в замерзшем виде на протяжении тысячелетий в дельте реки Лены только в верхнем слое почвы, толщиной в 1 метр, могут достигать 240 миллионов тонн. Это 29 миллионов вертолетов МИ-8 (см. Рисунок 2), являющихся основным транспортом, который мы использовали для того, чтобы добраться до отдаленных участков, где мы производили наши исследования.

Еще более значительные запасы углерода находятся глубже одного метра. Этот углерод пока не вовлечен в современные биогеохимические процессы, но, потенциально, может стать доступным в случае дальнейшей деградации мерзлоты вследствие потепления в Арктике.

*Йенс Штраусс, Лутц Ширрмайстер, Себастиан Зубржицкий, Александр Л. Холодов, Михаил Н. Григорьев, Виктор В. Куницкий, Маттиас Фукс, Ева-Мария Пфайффер, Гвидо Гроссе*

Рисунок 3: Отбор проб метана из льда на п-ове Быковский (фото Х. Циммерманн, 2017 год).



## Экспедиции на резиновых лодках и малогабаритных речных судах - гидрология и геоморфология дельты реки Лены

Этот российско-германский проект направлен на геологическое и геоморфологическое исследование состава дельты реки Лены и изучение гидрологических процессов, происходящих в ней. На всех этапах работы для речных экспедиций по основным протокам дельты были использованы малогабаритные суда. Малогабаритные суда для экспедиции были зафрахтованы через Тиксинскую гидрографическую базу.

В первые годы проекта использовались малогабаритные суда «Дунай» и «Нептун». Позднее члены экспедиции стали активно использовать судно «Мерзлотовед», предоставленное Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в Якутске, и навигационное судно «П-405». Эти суда являются как важными исследовательскими платформами во время прохождения по длинным маршрутам через дельту реки Лены, так и средством транспортировки полевых групп и проведения других исследований.

Рисунок 1: Карта дельты реки Лены и маршрутов экспедиций по рекам.  
Рисунок 2: Бассейн реки Лены.



В 2005 году, с использованием судна «Нептун», гидрологические измерения проводились по всей Оленекской протоке. Благодаря этим исследованиям были получены данные о движении потока воды и изменении количества переносимых им взвесей на протяжении протоки, от начала дельты до устьевого бара Оленекской протоки.

Несколько небольших исследовательских групп на лодках провели гидрологические и геоморфологические исследования по протокам и другим рекам прибрежной зоны моря Лаптевых. В разные периоды проекта два исследователя прошли протоки: Сардахскую, Туматскую, Быковскую, Арынскую и Осохтох.

В 2006 году два исследователя использовали резиновую лодку, чтобы изучить реку Урасалах, протекающую через кряж Прончищева. В 2008 году была посещена река Келимер, приток реки Оленек в ее нижнем течении, и впервые были датированы отложения дельты реки Оленек.

В течение двух сезонов в 2001 и 2002 годах было исследовано крупное слияние проток, разветвляющееся вблизи острова Сардах. Поток воды и концентрация осадочного материала измерялись в четырех гидрометрических областях в Сардахской и Трофимовской протоках. Эти измерения были сопоставлены с гидрометрическими характеристиками этих проток, полу-



ченными в 70-х годах XX века гидрологами Тиксинской обсерватории. Это сравнение показало, что поток воды, вместе с переносимым им осадочным материалом, продолжает отклоняться в юго-восточном направлении, двигаясь из Трофимовской протоки в рукава Быковской и Сардахской проток.

Геоморфологические исследования вдоль этих проток указали на причину такого перераспределения потока воды. С одной стороны, тектоническое поднятие вызвало деформацию земной поверхности в западной части дельты, что заставляет воду течь в юго-восточном направлении. С другой стороны, дамбы Ледового комплекса в юго-восточной части дельты были разрушены несколько столетий назад, и водный путь на восток, следующий за наклоном земной поверхности, стал свободен.

Быковская протока - самый молодой рукав дельты, возраст которого составляет всего лишь 1500 - 2000 лет. Исследования геологического состава и геоморфологии дельты проводились на лодках и других судах, в результате чего стало возможно построить геоморфологическую карту дельты реки Лены и понять ее эволюцию в период голоцена.

Следствием этой эволюции было перемещение заполняющихся эстуариев с запада на восток во время колебаний уровня моря и продолжение исчезновения остатков Ледового комплекса из-за процессов абразии и эрозии. Древние части первой террасы расположены в западной части дельты, а самые молодые острова находятся в ее восточной части.

Рисунок 3: Район тестирования береговой линии на острове Алхан на северной границе дельты.

Уникальный геологический состав дельты реки Лены означает, что острова первой террасы состоят из органических и минеральных отложений разного возраста, но они составляют единую поверхность первой террасы. Такие геологические и геоморфологические особенности указывают на то, что колебания уровня моря являются основным фактором, влиявшим на формирование дельты в прошлом и сохраняющимся на настоящий момент.

Походы на лодках по рекам Келимер и Оленёк, с посещением дельты реки Оленёк, показывают, что последняя аналогична дельте реки Лены, а колебания уровня моря очень важны для формирования устья реки Оленёк. Результатом прохода по протокам Туматская и Осохтох на север от дельты реки Лены стало создание на острове Алхан исследовательской площадки для изучения северной прибрежной динамики.

Параллельно с путешествиями на лодках продолжалось и исследование озер в дельте реки Лены и в прибрежной зоне моря Лаптевых с точки зрения их морфологии, наличия в них отложений, а также их гидрологических и гидрохимических режимов. Комплексные исследования озера Севастьян-Кюеле, расположенного недалеко от Тиксинской метеостанции, помогли ученым понять климатическую историю этой области за последние тысячелетия. Пилотное исследование, направленное на изучение колебаний уровня моря в лагунах залива Буор-Хая, началось в 2017 году.

С 2014 по 2017 гг. проводились исследования долины реки Лены от Якутска до дельты, чтобы лучше изучить процессы, ранее замеченные в дельте. Река реагирует на изменения уровня моря на протяжении всей долины, на расстоянии до тысячи километров от моря. Это морское влияние зафиксировано и на речных террасах. Эти исследования проводились на борту судна «Мерзлотовед» во время грузовых перевозок от Якутска до станции «Остров Самойловский» и во время походов на лодке по долине реки Лены.

В целом, экспедиции с использованием лодок и судов позволили собрать богатый набор данных о составе и истории дельты реки Лены и прибрежной зоны моря Лаптевых. Книга «Происхождение и развитие дельты реки Лены» освещает все затронутые вопросы по палеоэкологии дельты реки Лены и региона моря Лаптевых.

*Дмитрий Ю. Большианов, Ирина В. Федорова, Юлия Бойке*



## Мобилизация и отложения углерода в речной системе Лены

Большие реки российской Арктики переносят огромное количество растворенного и взвешенного органического вещества, в том числе биогенных элементов, в Северный Ледовитый океан. Основными источниками органического вещества являются почвы и отложения многолетнемерзлых пород водосборных бассейнов рек. Усиление процесса потепления и таяния мерзлоты в данном регионе оказывает воздействие и на органическое вещество. В результате деградации происходят изменения в составе и возрасте органического вещества после таяния, мобилизации и в ходе речного стока. Помимо этого, специфику органического вещества определяют тип почвы и местные гидрологические условия.

Летом 2009 и 2010 гг. были проведены две экспедиции для отбора проб в различных рукавах дельты Лены. Основной целью этих экспедиций было проследить потоки растворенного и взвешенного органического вещества от места их формирования и стока в местных отложениях до места их конечного оседания в Северном Ледовитом океане. Кроме того, было запланировано проведение мониторинга уменьшения запасов углерода в результате деградации мерзлоты. В ходе первой экспедиции 2009 г. были отобраны пробы воды и осадков во всех основных рукавах Лены: в Быковской,

Рисунок 1: Речное судно «Путейский 405» на берегу о. Самойловский (фото Г. Молленхауэр).





Трофимовской, Сардахской и Оленёкской протоках. Для этого было зафрахтовано судно речного класса «Путейский 405» (Рисунок 1). Экспедиционная команда, состоящая из одного русского и пяти немецких исследователей, погрузила в п. Тикси несколько ящиков с экспедиционным грузом на судно и отправилась в путь. Первоочередной задачей была установка временной судовой лаборатории в одной из двух кабин судна (Рисунок 2).

В ходе первого этапа экспедиции мы прибыли на о. Самойловский на рассвете. Пришлось разбудить научного руководителя станции, который, несмотря на ранний час, тепло нас встретил и угостил чаем в уютной кухне. В течение последующих 10 дней мы проплыли всю дельту Лены, отработали более 30 станций на различных участках в основных рукавах дельты. Пробы воды и осадков мы отбирали с помощью простого переносного ручного оборудования (Рисунок 3) и отфильтровали сотни литров воды. Если в ходе полевых исследований мы не могли вовремя вернуться на ночевку на о. Самойловский, то устраивались на ночлег на каком-нибудь из дальних и удивительно красивых островов дельты Лены.

В ходе экспедиции мы приобрели опыт жизни и работы на борту российского судна и испытали гостеприимство членов экипажа судна. Для преодоления языкового барьера нам приходилось нередко прибегать к жестикуляции. Мы с удовольствием познавали местную кухню, на второе часто подавали тушеную оленину (Рисунок 4). После выхода из дельты мы рискнули на судне речного класса пересечь морской залив Буор-Хая, довольно опасный при неблагоприятных погодных условиях.

Одним из самых впечатляющих и запомнившихся моментов экспедиции

Рисунок 2: Временная судовая лаборатория для обработки речных образцов на борту речного судна «Путейский 405»: фильтрующие устройства, контейнеры с образцами и записывающее оборудование (фото Г. Молленхауэр).  
Рисунок 3: Отбор проб воды из Лены с борта судна с помощью переносного батометра Нискина (фото Г. Молленхауэр).

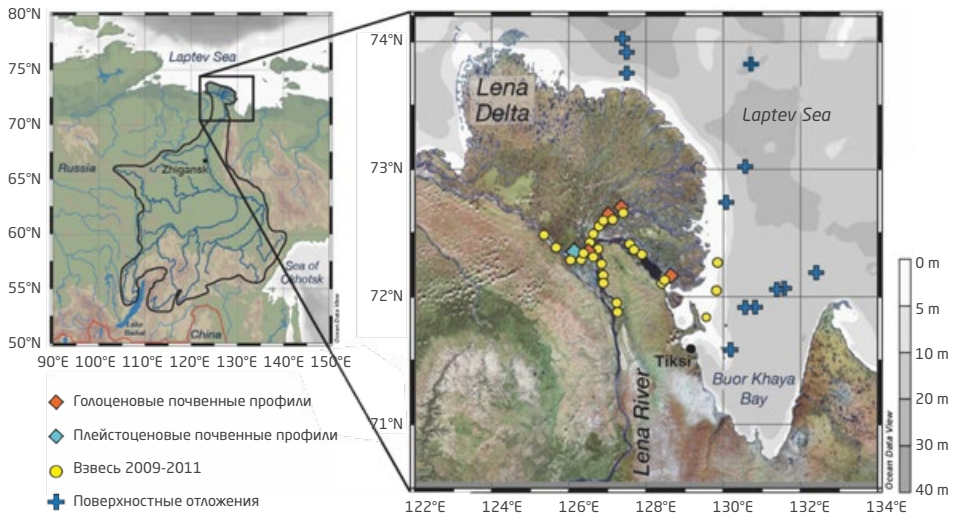


была ночевка на о. Муостах, где наш русский коллега Михаил (Миша) Григорьев проводил измерения эрозии побережья. Мы в это время познакомились с островом. Затем все встретились на пляже и разбили палаточный лагерь для ночевки (Рисунок 5). Миша показал нам, как разводить костер с помощью бересты, собранной на песчаном берегу. Сообща приготовили ароматный чай на костре. Миша достал из кармана небольшую фляжку с коньяком. Начиналось 23 августа, уже мягко падали на землю первые снежинки... В такой романтической обстановке был встречен день рождения нашего коллеги и друга.

Летом 2010 г. мы решили провести еще одну экспедицию в этом районе, используя опыт, накопленный в ходе предыдущей экспедиции 2009 г. На этот раз экспедиционная команда была больше и подразделялась на две группы. Обе группы по очереди использовали судно речного класса «Путейский 405» или береговой катер «ТВ-0012» для повторного исследования станций 2009 г. и для отбора проб воды и осадков в заливе Буор-Хая. Оба эти судна были построены не для научно-исследовательских целей, хотя, по сравнению с речным судном, береговой катер был более приспособлен для плавания в беспокойных водах залива с порывистыми ветрами и волнами. Две молодые немецкие аспирантки при поддержке лаборанта отбирали пробы воды и осадков. В распоряжении экспедиции были опять только простые портативные приборы, тем не менее, был отобран набор проб, сравнимый с серией проб предыдущего года. На этот раз группа коллег из Санкт-Петербургского университета проводила дополнительно гидрологические измерения. Импровизируя, экипаж берегового катера тоже сумел отобрать неглубокие керны осадков на побережье, вгоняя металлическую трубу в дно, что было похоже на загарпунивание большого млекопитающего.

Рисунок 4: Немецкие участники экспедиции в буфетной «Путейского 405» за обедом, приготовленным экипажем судна (фото Г. Молленхауэр).

Рисунок 5: Лагерь на берегу о. Муостах (фото Г. Молленхауэр).



Поздним летом 2013 г. нам удалось зафрахтовать небольшое судно Мурманского речного пароходства. Это судно использовалось для проведения исследовательских работ многими группами специалистов. Пробы воды и осадков отбирались по нескольким трансектам от устьев основных русел проток р. Лены (см. стр. 142-147). В целом, импровизируя и используя простые способы отбора проб и образцов, мы сумели собрать репрезентативный набор проб, который позволил нам изучить состав и возраст растворенного и взвешенного органического вещества, переносимого р. Леной, - от мест его возникновения (вымывания) до осаждения (Рисунок 6). Эти пробы были предметом изучения в двух кандидатских диссертациях и в двух магистерских работах. В настоящее время на основе этих результатов пишется бакалаврская работа. Они легли в основу международного исследовательского проекта, стартовавшего летом 2018 г.

Мы обнаружили, что взвешенное и растворенное органическое вещество в дельте Лены отражает состав местных отложений. Пробы были дифференцированы в соответствии с их происхождением. Это подчеркивает важность локального привноса в общую нагрузку стока органического вещества реки.

*Гезине Молленхауэр, Мария Винтерфельд, Борис П. Кох, Ирина В. Федорова*

Рисунок 6: Комбинированная карта с местами отбора образцов из экспедиций 2009, 2010 и 2013 гг. Пробы из поверхностного слоя воды были отобраны в 2013 г.



## Голоценовые озера в районе дельты Лены

Палеолимнологические исследования озер в районе дельты Лены были проведены в ходе экспедиций 1998, 1999, 2009, 2010 и 2017 годов (Рисунок 1). Начиная с 2003 г., район исследований был расширен и включал различные озера Восточной Сибири. Лимнологические исследования финансировались российско-германскими институтами-партнерами и некоторыми дополнительными грантами под эгидой программы «Сиблейк» (SibLake).

Район исследований простирался от тундры до подзоны северной тайги в Якутии, Верхоянских горах и доходил до Камчатки на Тихом океане. Исследования были запланированы таким образом, чтобы полностью охарактеризовать изменения природной среды Сибири как в пространственном, так и во временном отношении. Их можно сравнить с предсказаниями погоды на основе климатических данных, поставляемых многочисленными метеорологическими станциями. Особый акцент был сделан на отрезке времени, начиная с последнего ледникового периода и голоцена. Исследуемый период времени включал в себя естественные колебания климата последних

Рисунок 1: Палеолимнологические исследования в районе дельты р. Лены: озеро Николай-Кюеле (1998/1999), безымянные озера возле Тикси (2009), озера Кютюнда и Эльгене-Кюэле (2010), озера Гольцовое и Песцовое возле поселка Тикси (2017).

Рисунок 2: Полевой лагерь и тренога для бурения отложений на озере Кютюнда (фото Б. Дикман).

приблизительно 50000 лет, до последнего отрезка времени – эпохи климатических изменений, вызванных антропогенным воздействием.

Полевые исследования были сфокусированы на отборе проб из озерных отложений. Отобранные пробы постоянно анализировались в лабораторных условиях с применением метода радиоуглеродного датирования, а также с использованием седиментологического, геохимического и микропалеонтологического методов.

Конец летнего сезона в рамках российско-германской экспедиции «Лена-2010» может послужить примером того, как была богата приключениями жизнь и работа исследователей в Арктике.

3 сентября 2010 г.: последний перелет через бесконечную тундру северо-восточной Сибири. Наконец-то видны первые следы цивилизации на горизонте. Мы приземляемся и последний раз выгружаем из вертолета примерно две тонны экспедиционного груза. Мы вернулись в Тикси, последний оплот русской цивилизации на краю Арктического океана. Позади нас лежат три недели полевых исследовательских работ, проведенных на двух озерах к югу от дельты Лены.

В начале экспедиции мы добрались до озера Кютюнда (диаметром 3 км, глубиной 5 м), лежащего в лесной зоне в 300 км на юг от Тикси. Нас приветствовали мириады комаров и мошкар, они, однако, быстро исчезли с наступлением морозных осенних ночей. Мы разбили лагерь на мягком торфяном грунте (Рисунок 2). В полночь можно было любоваться потрясающими закатами – предвестниками скорого убывания белых ночей. Полевые работы были вполне успешными: мы смогли получить восьмиметровые керны отложений, документирующие историю развития озера на протяжении последних 11000 лет – от голоцена до настоящего времени.

Через 10 дней нас перебросили вертолетом к новому месту исследований – к озеру Эльгене-Кюёле, лежащему примерно в 200 км на север от первого. Здесь мы познали суровую сторону тундры. Погода стояла ветреная и дождливая, холодные и сырые ночи заметно прибавлялись во времени. Передвижения по мягкому, неровному и сырому грунту, под аккомпанемент синхронного чавканья наших холодных резиновых ботов, были мучением. Но все это нисколько не снижало нашего энтузиазма по поводу предстоящих полевых работ в таких многообещающих для исследований местах.

Озеро Эльгене-Кюёле лежит в аласовой котловине размером 3 на 5 км и глубиной в 20 метров, в основном покрытой заиленными участками (Рисунок 3). В настоящее время оно имеет размер 3 на 3,5 км и ограничено с западной стороны крутыми склонами ледового комплекса пород, представленного впечатляющими обрывами Едомы плейстоценового возраста с массивными ледяными жилами. В результате термоденудационных процессов ледовый



комплекс, или в простонародье «Едома», похож на яичную коробку, за счет типичных для термоденудации и терморазмыва просадок почвы в силу растепления мерзлых пород и скопления остатков мерзлой лессовидной породы в форме «подушек» между ледяными жилами.

Высокий гребень трехметровой высоты окаймляет восточное побережье озера. Этот гребень переходит в подобие старой террасы, на который мы и разбили лагерь. Терраса была покрыта молодыми торфяными залежами. Под ними лежали ископаемые субаквальные отложения с многочисленными вкраплениями древесины и ископаемых остатков из более теплых времен раннего голоцена. Наши полевые работы начались с батиметрических измерений озера. Они показали неровный подводный рельеф с бесчисленными субаквальными впадинами неправильной формы глубиной до 10 метров.

В четырёх характерных местах с различной глубиной были отобраны керны отложений длиной до 5 метров (Рисунок 4). Были отобраны также образцы ископаемых остатков в озере, торфа со старой террасы на склоне озера, отложений Едомы и донного льда. В дальнейшем лабораторные исследования образцов и проб показали, что историю развития озера определяли такие

Рисунок 3: Вид на север, на термокарстовую просадку озера Эльгене-Кюёле (фото Б. Дикман). Левая граница озера с небольшими дельтами, возникшими при переотложении осадков в береговых оползнях.



процессы, как термокарст, изменение уровня воды в озере, размыв побережья и миграция берегов в течение голоцена.

*Бернхард Дикман, Борис Бискаборн, Людмила А. Пестрякова, Дмитрий А. Субетто, Дмитрий Ю. Большианов, Ульрике Херцшу, Георг Швамборн, Фолькер Рахольд*

Рисунок 4: Часть керна отложений из озера Эльгене-Кюёле, показывающая слои смещенных из-за оползня отложений, заключенных в темном, насыщенном органикой, озерном иле (фото Д. Субетто).



## Комплексные логистические операции - воздушные наблюдения за потоками тепла и парниковых газов с использованием комплекса аппаратуры «Helipod»

Двумя из наиболее актуальных вопросов, касающихся процессов, происходящих в Арктике из-за потепления и влияющих на климат, являются: каков объем выбросов парниковых газов (ПГ), углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и метана (CH<sub>4</sub>) из районов Арктики, где существует вечная мерзлота? оказывает ли потепление влияние на динамику энергии и ПГ уже сейчас?

Локальный мониторинг обмена теплом и ПГ между вечной мерзлотой и атмосферой может проводиться с помощью так называемого метода микровихревой ковариации (см. страницу 76-81), что обеспечивает непрерывность наблюдения и, при наличии долговременного финансирования и технического обеспечения (т.е. продолжающихся десятилетия), позволяет выявить появление потенциальных изменений и новых тенденций в условиях межгодовой изменчивости. Однако эти типы наблюдений все еще редки в Арктике, а выбор площадки для наблюдений ограничивается в том

Рисунок 1: Карта маршрутов полетов в июне (в сторону северо-запада) и августе (в направлении северо-северо-запада) 2014 года, с цветовой кодировкой в соответствии с концентрациями CO<sub>2</sub>.



числе и логистическими соображениями. Как следствие, такие наблюдения охватывают лишь небольшие районы, и не всегда ясно, действительно ли они являются репрезентативными для более широких изучаемых областей. Тем не менее, этот же метод может быть использован в исследованиях с помощью летательных аппаратов, вертолетно-буксируемых сенсорных систем и беспилотных летательных аппаратов (дронов). Благодаря воздушным измерениям возможно покрыть расстояния в сотни километров за несколько часов и тем самым преодолеть пространственные ограничения наземных наблюдений. Однако их недостаток заключается в том, что с их помощью можно получить только моментальные снимки. Сочетание этих двух подходов является перспективным для точного понимания того, насколько экосистемы вечной мерзлоты способствуют увеличению количества парниковых газов в атмосфере в региональном масштабе.

#### **Первые воздушные измерения потоков тепла и парниковых газов в дельте реки Лены**

В 2012 году с острова Самойловский был запущен вертолетно-буксируемый комплекс аппаратуры «Helipod», чтобы проверить, насколько воздушные измерения подходят для количественной оценки потоков тепла и парниковых газов по всей дельте реки Лены. «Helipod», принадлежащий Брауншвейгскому техническому университету, весит около 350 кг, а его длина составляет 5 м. На первых порах, чтобы доставить его из «ангара» (палатки за исследовательской станцией) на вертолетную посадочную площадку, нужно было прикладывать физическую силу - любимое занятие всех участников этого процесса. К счастью, в дальнейшем это стало сводиться лишь к поднятию «Helipod» на прицеп, крепившийся к мотовездеходу (квадроциклу). Затем «Helipod» крепили к российскому вертолету МИ-8 веревкой длиной 30 м и буксировали по дельте с воздушной скоростью 40 м/с-1. Это позволяло с высокой точностью провести метеорологические измерения микровихревых (турбулентных) колебаний ветра, влажности, CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, а также температуры поверхности земли с помощью инфракрасной съемки. Каждый метеорологический параметр измерялся двумя друг друга дополняющими датчиками, один из которых обладал коротким временем отклика и низкой абсолютной точностью, а другой - более долгим временем отклика, высокой точностью и долговременной стабильностью. Полученные с помощью них наборы данных были объединены с помощью взаимно-дополнительного фильтра.

Два полета, запланированные на 2012 год, были сняты съемочной группой общественной телерадиовещательной компании «Rundfunk Berlin-Brandenburg» («Geheimnisse im Eis der Erde», RBB) в рамках 45-минутного документального фильма об экспедиции «ЛЕНА 2012».



Рисунок 2: Комплекс аппаратуры «Heliprod» перед началом первого исследовательского полета в 2012 году.

Рисунок3: Комплекс аппаратуры «Heliprod», буксируемый мимо метеорологической вышки для измерения потоков НИС «О. Самойловский».

Поскольку доступность вертолетных исследований была сравнима с шансом выигрыша в лотерею, только один полет был проведен при оптимальных для измерений погодных условиях над Ледовым комплексом «Едома» (третья терраса дельты реки Лены), в северо-западном направлении вдоль Оленекской протоки. Второй полет - при менее благоприятных условиях - охватывал вторую террасу по направлению к острову Арга-Муора к северо-северо-западу от острова Самойловский. План полета включал калибровку оборудования после взлета, чтобы подстроиться под силу ветра, измерения вертикальных профилей в начале и конце каждого трансекта, чтобы определить высоту пограничного слоя атмосферы, и исследование потоков над длинными (100-130 км) трансектами низкой высоты.

В то время как при первом взлете потоком воздуха от винта вертолета МИ-8 был «всего лишь» снесен «ангар» для комплекса «Helipod», неудачное происшествие во время второго взлета привело к смещению и изгибу решетки GPS-антенны «Helipod». К счастью, это удалось исправить во время последующей обработки данных.

#### **Интенсивная воздушная кампания 2014 года**

Благодаря многообещающим результатам проведенного в 2012 году испытания системы «Helipod», было выделено крупное финансирование для интеграции в него  $\text{CH}_4$ -датчика с коротким временем отклика, и на 2014 год



Рисунок 4: Комплекс аппаратуры «Helipod» над полигональной тундрой дельты реки Лены.

была запланирована интенсивная исследовательская кампания. Начиная с апреля, чтобы охватить и оставшиеся с зимы условия, полеты проходили по тем же трансектам, что и в 2012 году, от станции острова Самойловский к побережью. Дополнительный полет был проведен над первой террасой к северо-востоку от дельты, чтобы расширить область исследований. Вторая кампания была проведена в мае и июне во время таяния снегов и вскрытия рек, чтобы исследовать динамику потоков тепла и парниковых газов при переходе от зимы к лету. Несколько финальных полетов состоялись в августе во время пика вегетационного периода и близко ко времени, когда глубина оттаивания активного слоя максимальна.

### **Предварительные результаты**

Последующая обработка первичных данных, полученных комплексом «Helipod», оказалась намного сложнее, чем предполагалось. К этому времени практически все эксперты по комплексу аппаратуры «Helipod» из Брауншвейгского технического университета либо сменили место работы, либо покинули занимаемые должности, в то время как сама система сбора и обработки данных требует углубленного анализа. Первые результаты показывают, что программное обеспечение для последующей обработки данных GPS-системы определения ориентации в пространстве, в частности, должно быть адаптировано к неблагоприятной геометрической конфигурации группировки спутников GPS в высоких широтах, так как неизбежные перемещения спутников во время полетов привели к нарушению непрерывности измерений всех переменных позиционирования и ориентации. Несколько научных проектов находятся в стадии ожидания, чтобы нанять сотрудника, необходимого для адаптации программного обеспечения и применения расширенных алгоритмов для более точного определения вектора ветра, который является базовым параметром для измерений потоков. Коспектральный анализ в настоящее время все еще показывает корреляцию между компонентами ветра и переменными состояния движения.

Следует отметить, что данные по концентрации ПГ вдоль траекторий полета, приведенные на Рисунке 1, уже сейчас показывают, что существует ее значительная пространственная и внутрисезонная изменчивость: концентрации обычно варьируются в пределах до 5 ppт (миллионных долей) в течение любого из полетов. В то время как разница концентраций, равная около 15 ppт между полетами в начале вегетационного периода и ближе к его пику, свидетельствует об эффекте двухмесячного фотосинтеза тундры.

*Торстен Закс, Эрик Ларману, Катрин Конерт, Андрей Серафимович*



## Привлечение новых групп ученых из Германии к исследованиям в ходе экспедиций «Лена»

Успешное начало в организации российско-германского сотрудничества, в том числе основательное финансирование, дало положительные импульсы для развития этого сотрудничества и в дальнейшем, без дополнительных программ поддержки и грантов. Привлеченные успешными результатами коллег, уже достигнутыми в рамках совместных российско-германских исследований в море Лаптевых, новые группы исследователей, специализирующихся на дистанционном зондировании, изучении побережья, биологии, органической химии, проявили интерес к участию в научно-исследовательской программе и к проведению совместных работ в районе моря Лаптевых.

Рисунок 1: август 2008, Групповой снимок перед НИС «О. Самойловский».

Слева направо в нижнем ряду сидящих: Гюнтер (Моло) Штооф (АВИ Потсдам), Тина Зандерс (Гамбургский Университет), Карен Вилтшир (АВИ Хельголанд), Конрад Копш (АВИ Потсдам), Сергей Волков (инспектор УЛЗ), Нико Борнеман (АВИ Потсдам), Моритц Лангер (АВИ Потсдам);

во втором ряду сидящих: Карстен Райзе (АВИ Зюльт), Ирина Федорова (Санкт-Петербургский государственный университет);

стоят: Петр Ивлев, Ханс-Вольфганг Хуббертен (АВИ Потсдам), Марен Грюбер (АВИ Потсдам), Роланд Дёрффер (Центр им. Гельмгольца в Геестхахте, исследования побережья);

третий ряд: Ингеборг Буссман (АВИ Хельголанд), Дирк Менгедот (Отдел мат.-тех. обеспечения АВИ), Михаил Григорьев (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Якутск), Вальдемар Шнайдер (АВИ Потсдам), Сузанне Либнер (Швейцарская высшая техническая школа, Цюрих, Германская служба академических обменов), Светлана Евграфова (Институт леса им В.Н. Сукачева, Красноярск), Пауль Овердуин (АВИ Потсдам).



Летом 2008 г., в рамках исследовательской программы PACES Ассоциации Гельмгольца «Полярные регионы и побережье в изменяющейся системе Земли», была организована новая экспедиция с целью изучения экосистемы в районе моря Лаптевых. Участники экспедиции - специалисты по изучению экосистемы побережий Северного и Балтийского морей - были доставлены на НИС «Остров Самойловский» в дельту Лены (Рисунок 1) и во внутренний и западный районы моря Лаптевых на судне «Орлан» (приписанном к Усть-Ленскому заповеднику) и на вертолете. Роланд Дёрффер (Центр им. Гельмгольца в Геестхахе, исследования побережья) снял документальный фильм об этой экспедиции, в котором представлены научные проекты и ученые, занимающиеся изучением данного региона. В ходе этой ознакомительной экспедиции родилась идея о функции дельты Лены в качестве биофильтра и целый ряд иных научных гипотез по всему спектру научных дисциплин. Общий энтузиазм участников экспедиции в 2008 г. и их интерес к дальнейшим исследованиям побудил их организовать летом следующего, 2009 года, новую морскую экспедицию в центральный район дельты Лены и в залив Буор-Хая. Экспедицию 2009 г. возглавлял Михаил Григорьев, ныне заместитель директора по научной работе Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова в Якутске. Экспедиционная команда отбирала пробы



донных отложений в море, в реке и на суше, пробы прибрежной морской и речной воды, а также пробы насыщенных органикой высокольдистых прибрежных обнажений (Рисунок 2а-с).

Работа по отбору проб на Лене была продолжена летом 2010 г. в сотрудничестве с гидрологами Санкт-Петербургского государственного университета под руководством Ирины Федоровой, и даже продлена до осени (см. Рисунок 3). Участники экспедиции проводили регулярный отбор проб на озерах о. Самойловский и на Лене, а также эксперименты по биохимическому разложению органического материала для изучения его временной динамики и стабильности в реке и в термокарстовых озерах.

В ходе морской экспедиции 2010 г. (Рисунок 4) пробы воды и отложений отбирались также и на шельфе, в отличие от экспедиций 2008 и 2009 гг., сфо-

Рисунок 2а: август 2009, Отбор проб в заливе Буор-Хая и в р. Лене.

Рисунок 2b: август 2009, Вид на экспедиционный палаточный лагерь на о. Муостах.

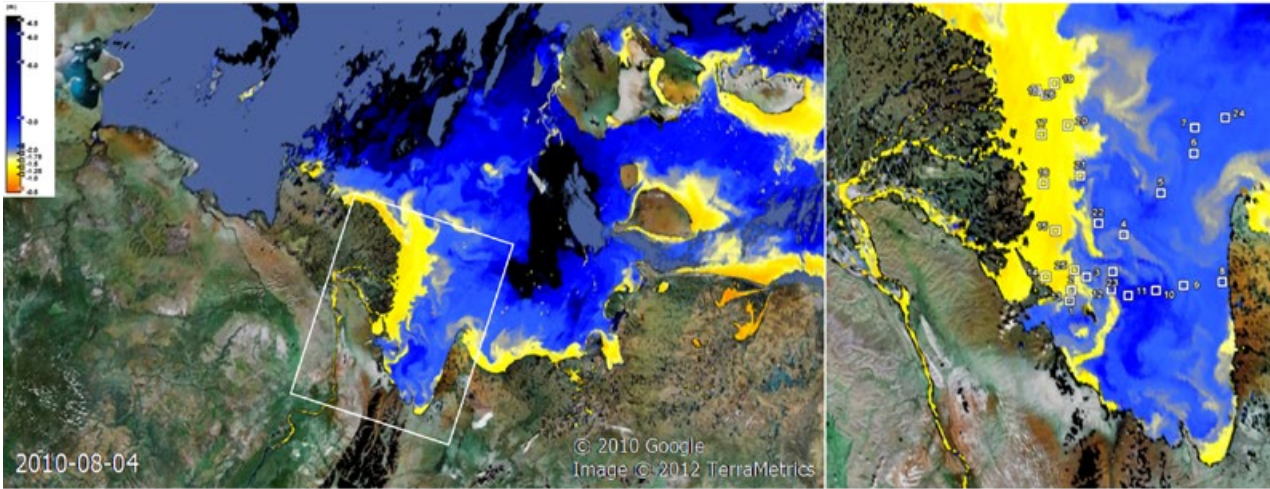
Рисунок 2с: август 2009, Двухнедельный оптический эксперимент по разложению органики в речной ленской воде, проведенный на борту судна.



кусированных на отборе проб в прибрежной зоне, находящейся под воздействием суши. Теперь центр внимания был перенесен с прибрежных вод на морские, особенно на область перехода от прибрежных систем к морским. Полученные в ходе экспедиций 2008-2010 гг. данные стали ценным вкладом и в развитие методов дистанционного зондирования Земли из космоса. Результаты были использованы, например, для проверки достоверности данных, полученных от спутниковых сканеров цвета моря. Экспедиционные данные показали, что высокое содержание органики в прибрежных водах привело к слишком большому, на целый порядок, искажению данных по концентрации хлорофилла, полученных в ходе мониторинга распределения взвешенного вещества и цветения вод при дистанционном зондировании Земли. Представители других научных дисциплин были также удовлетворены результатами первых экспедиций и поддержали проведение исследований в мелководных районах с судов небольшого размера.

Рисунок 3: август 2010, Антонина Четверова (Санкт-Петербургский государственный университет), Ирина Федорова (Санкт-Петербургский государственный университет, Лаборатория полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта), Рут Флерус (АВИ). Русско-немецкий коллектив гидрологов в ходе регулярного отбора проб воды из р. Лены и из термокарстовых озер на о. Самойловский летом 2010 г.





В 2007-2012 гг. новые коллеги из Германии дополнили уже активно работающее сообщество ученых из обеих стран. За счет притока новых сил и научных идей расширился и спектр исследований в дельте Лены и в прибрежных районах моря Лаптевых, что было положительно встречено и российской стороной. Научные исследования в этом районе успешно продолжаются и поныне.

*Биргит Хайм, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Пьер Пауль Овердуин, Ирина В. Федорова*

Риунок 4: Район моря Лаптевых и дельта Лены (слева), и станции, опробованные с 29.06 по 07.08.2010 в ходе морской экспедиции «Лена 2010», в заливе Буор-Хая (справа). Цветное кодирование показывает первую аттенюацию глубины (Z90), полученную из спутниковых сканеров цвета MERIS. Съемка 04.08.2010, облака отмечены цветом от темно-серого до черного. Изображение материковой суши основано на съемках Google Earth™ Land Mosaik (© 20120 Google, Image © 2012 TerraMetrics).

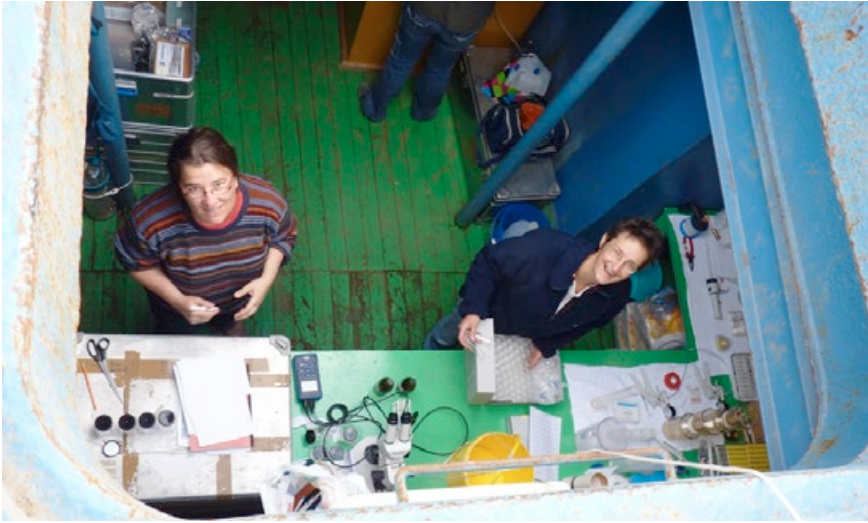


## Десятилетие прибрежных исследований в дельте реки Лены

Лучшее понимание прибрежных систем в Сибирской Арктике имеет важное значение, поскольку этот регион очень чувствителен к экологическим изменениям. Колебания речного стока и температуры речной воды влияют на температуру воздуха, морской воды и вечной мерзлоты в дельте реки Лены. Вероятнее всего, эти изменения приведут к трансформации экосистемы арктического шельфа. Во время прибрежных исследований мы изучаем процессы, происходящие при переходе от суши к морю, начиная с флювиального переноса массы, гидрографии и химического состава воды и заканчивая прибрежной геоморфологией и подводной вечной мерзлотой.

С 2008 года в регионе проводились несколько экспедиций с использованием малогабаритных судов. Морской шельф моря Лаптевых является широким и мелким, а местная доступность подходящих судов является дополнитель-

Рисунок 1: Высадка с судна «Орлан» в 2008 году (фото К. Кош).

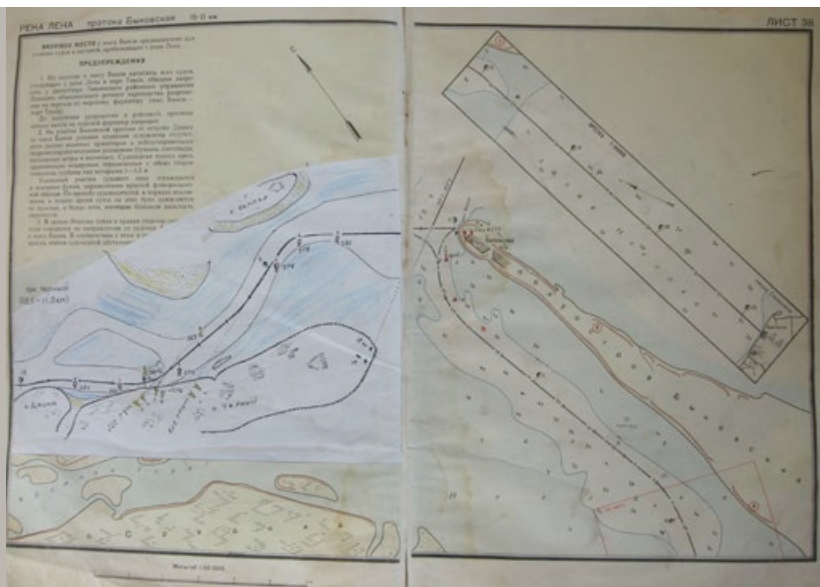


ным ограничивающим фактором для прибрежных исследований. Морские суда с большой осадкой не могут достичь мелких прибрежных районов, а речные суда с небольшой осадкой не могут быть использованы в открытом море. Подход к берегу для проведения работ на суше является затруднительным, вне зависимости от типа судна. Для перевозки членов экспедиции между крупногабаритными судами и берегом используются небольшие лодки. Речные суда либо встают на якорь на песчаных отмелях, либо подходят близко к берегу, что позволяет осуществить выгрузку с помощью лестницы или доски. Так или иначе, во время высадки можно основательно промокнуть (Рисунок 1).

Практически ни одно судно из использовавшихся не было исследовательским по своему назначению. Это значит, что все оборудование для отбора и обработки образцов должно было быть погружено на борт. Большинство наших устройств (таких как пробоотборники воды и отложений) были переносными. Пространство на борту судов было ограничено, и мы быстро научились импровизировать и преобразовывать доступные рабочие места и другие небольшие кусочки пространства в «миниатюрные лаборатории» (Рисунок 2).

В первые годы мы сталкивались с навигационными проблемами. Доступ к навигационным картам был ограничен, а подробное планирование маршрута осуществлялось на месте, полагаясь на опыт экипажа и исправленные вручную карты рек (Рисунок 3). Позже стало возможным приобрести карты заранее (Рисунок 4). С недавних пор более широкое распространение получила навигация с использованием портативных систем GPS.

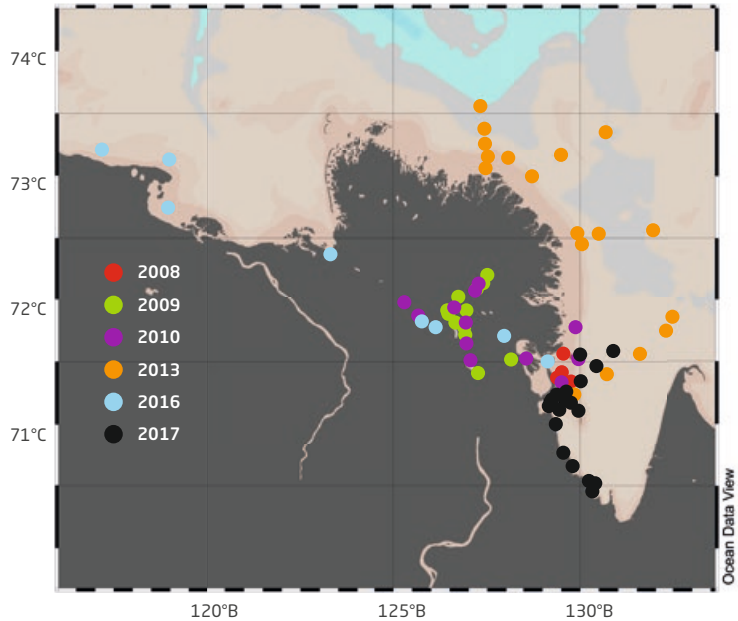
Рисунок 2: Работа внутри корабля «ТБ 0012» (фото М. Лёдер).



Плавание на судах «Орлан» и «Путейский 405» проводилось главным образом в виде нескольких однодневных поездок. Каждый вечер мы либо возвращались на НИС «О. Самойловский», либо разбивали палатки на берегу. Рабочий график был очень гибким. Иногда нам приходилось возвращаться в палатки из-за плохой погоды и заново быть на борту в 4 часа ночи, потому что погода улучшалась настолько, что мы могли проводить исследования на судне. Высокая динамика системы наносов в дельте реки Лены иногда приподносила такие сюрпризы, как, например, внезапное перемещение песчаных наносов отмели и, как следствие, столкновение с ними судна. Из-за таких резких остановок лабораторная работа, такая, к примеру, как фильтрация и наливание воды, становилась достаточно сложной процедурой.

На более крупных судах, таких как «ТБ-0012» и «Николь» (15 м), мы могли воспользоваться кабинами, а также пообедать вместе с членами экипажа. Жизнь и научная работа на борту исследовательского судна «Дальние Зеленцы» была хорошо организована - в нашем распоряжении были несколько лабораторий, кают и большая столовая. Малогабаритный пассажирский катер венецианского происхождения «Николь» с корпусом, армированным стекловолокном, используется ежегодно с 2016 года. При хороших погодных условиях «Николь» развивает большую скорость и позволяет легко добраться до отдаленных участков полевых работ.

Рисунок 3: Речная карта 2009 года (фото Г. Каттнер).



Именно благодаря этой пестрой коллекции транспортных средств мы смогли получить важные исходные данные и ключевую информацию о большой области в дельте реки Лены и прилегающих прибрежных водах за последние десять лет совместных прибрежных исследований.

В 2008 году с судна «Орлан» экспедицией с А. Гуковым в качестве ведущего исследователя был сделан забор проб из реки Лены вокруг НИС «Остров Самойловский». На обратном пути в Тикси были собраны дополнительные образцы воды и отложений для проверки спутниковых данных. В 2009 году судно «Путейский 405», ведущими исследователями на котором были И. Федорова и Г. Каттнер, было использовано для повторного забора проб в дельте реки Лены для подробного анализа химического состава растворенного и взвешенного органического вещества.

В 2010 году нам удалось зафрахтовать два судна для двух исследовательских групп. «Путейский 405» работал на реке Лене, а «ТБ 0012» в ее дельте (Рисунок 6). Бурные волны помешали попытке перемещения исследовательских групп и оборудования между судами непосредственно на шельфе дельты. Соответственно, оба корабля были вынуждены вернуться в бухту, защищенную полуостровом Быковский. Исследование, проведенное в 2010 году, касалось состава и распределения фитопланктона в дельте, а также распространения метана в шлейфе реки.

Рисунок 4: На мостике «ТБ 0012» с капитаном и офицером (фото И. Буссманн).

Рисунок 5: Карта исследуемой местности.



В 2013 году речное судно «Дальние Зеленцы» было использовано нами совместно с коллегами из Мурманского морского биологического института (Рисунок 7). Начало экспедиции было отложено из-за задержки перелета из Мурманска в Тикси. Однако нас ожидала еще более продолжительная задержка: лед в проливе Вилькицкого замедлил ход исследовательского судна, также двигавшегося из Мурманска в Тикси. Благодаря огромным усилиям наших немецких и российских отделов логистики, мы в итоге смогли получить шесть дней корабельного времени. На судне «Дальние Зеленцы» нам удалось добраться до северной части дельты и получить новые сведения о распространении и разбавлении люминесцентного растворенного органического вещества, фитопланктона и метана, а также о влиянии субмаринных подземных вод.

В 2016 году катер «Николь» был зафрахтован для долгого рейса из Тикси на запад через дельту реки Лены. Остановка для дозаправки на НИС «Остров Самойловский» позволила нам добраться до западной части моря Лаптевых через Оленекскую протоку. На самом западном этапе поездки мы совершили высадку в месте проведения экспедиции «COAST 2005», чтобы посетить участок, на котором располагалась буровая скважина. Оказалось, что «Николь» - это достойная, не боящаяся шторма база для океанографических исследований и изучения подводной вечной мерзлоты, включавших проверку данных спутникового мониторинга цвета океана и исследований распределения подводной вечной мерзлоты и метана.

В августе 2017 г. ранее не изучавшиеся участки юго-западных берегов залива Буор-Хая были исследованы на катере Николь (Рисунок 8). Во время поездки мы получили GPS-данные о рельефе и собрали материал для радиоуглеродного датирования. Мы хотели определить потенциал полевых объектов как палеоэкологических архивов для реконструкции уровня моря и силы морских волн эпохи голоцена.

Необыкновенно плодотворное российско-германское научное сотрудничество в необыкновенных условиях с необыкновенной логистической базой повлекло за собой десять лет необыкновенно успешных исследовательских начинаний в необыкновенном окружении. Мы с нетерпением ждем следующих десяти лет совместной работы.

*Ингеборг Буссманн, Дмитрий Ю. Большиянов, Ирина В. Федорова, Михаил Н. Григорьев, Александр Ю. Гуков, Герхард Каттнер, Александра Краберг, Денис В. Моисеев, Пьер Пауль Овердуин, Лассе Зандер, Карен Х. Вилтшир*

Рисунок 6: «ТБ 0012» в 2008 году вблизи полуострова Быковский (фото И. Буссманн).

Рисунок 7: Исследовательское судно «Дальние Зеленцы» в порту Тикси (фото А. Краберг).

Рисунок 8: «Николь» (фото П. Овердуин).



5.

Новые горизонты экспедиций  
«Лена» - новая НИС «Остров  
Самойловский»

(Фото П. Верзоне)







## Визит премьер-министра В.В. Путина на остров Самойловский (День-П)

Временами случаются дни, когда с вами происходит что-то поистине уникальное. Одним из таких дней стало 23 августа 2010 года, когда Владимир Путин, занимавший в то время пост премьер-министра, посетил российско-германскую полярную научно-исследовательскую станцию «Самойловский». Этот день, получивший негласное название «День-П», и, кстати, являющийся днем рождения Михаила (Миши) Григорьева, стал очень особенным событием, длившимся всего несколько часов, но кардинально изменившим жизнь на маленьком острове.

Все началось за несколько недель, с появлением слухов о том, что премьер-министр В.В. Путин посетит российский Север, и, возможно, приедет в дельту Лены. Слухи стали выглядеть реалистичными с увеличением в дельте активности передвижения вертолетов и моторных лодок, а немного погодя, на одном из небольших островов, всего в нескольких километрах от острова Самойловский, был построен временный лагерь. Затем нас посетили личные сотрудники Путина. Они пригласили нас во временный лагерь на предмет планирования научной презентации, которую мы могли бы представить премьер-министру, но мы, в свою очередь, предложили показать наш остров Самойловский со всем установленным на нем научным оборудованием. После нескольких посещений острова службой безопасности и личных советников, визит был согласован.

Рисунок 1: Исследователи приветствуют премьер-министра Владимира Путина на о. Самойловский.



С каждым днем ожидания напряженность возрастала, а затем пришел День-П. Возникающие на горизонте первый, второй, третий, четвертый вертолеты приземлялись, из них высаживались журналисты и сотрудники службы безопасности, и, внезапно, количество людей на острове увеличилось с 20 до более ста. Странные люди наводнили остров, некоторые носили автоматы, другие фотографировались, часть снимала видео и интервьюировала ученых. Затем на горизонте появился пятый вертолет, большой белый МИ-8, и мы уже знали, что это – он. Вертолет приземлился, премьер-министра встретили экспедиционные «начальники», и процессия двинулась в сторону заранее подготовленного научного парка. Путину рассказали о совместной научной работе российских и немецких коллег, посвященной сибирской вечной мерзлоте, показали полевые эксперименты, связанные с микрометеорологией, исследованиями потоков парниковых газов, а также палеоклиматическими исследованиями Института им. Альфреда Вегенера (г. Потсдам), университетов Гамбурга и Кёльна, Института Арктики и Антарктики (г. Санкт-Петербург), Института мерзлотоведения (г. Якутск), Московского государственного университета и Института леса (г. Красноярск).

Наше общение проходило очень близко, мы объясняли, чем занимаемся, и экологические особенности региона, и даже пробурили вечную мерзлоту вместе с Владимиром Путиным – одним из самых влиятельных людей на этой планете – чтобы показать, что мерзлота находится всего в десятках сантиметров под его ногами. Во время бурения он с улыбкой спросил, представляем ли мы себе, сколько стоит час его работы? Выяснилось, что он был бы очень дорогостоящим буровым ассистентом. По нашему впечатлению, он наслаждался своим пребыванием на острове, был открыт для общения, и, безусловно, выглядел гораздо более по-человечески привлекательным, чем по телевизору. Он превосходно говорил по-немецки, когда обсуждал что-то с немецкими учеными, и даже поправил своего переводчика, когда тот допустил небольшую ошибку в переводе для русских коллег.

Рисунок 2: Светлана Евграфова рассказывает В. Путину о важности микробной деятельности в вечной мерзлоте.  
Рисунок 3: Бурение вечной мерзлоты вместе с В. Путиным (Х. Майер, А. Деревягин).



Позже Путин посетил научную станцию - два простых, но уютных деревянных домика, где за деревянным столом между премьер-министром и членами экспедиции состоялся разговор, который был снят для российского телевидения. С российскими и немецкими учеными и студентами Владимир Владимирович обсудил текущую ситуацию и будущее совместных полярных исследований в России. Во время беседы Миша получил из рук премьер-министра Путин подчёркнул, что мы выполняем чрезвычайно важную работу, но добавил, что живем здесь при этом «как бомжи», а затем сказал, что подпишет контракт на строительство новой научно-исследовательской станции на острове. Так, особенный день и короткий визит изменили судьбу нашего маленького острова.

Сейчас, в 2018, оглядываясь назад, мы можем с благодарностью сказать, что Путин сдержал свое обещание. Строительные работы начались летом 2011 года, и новая, современная сине-бело-красная станция была готова к 2013 году, когда, в апреле, первая в году экспедиционная команда жила уже на новой станции. Впечатляющее новое здание станции функционирует круглый год, управляется фантастической командой под руководством Фёдора Селляхова и открывает множество недоступных нам ранее возможностей - современный лабораторный комплекс, транспорт и буровое оборудование, электричество, WiFi и горячий душ 24 часа в сутки, позволяя проводить полевые работы даже во время самой суровой сибирской зимы.

*Ханно Майер, Томас Опель, Александр Ю. Деревягин, Светлана Ю. Евграфова, Вальдемар Шнайдер, Александр С. Макаров, Михаил Н. Григорьев*

Рисунок 4: Участники экспедиции «Лена-Дельта» проводят «круглый стол» с В. Путиным.

Рисунок 5: Групповое фото участников экспедиции с премьер-министром Владимиром Путиным. Все фото сделаны 23.08.2010 Т. Опелем (АВИ, Потсдам).



## Новая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский»: строительство, церемония открытия, оборудование и эксплуатация

Научно-исследовательская станция «Остров Самойловский» строилась в 2011 и 2012 годах на основании постановления Правительства Российской Федерации о поддержке изучения экологических условий Арктики. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН) занимается организацией работы станции с 2012 года.

### **Строительство**

Строительство новой станции на острове началось летом 2011 года, сразу же после предварительных инженерных и геологоразведочных работ, которые предшествуют любому строительству. Сначала большое количество строительных материалов и модулей было доставлено на крупногабаритных судах из Архангельска в порт Тикси. Груз также включал экспедиционный транспорт, в том числе лодки, вахтовый автобус, буровой трактор и многое другое. Все это затем было отправлено на остров на речных баржах через мелкие каналы в дельте реки Лены.

Рисунок 1: Новая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский».



Около 100 рабочих прибыли на остров Самойловский, где они сначала построили временный жилой дом. Вскоре после этого прибыло много специального строительного оборудования. Затем рабочие начали забивать сотни стальных трубных свай в землю на глубину 15 м и заполнять их бетоном. В 2012 году каркас здания был готов. На строительной площадке началась многоплановая комплексная работа. В том же году, по решению российского правительства, новая станция была передана в ведение ИНГГ СО РАН в Новосибирске.

#### **Первые полевые работы**

Первая исследовательская экспедиция на новой станции была проведена весной и летом 2013 года. На станции все было отлично - мы чувствовали себя так комфортно, словно попали в дом отдыха. Единственным заметным отличием была полярная температура. Технический персонал станции и ее начальник Федор Селляхов делали для экспедиции все возможное. Так началась работа на станции.

#### **Церемония открытия**

Официальная церемония открытия станции состоялась 23 сентября 2013 года. Мы пригласили президента Владимира Путина принять участие в этой церемонии, поскольку именно ему мы были обязаны существованием новой станции, но в его администрации ответили, что, к сожалению, президент очень занят в этот период, но он передает нам свои наилучшие пожелания. Мы узнали, что в этот день президент принимал участие в Международной Арктической конференции в Салехарде. Некоторые из приглашенных гостей также не смогли присутствовать, потому что им было необходимо находиться в Салехарде, в том числе глава Республики Саха (Якутия), председатель

Рисунок 2: Доставка груза на остров Самойловский с помощью барж, июль 2011 г. (фото Г. Штооф).

Рисунок 3: Сваи для зданий новой станции, июль 2011 г. (фото В. Михеев).



Сибирского отделения Российской академии наук и другие. Однако многие другие гости посетили церемонию открытия. Они прибыли в Тикси самолетом через Якутск, а затем вылетели на вертолете на станцию. Для гостей была проведена экскурсия по станции и площадкам полевых исследований. Приветственные речи, перерезание красной ленточки, торжественное вручение ключей и подарков - все было очень красиво и символично.

В церемонии открытия станции приняли участие чиновники из правительства Якутии, руководители Сибирского и Дальневосточного отделений РАН, администрация Института им. Альфреда Вегенера из Германии, директора научных институтов и академики РАН, ведущие российские и немецкие ученые, принимавшие участие в экспедициях «Лена», генеральный консул Германии в Новосибирске, генеральный директор Федерального агентства специального строительства «Спецстрой России», а также журналисты информационных агентств, в том числе телеканала «Россия». На небольшой научной конференции гостям рассказали о задачах и перспективах работы новой станции, а затем состоялся торжественный ужин.

Гости получили массу положительных эмоций и многое узнали о деятельности экспедиции «Лена» в Арктике и будущих перспективах работы новой научно-исследовательской станции. Станция была официально открыта, и гости оставили нас, чтобы мы продолжили нашу работу в Арктике. Три флага, России, Германии и Якутии, были подняты при входе на станцию и установлены в конференц-зале.

Рисунок 4: Первая полевая команда исследователей экспедиции «Лена 2013» на новой станции, апрель 2013 г. (фото М. Григорьев).

Рисунок 5: Церемония открытия станции. Член Академии наук профессор Михаил Эпов (директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук в Новосибирске, слева), профессор Михаил Григорьев (заместитель директора Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук в Якутске, в центре) и Дмитрий Глушко (вице-президент Республики Саха (Якутия), прибывший из Якутска, справа) перерезают красную ленточку на новой станции (фото Х.-В. Хуббертен).



### Эксплуатация

С 2013 г. станция работает в постоянном режиме в течение всего года. Она оснащена современным научным и техническим оборудованием, необходимым для исследований в различных сферах (био- и геохимия, геофизика, климатические исследования, гидрология и т. д.). С точки зрения жилых условий станция также находится на мировом уровне.

Сибирское отделение Российской академии наук (СО РАН), совместно с Дальневосточным отделением Российской академии наук, Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом Росгидромета (АНИИ), Северо-Восточным федеральным университетом им. М.К. Аммосова, Институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (АВИ) и другими научными и образовательными организациями, разработало совместную программу исследований Арктики «Комплексные исследования состояния и эволюции окружающей среды Сибирской Арктики».

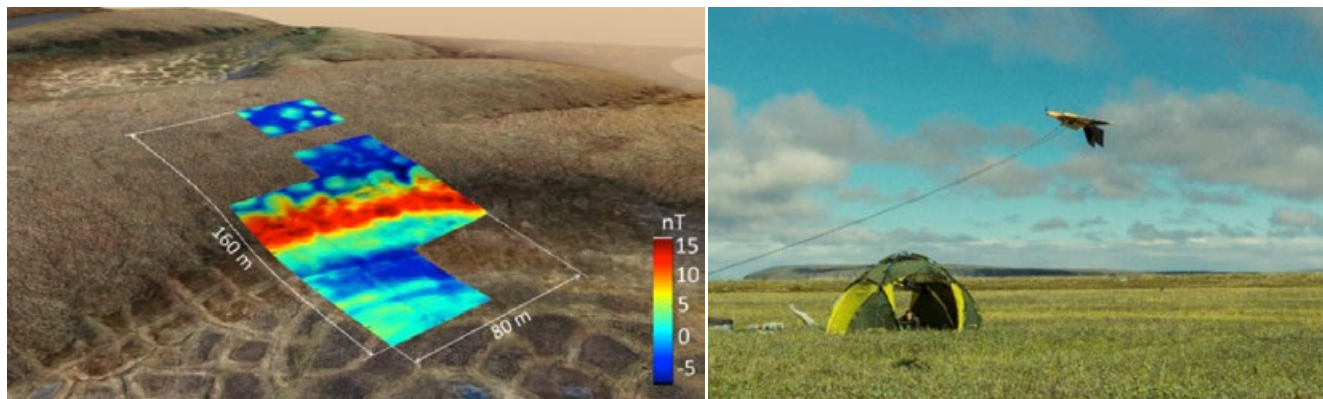
Каждый год исследователи из ИНГГ СО РАН, Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, АНИИ, АВИ и других российских и зарубежных научных и образовательных организаций выполняют большой объем научной работы в дельте реки Лены в составе совместной экспедиции.

Исследовательская программа направлена как на решение национальных исследовательских вопросов, рассмотрение которых уже начато указанными ранее российскими организациями, так и на работу в рамках других международных программ, а ее целью является изучение глобальных изменений, происходящих в Арктике (дельта реки Лены, район моря Лаптевых) в процессе эволюции региона.

Рисунок 6: Сопредседатели конференции, посвященной открытию станции. Слева направо: вице-президент Республики Саха (Якутия) Дмитрий Глушко, заместитель председателя Сибирского отделения Российской академии наук, директор ИНГГ СО РАН, академик Михаил Эпов, генеральный консул Германии в Новосибирске Найтхарт Хёфер-Виссинг, председатель Дальневосточного отделения Российской академии наук, академик Валентин Сергиенко, 23 сентября 2013 года (фото Х-В. Хуббертен).

Рисунок 7: Максимум весеннего половодья у новой станции «Остров Самойловский», 1 июня 2012 г. (фото М. Григорьев).





Основными целями проекта являются:

- 1 - Получение данных об истории развития области моря Лаптевых во время плейстоцена и голоцена (колебания уровня моря, палеоклимат, периоды обледенения, эволюция вечной мерзлоты, палеогеография);
- 2 - Оценка участия полярной тундры в глобальных выбросах парниковых газов (метан, углекислый газ) и определение интенсивности и происхождения выбросов газов в атмосферу для различных ландшафтов;
- 3 - Оценка объема твердого материала и углерода, переносимого реками в море Лаптевых в ходе береговой эрозии, а также объема органического углерода (геохимический цикл углерода в атмосфере и гидросфере);
- 4 - Изучение взаимодействия природных процессов в регионе и воздействия на них современных климатических изменений.

За последние годы ученые из ИНГГ СО РАН значительно дополнили исследования вечной мерзлоты в дельте реки Лены использованием некоторых геофизических методов, таких как магнитометрическая воздушная съемка, электротомографическая и электромагнитная съемка, тепловой мониторинг и т. д.

Ежегодная экспедиция на остров Самойловский, проводимая общей полевой исследовательской группой Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука и Новосибирского государственного университета, является хорошим примером междисциплинарного подхода к сложным исследованиям в Арктике. Эта экспедиция соединила в себе современные геофизические методы и богатый опыт новосибирских геологов, палеонтологов и палеомагнетологов, ботаников и почвоведов для исследования вечной мерзлоты в дельте реки Лены. Был изучен ряд интересных географических объектов, распространенных в арктических регионах: термокарстовые озера, аласы (осушенные котловины термокарстовых озер), бугры пучения,

Рисунок 8: Взлет беспилотника с оборудованием для аэрофотосъемки (справа); Аномальное магнитное поле, нанесенное на текстурированную цифровую модель ландшафта (слева).



озерные и подрусловые талики, эрозионные долины, едомные отложения, деградирующая подводная вечная мерзлота и многие другие.

Вместе с коллегами из других стран (Германия, Финляндия, Канада, США, Япония, Швеция и др.) мы работаем над обработкой и интерпретацией данных, а также их публикацией. Благодаря плодотворной работе ученых из Новосибирска, исследования Арктики выходят на качественно новый уровень. Это особенно важно для России, где вечная мерзлота покрывает большую часть поверхности. Можно с уверенностью сказать, что это направление исследований будет ведущим в ближайшие 50 лет.

### **Выводы**

То, что полярные экспедиции в рамках этого международного научного проекта проходят уже в течение 20 лет - это уникальный случай. Экспедиция «Лена» является совершенно исключительным начинанием. Мы надеемся, что новая полярная станция на острове Самойловский станет удобной и надежной базой для успешной деятельности совместных экспедиций на многие годы вперед.

*Михаил Н. Григорьев, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Игорь Н. Ельцов, Анне Моргенштерн*

Рисунок 9: Встреча представителей АВИ с директором ИНГГ СО РАН Игорем Н. Ельцовым на станции «Остров Самойловский» в августе 2017 года для планирования будущего сотрудничества и экспедиций. Слева направо: Карстен Вурр, административный директор АВИ, Вальдемар Шнайдер, отдел логистики АВИ, Гвидо Гроссе, руководитель секции исследования вечной мерзлоты АВИ, Ханс-Вольфганг Хуббертен, АВИ, Игорь Н. Ельцов.

## Остров Самойловский в международных программах и научно-исследовательских сетях - «FLUXNET», «GTN-P», «INTERACT»

За последние 20 лет остров Самойловский превратился в международно значимую научную площадку для наземных полярных исследований. Долгосрочные наблюдения и полевые эксперименты, проводимые на острове Самойловский, привели к получению важных для международного научного сообщества результатов и наборов данных, являющихся уникальными во многих отношениях. Что касается стандартных параметров, измеряемых в приполярных областях или по всему миру, исследовательская станция на острове Самойловский обеспечивает необходимый мониторинг региона Восточно-Сибирской Арктики, где находится значительно меньше исследовательских участков, чем в других частях мира. Другие важные данные являются результатом долгосрочного сотрудничества российско-германских исследовательских коллективов, в которые входят опытные представители различных научных областей, обладающие глубокими знаниями о мерзлотных ландшафтах и происходящих в них процессах. Полученные наборы данных и результаты научных исследований были опубликованы, и вошли в открытые базы данных, такие как «PANGAEA» (публикует данные наук о Земле и окружающей среде, член Всемирной системы данных (WDS) Международного совета по науке (ICSU), <https://www.pangaea.de>). Сторонние международные исследовательские группы использовали эти результаты в качестве исходных данных для сравнения участков исследований, моделирования, синтеза и др. Эти данные и результаты исследований также стали вкладом в крупные комплексные исследовательские проекты, такие как проект «PAGE21» РП7 ЕС или проект исследования мерзлоты программы «Data User Element (DUE)» Европейского космического агентства (ESA). Чтобы обеспечить широкое распространение и использование данных, ключевые параметры долгосрочного мониторинга на острове Самойловский, соответствующие международным стандартам, передаются в базы данных международных научных сетей и программ.

Результаты долгосрочных измерений обменных потоков импульса, энергии, воды, углекислого газа и метана между землей и атмосферой методом вихревой ковариации (см. стр. 76-81) вошли в глобальную сеть «FLUXNET» (ID площадки: Ru-Sam). Эта сеть связывает участки измерения обмена углекислого газа и водяного пара методом вихревой ковариации по стандартной методике на всех континентах (<http://fluxnet.fluxdata.org/>). Kutzbach et al. (2015) внесли данные потоков в набор данных FLUXNET2015.

Глобальная сеть мониторинга криолитозоны (GTN-P, <https://gtnp.arcticportal.org/>) собирает информацию по двум ключевым для мерзлоты показателям, признанным Глобальной системой наблюдений за климатом (GCOS) и Глобальной системой наземных наблюдений (GTOS) в качестве основных

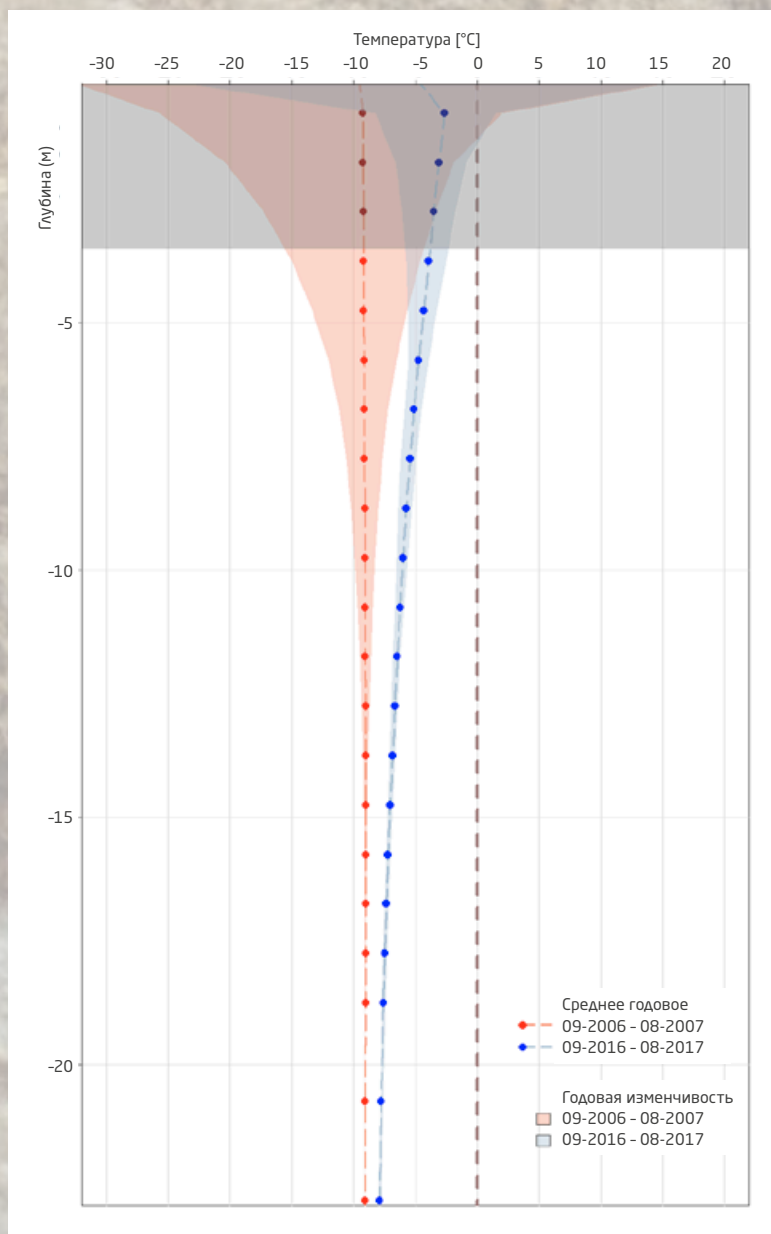


Рисунок 1: Температурные измерения мерзлоты, сделанные в буровой скважине глубиной 26 метров на о. Самойловский, показывают потепление мерзлоты в период 2006/07 - 2016/17.

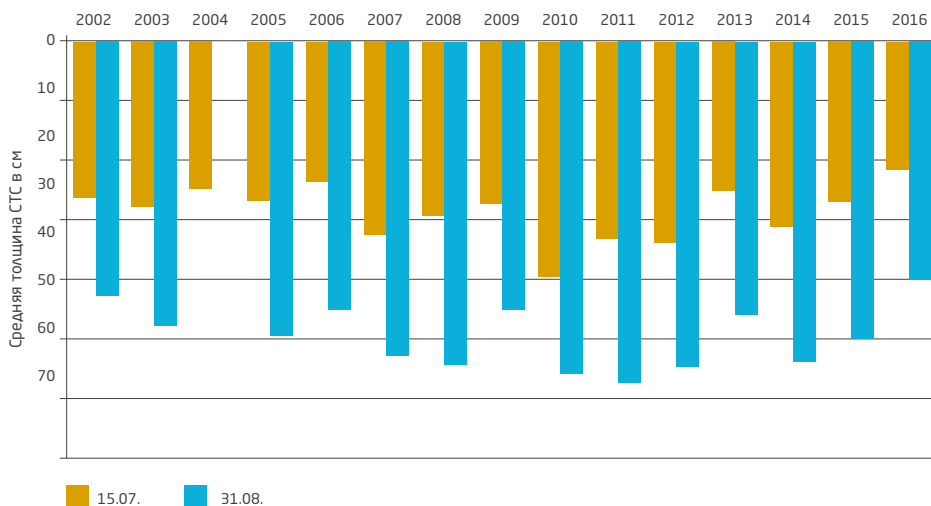


климатических переменных (ECV). Первой ключевой переменной является термическое состояние мерзлоты (TSP), то есть температура мерзлоты, которая измеряется с помощью обширной сети буровых скважин в районе многолетней мерзлоты в течение длительного периода времени. Второй переменной является толщина сезонноталого слоя (СТС), которая отражает сезонную глубину протаивания мерзлоты, измеренную в соответствии со стандартами Программы циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM). Данные мониторинга с острова Самойловский были предоставлены как по первой (TSP), так и по второй переменной (для CALM).

В 2006 году на острове Самойловский была пробурена скважина глубиной 26 м, которую оснастили цепью из 24 температурных датчиков, непрерывно измеряющих температуру мерзлоты по всему глубинному профилю (Рисунок 1). Также, в рамках экспедиций «ЛЕНА» были пробурены дополнительные скважины в мерзлоте в районе моря Лаптевых. Данные по температуре мерзлоты, измеренной в этих скважинах, были загружены в базу данных TSP. Непрерывные измерения СТС на острове Самойловский начались в 2002 году, когда была создана сетка измерений «CALM» (см. стр. 76-81).

Финансируемый ЕС инфраструктурный проект «INTERACT» - Международная сеть по наземным исследованиям и мониторингу в Арктике (<https://eu-interact.org/>) - это приполярная сеть из 82 наземных полевых баз, включая НИС «О. Самойловский». Целью этого проекта не является сбор и распро-

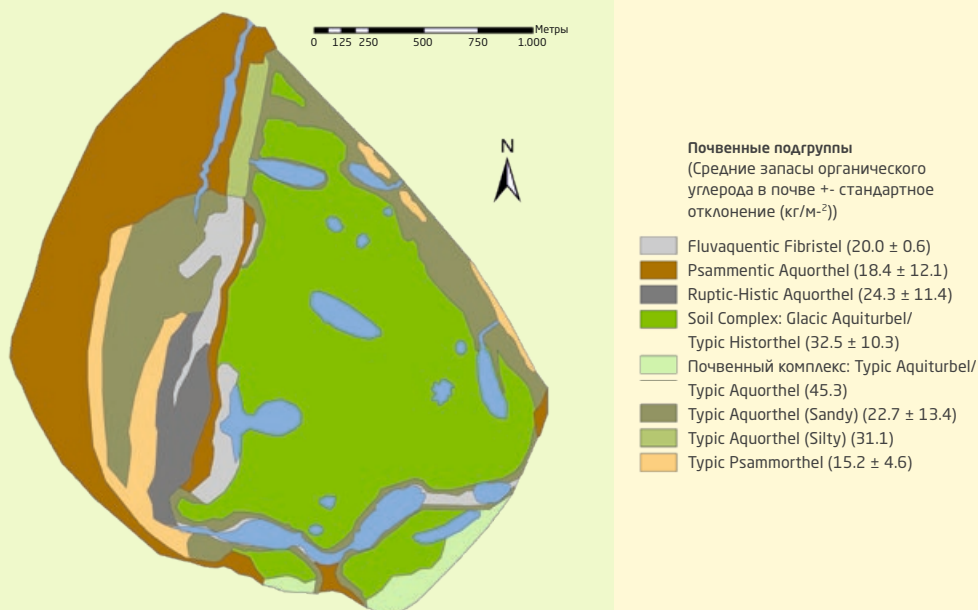
Рисунок 2: Металлическая труба, выступающая из скважины на о. Самойловски, для доступа к датчикам.



странение конкретных наборов данных, однако, будучи многопрофильным, он нацелен на создание потенциала для исследований и мониторинга в европейской Арктике и за ее пределами. Проект предлагает доступ ко многим исследовательским станциям в рамках собственной программы «Транснациональный доступ (Transnational Access)». В дополнение к вышеупомянутой доступности данных с острова Самойловский, возможность использования исследовательской станции в качестве научной и логистической базы для полевых работ в дельте реки Лены и в области моря Лаптевых привлекла внимание сторонних исследователей, не входящих в российско-германские исследовательские группы, но желающих проводить полевые работы на острове Самойловский и в его окрестностях. С 2013 года программа «Transnational Access» сети «INTERACT» предоставляет таким международным исследовательским группам доступ к острову Самойловский. Совместные полевые исследования, проводимые участниками российско-немецких экспедиций «ЛЕНА» и «INTERACT» были очень плодотворны и привели к совместным публикациям и продолжающемуся сотрудничеству.

*Анне Моргенштерн, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Юлия Бойке, Ларс Кутцбах*

Рисунок 3: Средняя глубина СТС в см, измеренная в сетке «CALM» на острове Самойловский в середине июля и конце августа каждого года.



## Краткий обзор российско-германских проектов по исследованию вечной мерзлоты «CARBOPERM» и «KoPf»

Сотрудничество между Россией и Германией в вопросах исследования наземной вечной мерзлоты началось около 25 лет назад во время Пуцинской конференции 1992 года. На ней с российскими криогеологами встретились немецкие почвоведы и исследователи полярных регионов, и последние были приятно удивлены высоким уровнем исследований вечной мерзлоты в России. С тех пор начался рост непрерывного междисциплинарного научного обмена между Россией и Германией, в основном при поддержке АВИ Потсдам и его партнеров в нескольких университетах Германии.

Потребовалось почти 20 лет, чтобы реализовать первый проект по ис-

Рисунок 1: Средняя величина запасов углерода в различных многолетнемерзлых почвах (на глубине до 1 м) острова Самойловский как база данных для междисциплинарной работы по исследованию вечной мерзлоты (Zubrzycki et al. 2013).

следованию вечной мерзлоты с российско-германским финансированием: «CARBOPERM» (спонсирован Федеральным министерством образования и научных исследований Германии / Министерством образования и науки Российской Федерации в 2013-2016 гг.) - совместную кампанию по исследованию процессов образования, трансформации и выброса углерода в условиях вечной мерзлоты Сибири. Она была направлена на улучшение понимания того, как ландшафты, в которых распространена вечная мерзлота, будут реагировать на глобальное потепление и как эта реакция повлияет на баланс углекислого газа в локальных, региональных и глобальных масштабах.

Стабильно низкие температуры в вечной мерзлоте препятствовали разложению органического углерода (ОУ), вследствие чего он в большом количестве накапливался в многолетнемерзлых почвах. По последним оценкам, эти почвы когда-то содержали 1670 петаграмм (Pg) ОУ, то есть количество углерода, которое в 2,5 раза больше содержащегося в глобальной растительности. В качестве примера на Рисунке 1 приведены запасы углерода острова Самойловский.

Результатом повышения температур в Арктике стало усиление протаивания вечной мерзлоты, что привело к мобилизации органического углерода, ранее находившегося в замороженном состоянии. Деградация вновь доступного ОУ вызвала усиление образования парниковых газов - метана и углекислого газа. Таким образом, возросшие из-за таяния вечной мерзлоты концентрации незначительных газовых примесей в атмосфере также усиливают потепление климата. Российские и немецкие исследователи вечной мерзлоты проводили совместную работу на нескольких ключевых участках Сибирской Арктики, таких как остров Большой Ляховский в проливе Дмитрия Лаптева, дельта реки Лены и участок Колымской низменности рядом с поселком Черский.

Проект «CARBOPERM» расширил исследования вечной мерзлоты в малоизученных районах Сибири, не всегда доступных иностранным исследователям. Полученные результаты способствуют пониманию того, как будут развиваться чувствительные к климатическим изменениям и экономически ценные полярные регионы, в которых существует вечная мерзлота.

Действующий в настоящее время проект изучения вечной мерзлоты «KoPf» (финансирование Федерального министерства образования и научных исследований Германии 2017-2020 гг.), который координируется Гамбургским университетом, Институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера в Потсдаме, Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) в Санкт-Петербурге и Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН) в Якутске, направлен на улучшение понимания процессов влияния климатических



изменений на углерод в вечной мерзлоте при помощи полевых наблюдений, дистанционного зондирования и цифрового моделирования.

Исследования наземной вечной мерзлоты, сфокусированные на Сибири, вновь проводятся при тесном российско-германском сотрудничестве. В рамках проекта «KoPf» проводится уточнение современных моделей систем Земли с учетом процессов, связанных с вечной мерзлотой. Эти модели впоследствии применяются к различным сценариям глобального потепления для того, чтобы определить, когда в будущем Арктика превратится из поглотителя углерода в его источник. Дополнительными целями являются определение разлагаемости органического углерода из вечной мерзлоты за долгий период и его доли в потоках парниковых газов на основе биогеохимических и микробных исследований процессов разлагаемости органического углерода и продуцирования углекислого газа и метана.

Проект функционирует на местном, региональном и континентальном уровнях, в его рамках проводится количественная оценка изменений растительного покрова и его экосистем, а также изменений характеристик углерода в многолетнемерзлых почвах, в зависимости от меняющейся динамики парниковых газов, а также их влияние на нее. Полученные данные используются для дальнейшей проверки указанных выше моделей. Проект «KoPf» использует сочетание новых методов микробиологии, биогеохимии, экологии, микрометеорологии, дистанционного зондирования и цифрового моделирования для изучения изменений за период 1850-2100 гг.

Получаемые на основе этой модели прогнозы оттаивания вечной мерзлоты и его влияния на систему климата необходимы для разработки соответствующих стратегий минимизации последствий этого оттаивания и адаптации к ним.

Кроме того, «KoPf» поддерживает обучение молодых ученых в области исследования вечной мерзлоты и укрепляет двусторонние связи между Россией и Германией, поскольку он основан на сотрудничестве между 14 немецкими и 12 российскими институтами по актуальным вопросам в этой области.

Проекты «CARBOPERM» и «KoPf» являются основой для текущих и будущих исследовательских проектов, которые и в дальнейшем будут проводиться на научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» в тесном сотрудничестве российских и немецких друзей вечной мерзлоты.

*Ева-Мария Пфайффер, Ханс-Вольфганг Хуббертен, Михаил Н. Григорьев, Дмитрий Ю. Большианов, Себастиан Зубржицкий, Ульрике Херцшу, Гвидо Гроссе*

## Использование метода дистанционного зондирования в районе моря Лаптевых

Активное и пассивное дистанционное зондирование и телеметрический сбор бортовой информации представляют собой незаменимые инструменты для наблюдения и анализа динамики наземной и морской окружающей среды в далеких районах Северной Сибири. Широкий спектр применения этих инструментов, особенно в сочетании с полевыми методами исследования и с моделированием, основан на большом диапазоне технических возможностей и на разнообразии целей наблюдения. В совместном российско-германском проекте дистанционное зондирование использовалось в районе дельты Лены для изучения морского льда и цвета океана, покрова земной поверхности и его изменений, распространенности термокарста, термоэрозии и терморазмыва, выброса парниковых газов, изменений побережья, просадок грунта при растеплении многолетнемерзлых пород и изменений в арктических озерах и озерном льду.

### **Морской лед, поверхность океана и береговая линия**

Оптические наблюдения и данные, полученные со спутника с бортовой РЛС, показывают, что мелководная зона арктического сибирского шельфа является важным источником наносимых льдом отложений и играет важную роль в поглощении, перераспределении и дисперсии отложений, питательных и загрязняющих веществ. Внос отложений в морской лед происходит в основном на мелководье, в первую очередь, при замерзании взвеси в шугу. Морской лед, насыщенный осадками, дрейфует с Трансарктическим течением через центральный бассейн в пролив Фрама, где он покидает Северный Ледовитый океан и тает.

В ходе совместных российско-германских работ исследовалось отступление границы морского льда в период летнего таяния («исчезновение летнего льда») и влияние этого процесса на образование, мощность и динамику льда в море Лаптевых. Для количественной оценки образования льда и его воздействия на гидрографию моря Лаптевых использовались аэросъемка, тепловидение, снимки, полученные в оптическом диапазоне, и радиолокационные данные. С помощью сочетания этих методов изучались также межгодовые колебания размеров припая, ледовитости пакового льда и тенденции их развития. Информация о движениях морского льда, полученная со спутника с пассивным СВЧ радиометром, показала как значительное увеличение скорости дрейфующего льда, так и увеличение района его распространения. Увеличение экспорта льда приводит к снижению мощности ледяного покрова, а это, в свою очередь, обуславливает раннее таяние льда в летний период. Более того, динамика льда в зимний период также ускоряет процесс разрушения припая. Поэтому для прогнозирования морской ледовой обстановки в Арктике крайне важно изучение динамики льда в море Лаптевых.

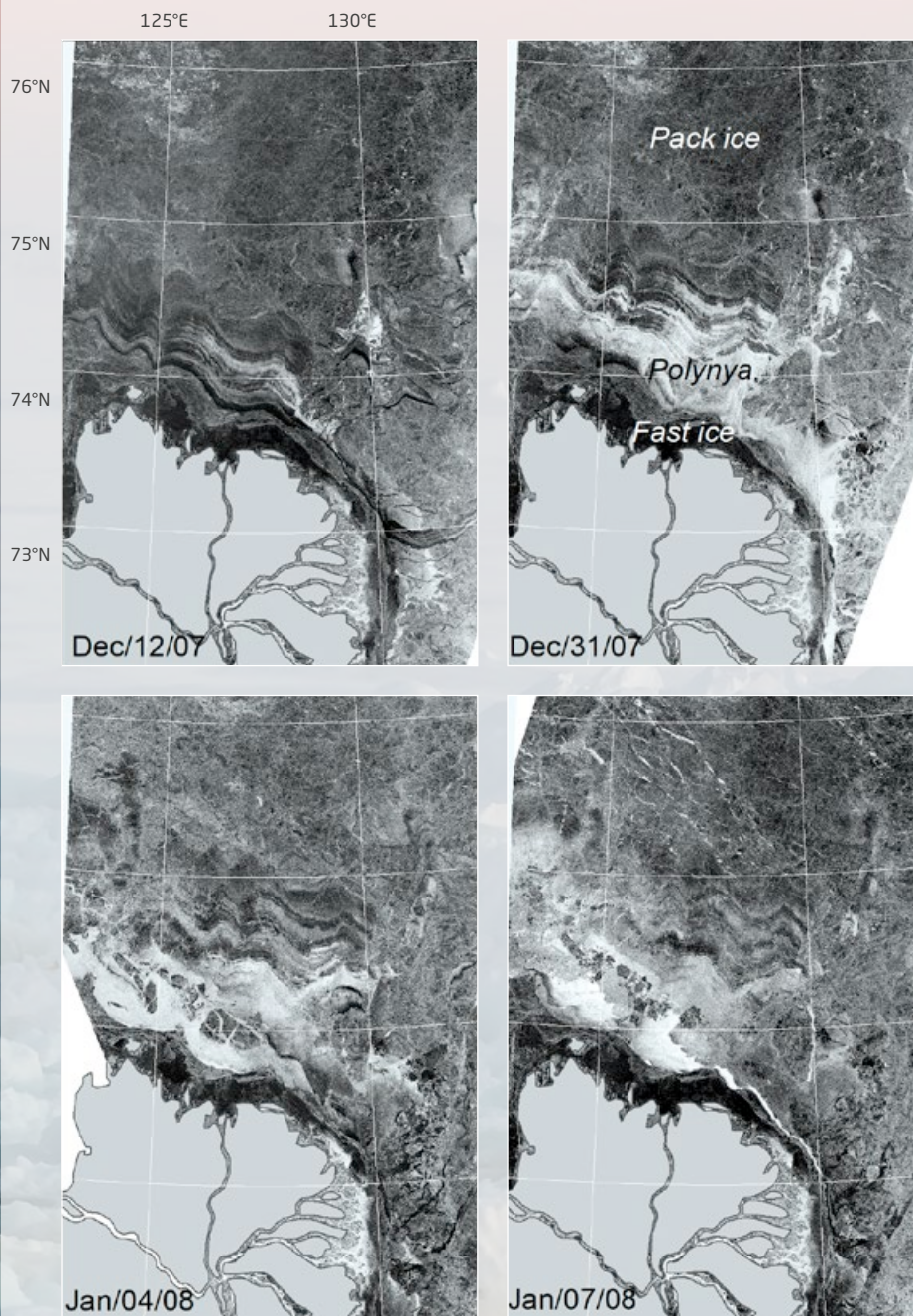


Рисунок 1: Динамика морского льда по данным ENVISAT SAR зимой 2007/2008 севернее дельты Лены.

Изменения в гидрографии и мутности моря Лаптевых можно изучать в течение нескольких летних месяцев, когда море свободно ото льда. В море Лаптевых наблюдается самый интенсивный поток органического вещества во всей Арктике за счет стока больших рек и размыва побережья. Высокое содержание органического углерода в поверхностном слое воды является причиной более чем десятикратного завышения концентрации хлорофилла в данных спутниковых сканеров цвета при использовании стандартных алгоритмов обработки спутниковых значений. Проводимые в настоящее время работы по разработке новых алгоритмов, адаптированных к условиям в море Лаптевых, позволят рассчитать реальную концентрацию хлорофилла и корректную цветовую абсорбцию растворенного органического вещества.

В районе моря Лаптевых материковые ландшафты постепенно превращаются в морские благодаря размыву побережья, слагаемого многолетне-мёрзлыми породами, и обводнению. Дистанционное зондирование со спутника для радиолокационной съёмки с высокой разрешающей способностью и историческая аэрофотосъёмка позволили провести точные измерения деградации береговых линий на вечной мерзлоте.

#### **Состояние и изменения земной поверхности**

В области дельты Лены были проведены различные классификации земной поверхности. Данные Landsat'a широко использовались для документации форм земной поверхности, возникающих в результате стремительного растепления и протаивания вечной мерзлоты, таких как термокарстовые озера, впадины, термоэрозионные овраги. В некоторых районах такие формы рельефа характерны для более чем 50% земной поверхности. Современная (2002-2013 гг.) аэрофотосъёмка с высокой разрешающей способностью (5 метров и менее) использовалась для создания банка данных мелких водоемов по всей дельте Лены. В итоге площадь поверхности изученных водоемов в дельте Лены увеличилась с 13 до 20 процентов.

Наземная полевая съёмка земной поверхности и растительности с использованием полевых спектрометров помогла дифференцировать типы растительности и улучшила классификацию мультиспектральных спутниковых данных. В ходе Международного полярного года (2007-2008) появились новые данные по дельте Лены с нескольких полетов спутников по орбите. Детальная цифровая модель местности, полученная с помощью ALOS-PRISM для о. Курунгнах в центральном районе дельты Лены, позволила картографировать рельеф Едомы, возникший под влиянием термокарста, а также документировать площади с высокой концентрацией многолетнемерзлых грунтов, что может служить указанием на возникновение термокарстового процесса на них в будущем. Параллельно использовались мультиспектральные данные ALOS-AVNIR для классификации типов земной поверхности с целью анализа влажностного режима, распространенности растительного покрова и его состава. Использование мультиспектральных данных Landsat'a 1999-2014 гг. и высокоавтоматизированных методов обработки данных позволило получить полную и детальную картину динамики дельты

Лены, включая эрозию речного берега, перемещение песчаных отмелей, изменения растительности, осушение и обводнение земной поверхности, а также изменения в термокарстовых озерах.

В 2016 году Новосибирским институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук была проведена съемка с дистанционно пилотируемого летательного аппарата, в результате которой были получены снимки мозаичного вида с очень высокой разрешающей способностью и цифровые модели рельефа о. Самойловский и частично о. Курунгнах. Опираясь на эти данные, были созданы подробные геоморфологическая карта и карта растительности, которые показывают сопряжение между рельефом и растительностью полигональной тундры. Съёмка эмиссии метана из различных типов земной поверхности, проведённая в 2014 г. специальными приборами, подвешенными к вертолёту, показала, что в районе дельты Лены происходит выброс 0,03 Тг метана в год. Эта съемка связала широкомасштабные модели парниковых газов с детальными данными турбулентной ковариации с мачты на о. Самойловский. Для лучшего понимания пространственной и временной изменчивости летних температур поверхности влажной полигональной тундры, было проведено сопоставление спутниковых данных MODIS по температуре земной поверхности с наземными измерениями тепловизионной системы на о. Самойловский. Результаты сопоставления привели к рекомендации повысить спутниковые алгоритмы температур земной поверхности для тундрового ландшафта. Спутниковые данные о температурах земной поверхности использовались также в сочетании с данными по эквивалентному слою воды для получения цифровых моделей температуры многолетнемерзлых пород и динамики деятельного слоя в дельте Лены.

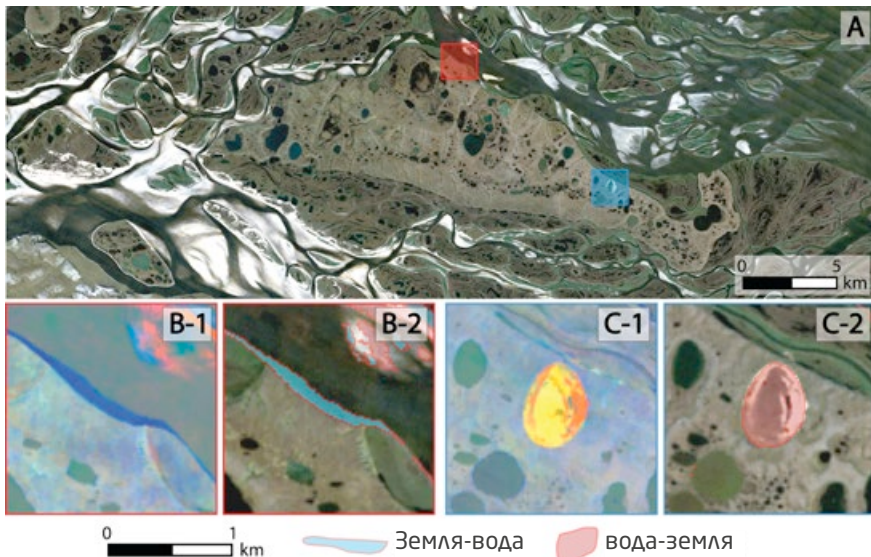
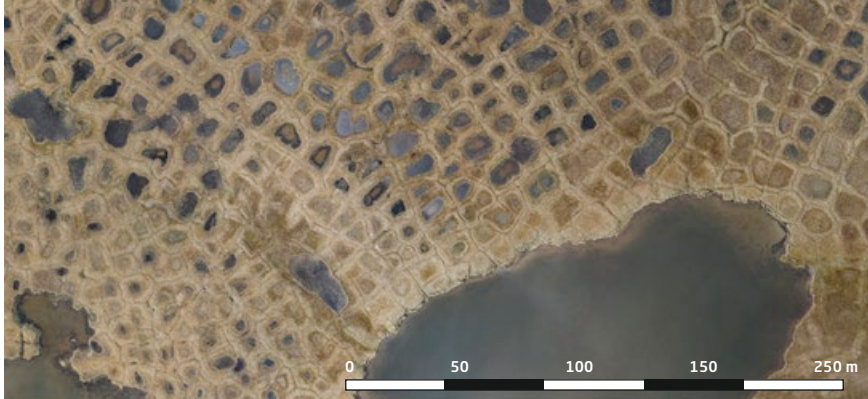


Рисунок 2: Данные с Landsat (1999-2014), показывающие сильный размыв побережья и озерный сток в дельте Лены.



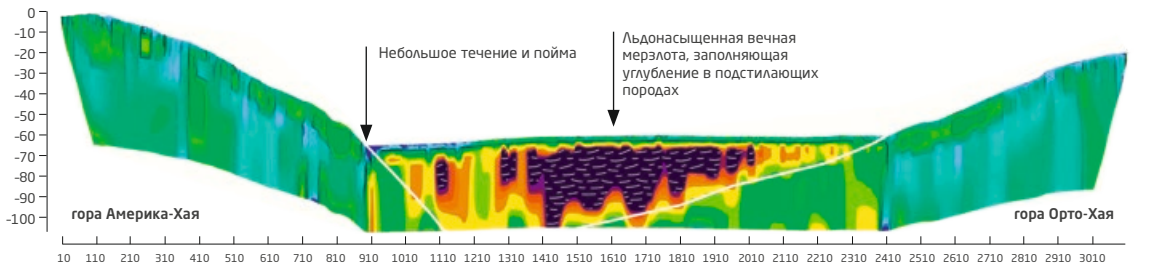
Система активного микроволнового дистанционного зондирования с радиолокационной станцией с синтезированной апертурой работает и в условиях облачности, частой в летний период в Арктике. Совместно с Германским космическим агентством начат, и в настоящее время еще продолжается, сбор данных по району дельты Лены с помощью поставляемых TerraSAR-X снимков; эти данные позволяют с беспрецедентной точностью анализировать быстротечное изменение береговых линий, результаты мониторинга режимов озерного льда, динамику просадок почвы в результате протаивания. Дифференциальная интерферометрия SAR по данным TerraSAR-X и Sentinel-1 применялась для оценки сезонной тепловой просадки грунта в ледовом комплексе Едома в дельте Лены. Стереофотограмметрические наблюдения за тепловыми просадками многолетнемерзлых грунтов на о. Муостах показывают поднятие земной поверхности на несколько метров между 1951 и 2013 гг. Для изучения изменений в поднятии земной поверхности в последнее время использовалось наземное лазерное сканирование. Повторные исследования показали интересную динамику межгодовых просадок почвы и морозного пучения.

### Перспективы

Метод дистанционного зондирования позволяет получить новые, всеобъемлющие и детальные, данные о характере, состоянии и динамике развития дельты Лены и района моря Лаптевых в последние десятилетия. Дистанционное зондирование играет также важную роль в планировании и подготовке полевых исследований, масштабировании полевых измерений, параметризации и оценке моделей, а также в тестировании гипотез о процессах, связанных с изменением климата. Данные спутниковых наземных наблюдений, собранные в ходе полевых исследований для проверки спутниковых данных, являются важным вкладом в анализ и интерпретацию данных для практически всех исследований с помощью метода дистанционного зондирования. Это подчеркивает значимость физической доступности мест исследования в этих районах и наличия хорошо оборудованной научно-исследовательской станции в дельте Лены в качестве базы для проведения научно-исследовательских работ.

*Гвидо Гроссе, Биргит Хайм, Софья Антонова, Юлия Бойке, Астрид Брахер, Алексей Н. Фаге, Франк Гюнтер, Томас Крумпен, Моритц Лангер, Анне Моргенштерн, Зина Мустер, Ингмар Нитце, Торстен Зак*

Рисунок 3: Изображение полигональных ледяных жил на о. Самойловский с высокой разрешающей способностью.

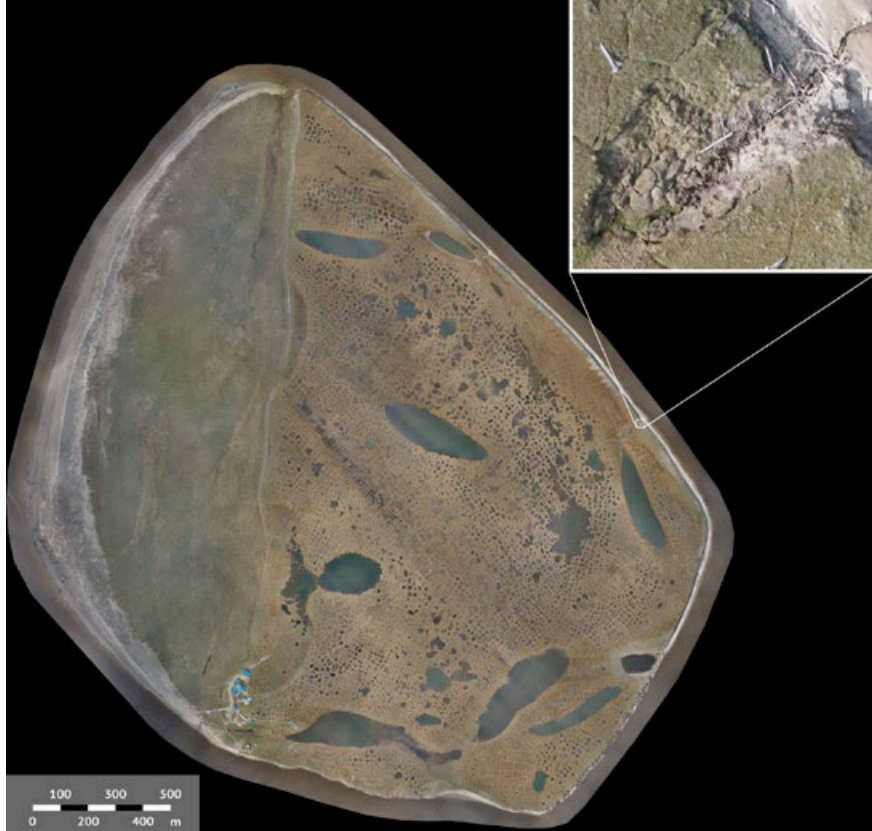


## Мультидисциплинарные исследования на островах Самойловский и Курунгах: геофизика, дистанционное зондирование, геология, ботаника и почвоведение

В 2013 году новая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский» вошла в ведение Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН. С 2014 года ИНГГ СО РАН стала организатором ежегодной многопрофильной экспедиции, объединяющей ученых из различных учреждений Сибирского отделения Российской академии наук. В 2014 году в этой экспедиции приняли участие только шесть человек: пять геофизиков и один геолог. Первая экспедиция ИНГГ началась хорошо: когда вертолет приземлился на остров Самойловский и группа исследователей начала разгрузку, один из участников экспедиции выскочил из вертолета, подбежал к девушке из числа встречающих и обнял ее. Оказалось, что они знали друг друга со времени учебы в университете в Новосибирске. После выпуска она поехала в Германию, чтобы учиться в аспирантуре АВИ. Они не виделись больше пяти лет, но судьба снова свела их в таком далеком месте - в 2800 км от Новосибирска и в 5200 км от Потсдама. Какова была вероятность такого события? С тех пор экспедиция и наше сотрудничество с коллегами из других стран регулярно описываются как «удачный поворот событий». ИНГГ приложил много усилий к тому, чтобы популяризовать это начинание, и в 2017 году количество участников экспедиции выросло до 16 человек. Среди них были ученые из областей геофизики, геологии, палеомагнетики, геоботаники и почвоведения, а также некоторые студенты из Новосибирского государственного университета.

За 4 года существования этой экспедиции были собраны уникальные данные о структуре вечной мерзлоты с использованием геофизических

Рисунок 1: Поперечное сечение с использованием электроразведки, реконструированное по данным электротомографии, полученным из профиля, идущего от горы Америка-Хая до горы Орто-Хая, показывает положение подстилающих пород (белая линия), покрытых четвертичными отложениями.



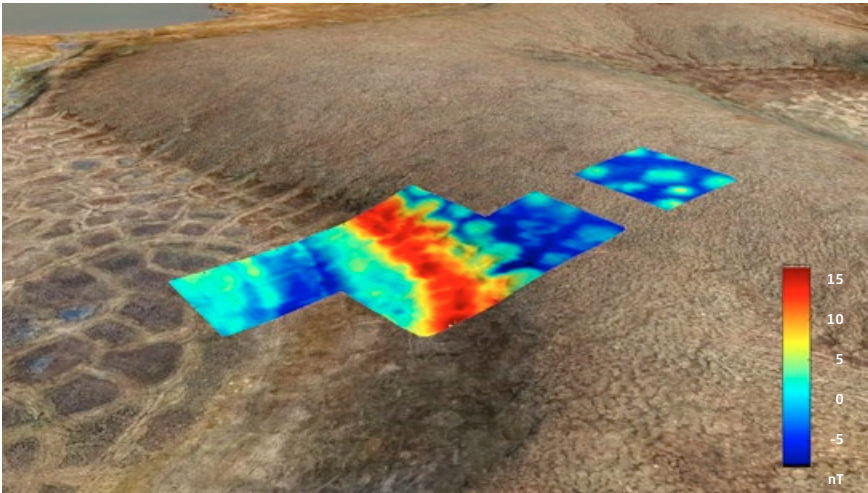
методов. Мы применили самые современные методы электроразведки (электротомография) для изучения деградации вечной мерзлоты под термокарстовыми озерами и остаточных таликов в аласах. Мы взяли пробы из уровня вечной мерзлоты, состоящего из протаивающих едомных отложений, под шельфом моря Лаптевых.

Мы объединили наши данные с данными наших немецких коллег и сумели применить электроразведку для создания схемы поперечного сечения от поверхности до морской толщи. Это позволило нам отследить механизмы деградации вечной мерзлоты по сценарию развития «от моря к суше». Другая геофизическая техника - высокоточная магнитная съемка - помогла нам составить карту ледяных клиньев, которые, как правило, не видны глазу из-за слоя мха и почвы.

В 2016 году мы успешно провели исследование острова Самойловский и южной части острова Курунгнах с помощью беспилотного летательного аппарата. Результаты исследования теперь представлены подробными ортофотографическими картами (0,05 м / пиксель) и цифровыми рельефными моделями (абс. точность высоты 0,25 м, горизонт. шаг сетки 0,5 м). Эти данные открывают новые возможности для будущих исследований в различных областях науки.

Рисунок 2: Ортофотокарта острова Самойловский, выполненная с учетом данных, полученных при съемке местности с помощью беспилотника. Пример карты в полном разрешении можно увидеть в верхнем правом углу.





Ботанические исследования, которые мы провели в 2017 году, уже дали поразительные результаты. Мы не только смогли создать максимально подробную ботаническую карту острова Самойловский, но и провели совместную с геологами работу по созданию геоботанической классификации для острова Самойловский и части острова Курунгнах на основе данных аэрофотосъемки. Новая сфера исследований - «геоботаника, опирающаяся на данные дистанционного зондирования сверхвысокого разрешения» - обещает новые удивительные открытия в исследованиях вечной мерзлоты.

Геологические данные, которые мы собрали в 2017 году, позволяют нам дополнить существующую картину четвертичной истории дельты реки Лены. Благодаря палеомагнитной съемке, нам доступны новые факты о древней истории дельты и континента в целом.

Сейчас мы планируем еще больше расширить наш междисциплинарный подход: мы стремимся к дальнейшей интеграции различных институтов СО РАН в исследования вечной мерзлоты. Существует, однако, еще одна обширная область совместной работы, которой мы все сейчас заняты: СО РАН, Институт им. Альфреда Вегенера и другие международные исследовательские организации объединили свои усилия по нескольким научным направлениям, чтобы провести экспедиции на реку Лену в следующие 20 лет, используя научно-исследовательскую станцию «Остров Самойловский».

*Игорь Н. Ельцов, Алексей Н. Фаге, Леонид В. Цибизов, Владимир А. Каширцев, Владимир В. Оленченко, Андрей А. Картозия, Николай Н. Лащинский*

Рисунок 3: Карта аномального магнитного поля с ясно различимым рисунком ледяных клиньев. Она была составлена на основе данных высокоточной магнитной съемки и наложена на топографическую модель, построенную с использованием результатов фотосъемки с беспилотника.



## Глубокое погружение в прошлое: наземные мерзлотные буровые кампании

Деградация вечной мерзлоты связана с потеплением климата и ведет к изменению рельефа а также речных и морских берегов. Например, такие процессы, как термокарст и термоэрозия ведут к просадке мерзлых толщ. Строение грунтов, включая их льдистость, и температурное состояние многолетнемерзлых пород (ММП) являются основными факторами уязвимости поверхности к проседанию. Такая дестабилизация грунтов становится особенно значительной в связи с потенциальным увеличением глубин оттаивания ММП, затрагивающих все более глубокие горизонты, как отклик на глобальные изменения климатической системы через высвобождение парниковых газов, законсервированных в мерзлоте или под ней (см. стр. 68-70), а также в ходе высвобождения погребенного в мерзлоте древнего органического углерода в результате микробного разложения (см. стр. 117-119). С учетом этого, главной целью наших буровых кампаний было получение мерзлых и талых кернов пород, включая лед и органические компоненты, из относительно глубоких горизонтов грунта (>5 м). Мы анализировали керны для изучения геологии и криостратиграфии дельты Лены и прилегающих территорий, выявления параметров и содержания органического углерода, мощности осадочных слоев, мерзлотных условий, а также флювиальной и дельтовой истории развития природной среды этого региона (Рисунок 1). Мы изучали мощные толщи для того, чтобы заглянуть в прошлое вечной мерзлоты, знание о котором необходимо для понимания современных природных условий и для оценки природных процессов в будущих более теплых эпохах.

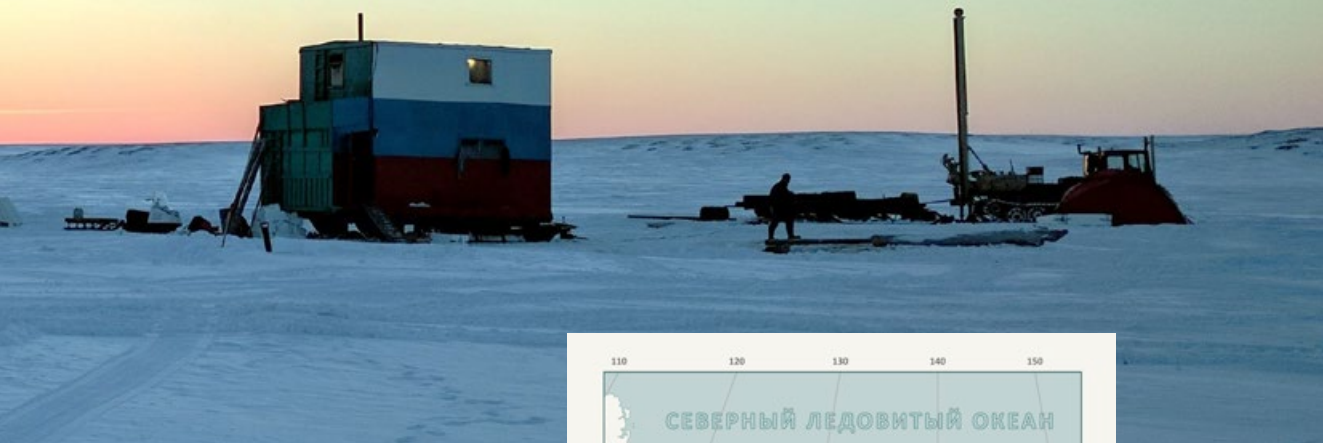


Рисунок 1: Участки относительно глубокого бурения многолетнемерзлых и талых пород для получения данных из глубины недр, являющихся архивом событий далекого прошлого: о-в Большой Ляховский (2014 N73.33, E141.32), п-ов Буор-Хая (2012, N71.4203, E132.111), п-ов Быковский 2017, N71.7452, E129.3022), щ-в Курунгнах (2015, N72.2903, E126.1843), мыс Мамонтов Клык (2005, N73.60597, E117.17736), о-в Самойловский (2005 and 2018, N72.3766, E126.4816), о-в Сардах (1998, 2009 N72.571544, E127.241499), о-в Турах (2005, N72.9740, E123.7986). Карта составлена С. Лабоором.



Целый ряд научных дисциплин, таких как геокриология, седиментология, палеоэкология, геофизика, геохимия и других, были использованы в исследованиях, основанных на буровом зондировании толщ в ходе наших экспедиций. Относительно глубокое бурение проводилось в основном в весенний период (апрель), когда крупное и тяжелое буровое оборудование было возможно транспортировать по замерзшей тундре или замерзшим акваториям, и когда образцы керна можно было довести к месту отправки на «Большую землю» замороженными. Полевая жизнь и работа в условиях, когда температура не поднималась выше  $-20^{\circ}\text{C}$ , в ожидании пурги и встречи с белым медведем, были довольно напряженными и физически тяжелыми. Тем не менее, отличная логистика и многолетний опыт организаторов и

Рисунок 2: Вопреки трудным условиям и суровым арктическим температурам. Во время Российско-Германских буровых экспедиций на севере Сибири. Небольшое временное поселение на санях: кухня, электрогенераторная, два жилых двухэтажных домика (балка), буровая установка УРБ-4Т на базе трелевочного трактора (слева направо).



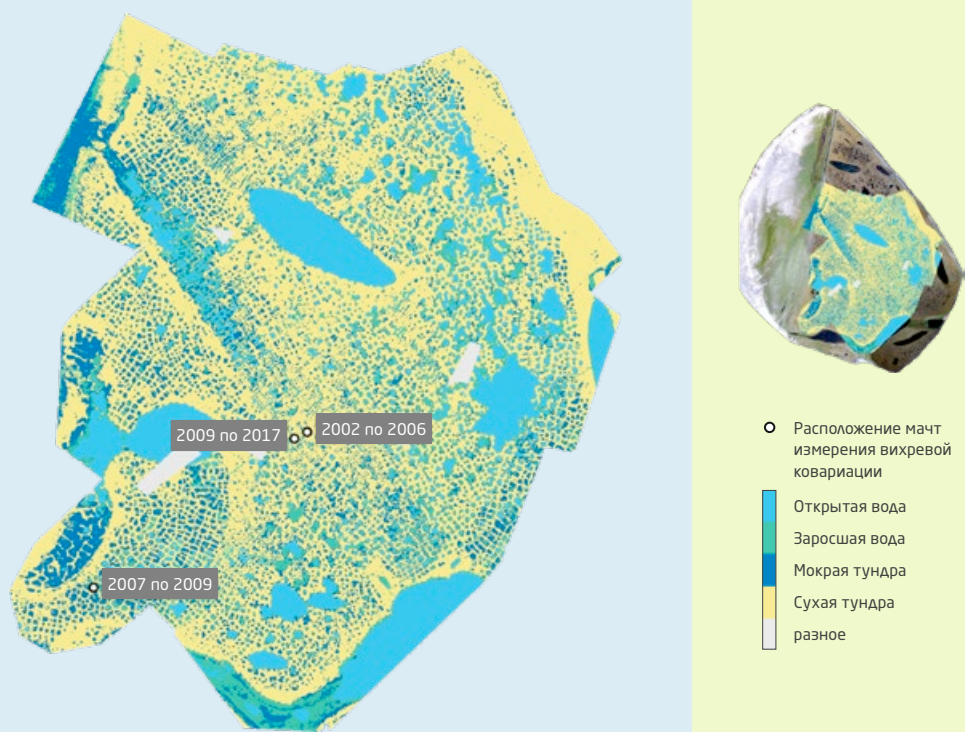
руководителей совместных Российско-Германских экспедиций в проведении такого рода работ делали сложные буровые кампании возможными. В условиях тщательной организации работ в экспедициях «Лена» наши полевые (буровые) лагеря часто напоминали небольшие временные поселения на санях, которые можно было перемещать для новых буровых приключений в зависимости от необходимости решения новых научных вопросов (Рисунок 2).

Другой важной частью полевой логистики являлась подготовка бурового оборудования. Технические возможности в рамках экспедиции «Лена» были следующие: различные типы буровых установок были доступны совместным экспедициям для получения керна из скважин в различных ландшафтных условиях, с разных глубин и различного грунтового материала. В большинстве случаев использовалась крупная буровая установка УРБ-4Т для проходки многолетнемерзлых пород (Рисунок 3), так как она подходит и хорошо работает при бурении скважин глубиной более 20 м в мерзлых грунтах. Другие часто используемые буровые установки: КМБ 3М для бурения до глубины 20 м, которая намного меньше и ее можно транспортировать вертолетом, например, МИ-8, или вездеходом.

Наиболее глубокую скважину предполагается пробурить на о-ве Самойловский в апреле 2018 г. Эта скважина позволит нам получить уникальную возможность для многолетних наблюдений за температурным режимом в многолетнемерзлых породах и, возможно, даст некоторые идеи в отношении того, как долго будет существовать мерзлота, унаследованная от последней ледниковой эпохи.

*Йенс Штраусс, Михаил Н. Григорьев, Пьер Пауль Овердуин, Георгий Т. Максимов, Гвидо Гроссе, Алексей Н. Фаге, Леонид В. Цибизов, Лутц Ширрмайстер*

Рисунок 3: Буровая установка в работе: Начало бурения установкой УРБ-4Т относительно глубокой скважины на Быковском п-ове, апрель, 2017 (фото Й. Штраусс).

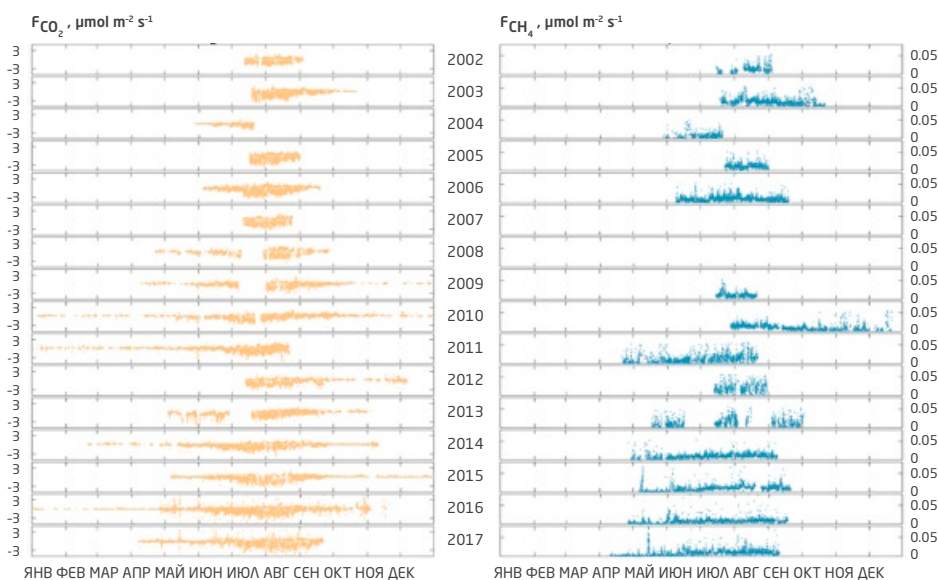


## Долгосрочные измерения потоков энергии, воды и парниковых газов между землей и атмосферой с 2002 года до настоящего времени и в перспективе

С 2002 года метод вихревой ковариации (англ. eddy covariance) использовался для измерения потоков водяного пара, углекислого газа и метана. Изменения в гидрологических условиях, доступности оборудования и имеющихся людских ресурсах, а также в финансовой и логистической поддержке, привели к установке четырех разных конфигураций метеорологических мачт в трех точках острова (см. Рисунок 1). Однако, частые изменения конфигураций происходили только на начальном этапе исследований. Современная система была стабильно установлена в центре речной террасы острова с 2009 года. Несмотря на то, что использовались различные конструкции мачт, высота измерения оставалась на неизменном уровне 4,15 м.

Данные высокого разрешения (20 Гц) о концентрации газов и скорости ветра в 3D, полученные системой, использовавшей метод вихревой ковариации, после обработки дают получасовые временные ряды газового потока, которые отражают пространственно интегрированный газовый обмен между поверхностью и атмосферой в масштабе ландшафта. Что касается потоков углекислого газа и метана, эти данные могут быть исполь-

Рисунок 1: Положение мачт, использующих метод вихревой ковариации (eddy covariance), относительно типов ландшафта на центральной речной террасе острова Самойловский.



зованы для оценки устойчивого углеродного (С) баланса, что позволяет количественно оценить способность речной террасы поглощать углерод. Эти кумулятивные данные о потоках особенно ценны в том случае, если распространяются на несколько лет, поскольку тогда становится возможным отследить взаимосвязь этих потоков с факторами, способствующими их появлению, и изменениями окружающей среды. Работы по достижению этой цели продолжаются в двух направлениях: потоки могут быть смоделированы с использованием *in-situ* измерений вспомогательных почвенных и метеорологических переменных, для лучшего понимания процесса, или, с целью обеспечения регионального масштабирования, могут быть использованы данные дистанционного зондирования. На Рисунке 2 представлен обзор уникального набора данных о потоках  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , измеренных системой вихревой ковариации во время 16 экспедиций в дельту реки Лены в период с 2002 по 2017 год.

В 2017 году у новой 10-метровой исследовательской мачты, установленной в 2016 году, была построена специальная обтекаемая полевая лаборатория в форме иглу на деревянной платформе (Рисунок 3). Постройка иглу, мачты и дощатого настила была финансирована в рамках инфраструктурного проекта «ACROSS» (англ. Advanced Remote Sensing-Ground Truth Demo and Test Facilities). Благодаря такой лаборатории, возможно собирать эмпирические данные, охватывающие климатические переменные в разных пространственных и временных масштабах и экологических нишах. В иглу могут

Рисунок 2: Потоки парниковых газов: потоки  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , зарегистрированные в период с 2002 по 2017 гг. с помощью станции измерения вихревой ковариации потоков на острове Самойловский.



находиться высокоточные приборы в условиях неизменного температурного режима. Эта конструкция из стекловолокна была дополнительно изолирована, а ее внутренняя температура также поддерживается с помощью системы климат-контроля. Иглу подключен к основному источнику питания исследовательской станции «Остров Самойловский», что обеспечивает непрерывное поступление электроэнергии даже в экстремальных погодных условиях.

Пополнение получаемых в течение длительного периода рядов метеорологических данных и данных о потоках между землей и атмосферой (потоки энергии и  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) необходимо для анализа внутри- и межгодовой изменчивости, а также анализа баланса потоков углерода, воды и тепла между многолетнемерзлыми почвами, растительностью и поверхностью земли. Эти данные будут внесены в международные базы данных, такие как «FLUXNET» и «PANGAEA». Подобно данным долгосрочных наблюдений за климатом и почвой (см. стр. 76-81), эти данные будут использоваться для (i) количественной оценки реакций на движущие факторы изменения экосистем, (ii) описания комплексных экосистемных процессов, происходящих в течение продолжительных периодов времени, и (iii) параметризации и проверки моделей систем Земли и растительного покрова.

*Давид Холл, Юлия Бойке, Торстен Закс, Петер Шрайбер, Нико Борнеманн, Кристиан Вилле, Ева-Мария Пфайффер, Ирина В. Федорова, Ларс Кутцбах*

Рисунок 3: Новая обсерватория с системой климат-контроля и 10-метровая мачта на острове Самойловский (создана в 2017 году) (фото П. Верзоне).



## Трансформация углерода при оттаивании вечной мерзлоты в дельте реки Лены

Продолжающееся потепление климата оказывает сильное влияние на многолетнемерзлые почвы - оттаивание верхнего слоя почвы постоянно усиливается. Другим следствием потепления является начало термокарста, проходящего наиболее интенсивно в льдонасыщенных многолетнемерзлых грунтах, таких как отложения Ледового комплекса (Рисунок 1), образовавшиеся во время последней ледниковой эпохи.

Оттаивание вечной мерзлоты приводит к усиленному выделению углекислого газа и разложению органического вещества микроорганизмами. Еще нет однозначного ответа на вопрос о том, как быстро происходит разложение углерода из вечной мерзлоты, и с какой скоростью происходит образование  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и парниковых газов вслед за этим процессом, а также о том, какое количество этих газов выбрасывается в атмосферу.

Рисунок 1: Плейстоценовые многолетнемерзлые отложения острова Курунгах в дельте реки Лены. Слева: Следы термозрозии на фронте оттаивания отложений Ледового комплекса (фото сделано в июле 2016 года). Справа: Обнажения Ледового комплекса с четко видимыми ледяными клиньями (светло-серыми), окружающими минеральный материал вечной мерзлоты (темно-коричневый) (фото И. Пройс, 2010).





Исследования по этим важным научным вопросам проводились во время экспедиций в дельту реки Лены с 2013 по 2017 год в рамках российско-германских проектов исследования вечной мерзлоты «CARBOPERM» (спонсирован Федеральным министерством образования и научных исследований Германии и Министерством образования и науки Российской Федерации с 2013 по 2016 год) и «KoPf» (спонсируется Федеральным министерством образования и научных исследований Германии с 2017 по 2020 годы). Ученые из университетов Гамбурга и Кельна и Германского центра исследования Земли (GFZ) в Потсдаме вместе с российскими коллегами использовали хорошо оборудованные лаборатории научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» для анализа потоков  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  и круговорота органического вещества (Рисунок 2), а также проводили полевые исследования.

Новая НИС «Остров Самойловский» предоставляет уникальные для Сибирской Арктики исследовательские возможности, а собранные на данный момент образцы почвы, растительности, воды и газов способствуют поиску ответов на открытые исследовательские вопросы. Многочисленные научные публикации в международных научных журналах, основанные на исследованиях в дельте реки Лены, способствуют лучшему пониманию процесса трансформации углерода после оттаивания вечной мерзлоты и оценке выбросов парниковых газов в долгосрочной перспективе (к примеру,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  до 2100 года).



Органическое вещество многолетнемерзлых почв легко доступно микроорганизмам и, следовательно, подвержено быстрой деградации. Сравнение распада органического углерода в аэробных условиях хорошо дренированных почв возвышенностей и анаэробных условиях, характерных для водонасыщенных почв, показало, что при отсутствии кислорода органическое вещество из оттаивающей вечной мерзлоты на островах Курунгнах и Самойловский значительно меньше подвержено разложению. В то же время анаэробные условия способствуют образованию наравне с  $\text{CO}_2$  более сильного по своему влиянию на окружающую среду парникового газа  $\text{CH}_4$ .

Поскольку метан оказывает большее влияние на климат, в анаэробных условиях водонасыщенных почв образуется еще больше парниковых газов со сходным эффектом. На НИС «Остров Самойловский» применяются аналитические методы для забора проб выбросов  $\text{CO}_2$  из многолетнемерзлых почв напрямую в полевых условиях. В дальнейшем эти пробы отправляются в Университет Кельна на лабораторный радиоуглеродный анализ.

Этот метод позволяет определить и количественно оценить долю древнего углерода, запасы которого тысячи лет хранились в плейстоценовых отложениях «Едомы», вступающего сейчас в активный круговорот. Результаты



анализа показывают, что после оттаивания в атмосферу может выделиться до 70% ранее замороженного вещества, а его смешивание с более молодым органическим веществом при оттаивании и эрозии может усилить процесс разложения.

Некоторые научные вопросы остаются открытыми, например, вопрос о том, как оттаивание вечной мерзлоты повлияет на поглощение  $\text{CO}_2$  растениями или как быстро оттаивающее органическое вещество может разлагаться *in situ*. Решению этих вопросов будут посвящены дальнейшие исследования на научно-исследовательской станции «Остров Самойловский», которые планируется проводить в тесном сотрудничестве с российскими партнерами в рамках российско-германского проекта по изучению вечной мерзлоты «KoPf».

*Кристиан Кноблаух, Джанет Ретемейер, Александр Шютт, Михаил Н. Григорьев, Ева-Мария Пфайффер*

Рисунок 2: Полевые и лабораторные работы в дельте реки Лены. Стр. 182: Бурение вечной мерзлоты на острове Курунгнах. Стр. 183 сверху: Измерения потока парниковых газов из оттаявшей вечной мерзлоты на острове Курунгнах. Внизу: Измерения газов ГХ лаборатории на старой станции острова Самойловский (фото К. Финке).



(фото: П. Верзоне)



6.

Сотрудничество в изучении вечной мерзлоты в рамках будущих экспедиций «Лена» Перспективы

## Сотрудничество в изучении вечной мерзлоты в рамках будущих экспедиций «Лена» - перспективы

Современные модели систем Земли, разработанные для прогнозирования будущих глобальных экологических и климатических изменений, по-прежнему имеют серьезные недостатки в реализации динамики и процессов криосферы. Особенно слабо представлены процессы, характерные для обширных областей вечной мерзлоты Земли на всех уровнях - от микробиологического до континентального. Это формирование и деградация вечной мерзлоты, цикл углерода в почве и динамика растительности, гидрология Севера и энергетический обмен между земной поверхностью и атмосферой.

Области распространения вечной мерзлоты являются одними из наиболее уязвимых ландшафтов земного шара и уже сейчас испытывают на себе влияние быстрого климатического потепления и таяния, что приводит к проседанию, эрозии и изменениям в биогеохимических циклах, составе растительности и гидрологических системах. Таяние вечной мерзлоты продолжит влиять на концентрацию парниковых газов в атмосфере. Кроме того, из-за большей доступности областей распространения вечной мерзлоты в Арктике, увеличится число проводимых там проектов экономического и социального развития.

В течение последних десятилетий дельта реки Лены в Северной Сибири была ключевым регионом российских и международных исследований криосферы и экосистем Арктики. Поскольку теперь, благодаря интенсивным полевым исследованиям и дистанционному зондированию, исследователям стали доступны более длинные временные ряды по многим параметрам, этот регион становится одной из самых ценных исследовательских площадок для понимания долгосрочного развития высокоширотной Арктики в условиях потепления климата. Более того, дельта реки Лены является особенно уязвимой речной экосистемой, находящейся на границе между сушей, океаном и атмосферой, которая будет затронута эрозией береговой зоны, повышением уровня моря, изменением речного стока и температуры воды, а также изменениями биоты.

Стремление к лучшему научному пониманию экологических процессов и динамики быстро развивающейся Арктики, обусловленное в том числе и конкретными требованиями экологической политики, привело к появлению многочисленных координированных международных проектов в Арктике, число которых в будущем только увеличится. Дельта реки Лены, где находятся исследовательские станции, в числе которых НИС «Остров Самойловский», остается главной областью в Сибирской Арктике, где совершаются научные открытия, а также областью, благодаря которой может снизиться фактор неопределенности в моделировании будущего состояния Арктики.



По этой причине важно продолжать и развивать существующие международные программы полярных исследований в этом регионе, что также будет способствовать развитию севера Сибири. Важным шагом в этом направлении стало строительство и ввод в эксплуатацию новой полярной научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» в 2013 году. В течение уже нескольких лет станция является новым домом для продолжающихся российско-германских экспедиций «Лена», а также для международных полярных исследований в рамках «INTERACT» - международной сети станций наземных исследований и мониторинга в Арктике. Инфраструктура новой станции способствует проведению передовых исследований в отдаленных заполярных областях вечной мерзлоты. Существование станции необходимо для дальнейшего расширения доступа к региону международных исследовательских групп - общий критерий для всех арктических и антарктических станций вокруг полюсов.

Рисунок 1: Исследуемый регион дельты реки Лены находится в самом сердце зоны вечной мерзлоты Арктики.

Всё еще открытые научные вопросы, которые могут быть решены в регионе дельты реки Лены, включают в себя количественную оценку процессов, связанных с динамикой вечной мерзлоты - ее оттаиванием и образованием, а также воздействием этих процессов на почвенные запасы углерода. В оценке влияния таяния вечной мерзлоты на климат планеты по-прежнему существует значительная доля неопределенности. В то же время, недавние исследования указывают на глобальную значимость этого влияния при развитии различных сценариев климатических изменений. Чтобы минимизировать эту неопределенность, важно продолжить полевые и лабораторные биогеохимические исследования, атмосферные и метеорологические исследования, использование дистанционного зондирования для анализа ландшафтных и прибрежных изменений под влиянием таяния вечной мерзлоты, геофизические наблюдения и моделирование вечной мерзлоты и круговорота углерода в пространственных и временных масштабах. Российско-германская научная работа в дельте реки Лены и на НИС «Остров Самойловский» уже внесла важный вклад в эти исследования на международном уровне.

Российско-германская исследовательская деятельность в дельте реки Лены и ее окрестностях сыграла уникальную роль в реконструкции климатической и экологической истории районов вечной мерзлоты северной Сибири за последние 200 000 лет. Пока незавершенным остается полное обследование почв и отложений как в мерзлотных, так и незамерзающих подземных областях, к примеру, под озерами и реками, и определение их роли в продуцировании парниковых газов.

С помощью глубокого изучения широтных трансектов от бореального леса до арктической тундры станет возможным восполнить пробелы в знаниях о резких изменениях экосистем высоких широт во времени и пространстве. Биогеохимические исследования циклов азота и фосфора в районах вечной мерзлоты позволят нам лучше понять ограничения биоты в почвах холодных климатических областей, и то, как ситуация может измениться при дальнейшем потеплении в Арктике, а также то, как процессы в сибирском регионе могут повлиять на глобальные природные циклы, которые могут затронуть области, находящиеся за пределами Арктики.

Интеграция результатов исследований из различных научных областей станет ключевым фактором для будущей исследовательской деятельности в этом регионе. Это потребует еще более тесного сотрудничества между партнерами из различных организаций и большего обмена опытом в области исследований вечной мерзлоты, гидрологии, климатологии, ботаники, биологии, микробиологии, биогеохимии, четвертичной геологии, палеонтологии, геофизики, дистанционного зондирования и цифрового моделирования. Дальнейшие передовые полярные исследования в отдаленных районах севера также потребуют значительного технологического развития и логистической экспертизы.



Станции наблюдения за состоянием окружающей среды на острове Самойловский уже много лет являются частью международных сетей, включая Глобальную сеть мониторинга криолитозоны (GTN-P) и глобальную сеть микрометеорологических наблюдений «FLUXNET». Действующие обсерватории на острове Самойловский позволяют получать надежные данные о температурах вечной мерзлоты, сезонных и годовых потоках углекислого газа и метана, а также об энергетическом балансе в чрезвычайно разнородном ландшафте сибирской вечной мерзлоты. Вот почему эта исследовательская база стала краеугольным камнем для существования международных наблюдательных сетей на севере Сибири - крупнейшем районе вечной мерзлоты на Земле, в котором есть лишь малое количество наблюдательных станций. Данные этих обсерваторий являются важной составляющей глобальной научной работы по моделированию будущих климатических условий для построения моделей систем Земли.

Российско-германские исследования вечной мерзлоты, проводимые в рамках экспедиций «Лена» на острове Самойловский, в дельте реки Лены и прилегающих районах за последние 20 лет, являются ярким примером продуктивного международного сотрудничества, способствующего лучшему изучению нашего климата и окружающей среды. Благодаря неоценимой поддержке этих исследований в течение такого долгого времени многими людьми, организациями и учреждениями, в том числе и на высшем уровне, в Арктике был создан уникальный исследовательский оазис, важнейшими целями существования которого являются научная работа, новые открытия и сотрудничество, сейчас и в будущем.

*Гвидо Гроссе, Дмитрий Ю. Большианов, Михаил Н. Григорьев, Ева-Мария Пфайффер, Игорь Н. Ельцов, Ханс-Вольфганг Хуббертен*

Новая обсерватория с системой климат-контроля и 10-метровая мачта на острове Самойловский (создана в 2017 году) (фото П. Шрайбер).





Приложение

## Авторы и организации

**Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера**  
**Центр полярных и морских исследований в Объединении им. Гельмгольца, Бремерхафен, Германия**  
 Астрид Брахер  
 Герхард Каттнер  
 Борис П. Кох  
 Томас Крумпен  
 Гезине Молленхауэр  
 Мария Винтерфельд

**Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера**  
**Центр полярных и морских исследований в Объединении им. Гельмгольца, Хельголанд, Германия**  
 Ингеборг Буссманн  
 Александра Краберг

**Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера**  
**Центр полярных и морских исследований в Объединении им. Гельмгольца, Потсдам, Германия**  
 Андрей А. Андреев  
 Софья А. Антонова  
 Борис Бискаборн  
 Юлия Бойке  
 Нико Борнеманн  
 Бернхард Дикманн  
 Лаура С. Эпп  
 Маттиас Фукс  
 Гвидо Гроссе  
 Франк Гюнтер  
 Биргит Хайм  
 Ульрике Херцшу  
 Ханс-Вольфганг Хуббертен  
 Юлиане Клемм  
 Штефан Крузе  
 Моритц Лангер  
 Хьюг Лантуи  
 Ханно Майер  
 Анне Моргенштерн  
 Зина Мустер  
 Лариса Б. Назарова  
 Бастиан Нимейер  
 Ингмар Нитце  
 Томас Опель  
 Пьер Пауль Овердуин  
 Фолькер Рахольд  
 Лутц Ширрмайстер  
 Вальдемар Шнайдер  
 Петер Шрайбер

Георг Швамборн  
 Кристине Зигерт  
 Самуэль Штеттнер  
 Гюнтер Штооф  
 Катлен Р. Штооф-Ляйксенринг  
 Йенс Штраусс  
 Себастьян Веттерих  
 Марейке Вичорек  
 Хайке Х. Циммерманн

**Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера**  
**Центр полярных и морских исследований в Объединении им. Гельмгольца, Зюльт, Германия**  
 Лассе Зандер  
 Карен Х. Вилтшир

**Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Республика Саха, Россия**  
 Руслан М. Городничев  
 Михаил Н. Григорьев  
 Анатолий Н. Николаев  
 Людмила А. Пестрякова  
 Евгений С. Захаров

**Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия**  
 Дмитрий Ю. Большаянов  
 Антонина А. Четверова  
 Александр С. Макаров

**Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия**  
 Николай Н. Лашинский

**Центр материаловедения и исследования побережья им. Гельмгольца, Гестахт, Германия**  
 Тина Сандерс

**Германский центр исследования Земли в Объединении им. Гельмгольца, Потсдам, Германия**  
 Катрин Конерт  
 Эрик Ларману  
 Сюзанне Либнер  
 Торстен Закс  
 Андрей Серафимович  
 Кристиан Виле  
 Дирк Вагнер

**Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Кафедра физической географии и природопользования, Санкт-Петербург, Россия**  
 Григорий А. Соловьев  
 Дмитрий А. Субетто

**Берлинский университет им. Гумбольдта, Кафедра географии, Берлин, Германия**  
 Юлия Бойке  
 Моритц Лангер

**Карельский научный центр Российской академии наук, Институт водных проблем Севера, Петрозаводск, Россия**  
 Дмитрий А. Субетто

**Казанский федеральный университет, Казань, Россия**  
 Лариса А. Фролова  
 Ирина И. Вишнякова

**Ботанический институт им. В.Л. Комарова**  
**Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия**  
 Михаил П. Журбенко

**Усть-Ленский государственный природный заповедник, Тикси, Россия**  
 Екатерина Н. Абрамова  
 Ирина А. Якшина

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия**  
 Александр Ю. Деревягин  
 Татьяна В. Кузнецова  
 Владимир Е. Тумской

**Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия**  
 Михаил Н. Григорьев  
 Виктор В. Куницкий  
 Георгий Т. Максимов

**Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Мурманск, Россия**  
 Денис В. Моисеев

**Зенкенбергская научно-исследовательская станция Четвертичной палеонтологии, Веймар, Германия**  
Франк Кинаст

**Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия**  
Анна А. Абрамова  
Антонина А. Четверова  
Ирина В. Федорова  
Ирина И. Вишнякова

**Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия**  
Феликс Э. Арэ

**Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия**  
Светлана Ю. Евграфова

**Институт Леса им. В.Н.Сукачёва, Красноярск, Россия**  
Светлана Ю. Евграфова

**Технический университет Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия**  
Мартин Антонов

**Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия**  
Алексей Н. Фаге  
Михаил Н. Григорьев  
Владимир А. Каширцев  
Владимир В. Оленченко  
Леонид В. Цибизов  
Игорь Н. Ельцов

**Тюменский государственный нефтегазовый университет, Тюмень, Россия**  
Анна Н. Курчатова

**Гамбургский университет, Институт почвоведения, Гамбург, Германия**  
Фабиан Берманн  
Клавдия Финке  
Давид Холл  
Кристиан Кноблаух  
Ларс Кутцбах  
Ева-Мария Пфайффер  
Александр Шютт  
Себастиан Зубржицкий

**Гамбургский университет, Центр исследования систем Земли и устойчивого развития, Гамбург, Германия**  
Кристиан Кноблаух  
Ларс Кутцбах  
Ева-Мария Пфайффер

**Гейдельбергский университет, Институт географии, Гейдельберг, Германия**  
Софья А. Антонова

**Потсдамский университет, Институт наук о Земле и окружающей среде, Потсдам, Германия**  
Бернхард Дикманн  
Гвидо Гроссе  
Ульрике Херцшу  
Хьюг Лантуи  
Лариса Б. Назарова

**Потсдамский университет, Институт биологии и биохимии, Потсдам, Германия**  
Ульрике Херцшу  
Флориан Ельч  
Сюзанне Либнер  
Ральф Тидеманн

**Кёльнский университет, Институт геологии и минералогии, Кёльн, Германия**  
Андрей А. Андреев  
Мартин Меллес  
Джанет Ретемейер

**Лейпцигский университет, Институт географии, Лейпциг, Германия**  
Матиас Ульрих

**Аляскинский университет в Фэрбенксе, Геофизический институт, Фэрбенкс, Аляска, США**  
Александр Л. Холодов

**Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия**  
Андрей А. Картозия

**Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр биотехнологии Российской академии наук, Москва, Россия**  
Елена Е. Лебедева

**Якутское управление по гидрометеорологии, Тикси, Россия**  
Александр Ю. Гуков

## Список использованной литературы по главам

### 1

#### **Озерные отложения на Таймыре и Северной Земле как климатический архив**

- Andreev, A., Tarasov, P. E., Klimanov, V. A., Melles, M., Lisitsina, O. M. and Hubberten, H.-W. (2004) Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula during the Late Pleistocene and Holocene reconstructed from pollen records, *Quaternary International* 122, 69-84.
- Ebel, T., Melles, M., Niessen, F. (1999) Laminated sediments from Levinson-Lessing Lake, northern Central Siberia - a 30.000 year record of environmental history?, in: Kassens, H., Bauch, H. A., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokhov, L. A. (eds), *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history*, Lecture notes in earth science, Springer, Berlin, 425-435.
- Raab, A., Melles, M., Berger, G. W., Hagedorn, B., Hubberten, H.-W. (2003) Non-glacial paleoenvironments and the extent of Weichselian ice sheets on Severnaya Zemlya, Russian High Arctic, *Quaternary Science Reviews* 22, 2267-2283.
- Svendsen, J. I., Alexanderson, H., Astakhov, V. I., Demidov, I., Dowdeswell, J. A., Funder, S., Gataullin, V., Henriksen, M., Hjort, C., Houmark-Nielsen, M., Hubberten, H.-W., Ingolfsson, O., Jakobsson, M., Kjaer, K., Larsen, E., Lokrantz, H., Lunkka, J. P., Lysa, A., Mangerud, J., Matioushkov, A., Murray, A., Möller, P., Niessen, F., Nikolskaya, O., Polyak, L., Saarnisto, M., Siegert, C., Siegert, M. J., Spielhagen, R., Stein, R. (2004) Late Quaternary ice sheet history on northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews* 23, 1229-1271.
- Первые исследования выбросов, энергетических и водных характеристик почвы тундровой зоны - озера Лабаз и Левинсон-Лессинга, полуостров Таймыр**
- Boike, J., Roth, K., Overduin, P. P. (1998) Thermal and Hydrologic Dynamics of the Active Layer at a Continuous Permafrost Site (Taymyr Peninsula, Siberia), *Water Resources Research* 34, 355-363.
- Gundelwein, A., Müller-Lupp, T., Sommerkorn, M., Haupt, E. T., Pfeiffer, E.-M., Wüchmann, H. (2007) Carbon in tundra soils in the Lake Labaz region of arctic Siberia, *European Journal of Soil Science* 58, 1164-1174.
- Melles, M., Hagedorn, B., Bolshiyarov, D. (eds) (1997) Russian-German Cooperation: The Expedition Taymyr 1996, *Reports on Polar Research* 237.
- Pfeiffer, E.-M., Hartmann, J. (1995) Characterization of organic matter in permafrost-affected soils, in: Siegert, C., Bolshiyarov, D. (eds), *Reports on Polar Research* 175, 36-39, 83 - 89.
- Pfeiffer, E.-M., Gundelwein, A., Nöthen, T., Becker, H., Guggenberger, G. (1996) Characterization of organic matter in permafrost soils and sediments of the Taymyr Peninsula / Siberia and Severnaya Zemlya, in: Bolshiyarov, D. Y., Hubberten, H.-W. (eds), *Reports on Polar Research* 211, 46-63.

#### **Исследование многолетнемерзлых толщ Таймырской низменности (1994-1996)**

- Andreev, A. A., Siegert, C., Klimanov, V. A., Derevyagin, A. Y., Shilova, G. N., Melles, M. (2002) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate changes in the Taymyr lowland, Northern Siberia reconstructed from pollen records, *Quaternary Research* 57, 138-150.
- Andreev, A. A., Tarasov, P. E., Siegert, C., Ebel, T., Klimanov, V. A., Melles, M., Bobrov, A. A., Derevyagin, A. Y., Lubinski, D. J., Hubberten, H.-W. (2003) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, Arctic Russia, *Boreas* 32, 484-505.
- Kienast, F. W., Siegert, C., Derevyagin, A., Mai, D.-H. (2001) Climate implications of Late Quaternary plant macrofossil assemblages from the Taymyr Peninsula, Siberia, *Global and Planetary Change* 31, 265-281.
- Kienel, U., Siegert, C., Hahne, J. (1999) Late Quaternary paleoenvironmental reconstructions from a permafrost sequence (North Siberian Lowland, SE Taymyr Peninsula): a multidisciplinary case study, *Boreas* 28, 181-193.

#### **Углерод в почвах арктической пустыни Северной Земли**

- Bolshiyarov, D., Hubberten, H.-W. (1996) Russian-German Cooperation: The Expedition Taymyr 1995 and the Expedition Kolyma 1995 of the ISSP Pushchino Group, *Reports on Polar Research* 211.
- Pfeiffer E.-M., Gundelwein, A., Nöthen, T., Becker, H., Guggenberger, G. (1996) Characterization of organic matter in permafrost soils and sediments of the Taymyr Peninsula/Siberia and Severnaya Zemlya/Arctic region, in: Bolshiyarov, D., Hubberten, H.-W. (eds), *Russian-German Cooperation: The Expedition Taymyr 1995, Reports on Polar Research* 211, 46-63, 186-195.
- Zhurbenko, M. P. (1995) *Geobotanical Studies*, in: Siegert, C., Bolshiyarov, D. (eds), *The Expedition Taymyr 1994, Reports on Polar Research* 175, 25-26.

#### **Сибирские реки: гидрология, геохимия и перенос осадков - проект «СИСТЕМА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ» в 1994-1997 гг.**

- Lara, R. J., Rachold, V., Kattner, G., Hubberten, H.-W., Guggenberger, G., Skoog, A., Thomas, D. N. (1998) Dissolved organic matter and nutrients in the Lena River, Siberian Arctic: characteristics and distribution, *Marine Chemistry* 59, 301-309.
- Levasseur, S., Rachold, V., Birk, V., Allegre, C. J. (2000) Osmium behaviour in estuaries: the Lena River example, *Earth and Planetary Science Letters* 177, 227-235.
- Rachold, V. (1999) Major, trace, and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean, in: Kassens, H., Bauch, H., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokhov, L. A. (eds), *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history*, Springer, Berlin, 199-222.

Rachold, V., Eisenhauer, A., Hubberten, H.-W., Hansen, B., Meyer, H. (1997) Sr isotopic composition of suspended particulate material (SPM) of East Siberian Rivers: Sediment transport to the Arctic Ocean, Arctic Antarctic and Alpine Research 29, 422-429.

Rachold, V., Hubberten, H.-W. (1999) Carbon isotope composition of particulate organic material in East Siberian rivers, Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history, in: Kassens, H., Bauch, H., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokhov, L.A. (eds), Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history, Springer, Berlin, 223-238.

## 2

**Истоки научного проекта «Дельта Лены»: научная стратегия, сотрудничество и материально-техническое обеспечение**

Rachold, V. (1999) Expeditions in Siberia in 1998, Reports on Polar and Marine Research 315.

Rachold, V. (2000) Expeditions in Siberia in 1999, Reports on Polar and Marine Research 354.

Rachold, V. (2002) The modern and ancient terrestrial and coastal environment of the Laptev Sea region, Siberian Arctic, Polarforschung 70.

Rachold, V., Grigoriev, M. N. (2001) Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: The Expedition Lena 2000, Reports on Polar and Marine Research 388.

**Первые годы почвенно-климатических исследований вечной мерзлоты на острове Самойловском и в его окрестностях (исследования 1998 - 2001 гг.)**

Alawi, M., Lipski, A., Sanders, T., Pfeiffer, E.-M., Spieck, E. (2007) Cultivation of a novel cold-adapted nitrite oxidizing beta proteo bacterium from Siberian Arctic, The ISME Journal 1, 256-264.

Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stooß, G., Westermann, S., Wischniewski, K., Wille, C., Hubberten, H.-W. (2013) Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998-2011), Biogeosciences 10, 2105-2128.

Kutzbach, L., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. (2004) Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra, Lena Delta, Northern Siberia, Biogeochemistry 69, 341-362.

**Полуостров Быковский: первая наземная экспедиция с акцентом на изучение палеоклимата**  
Kienast, F., Schirrmeister, L., Siegert, C., Tarasov, P. (2005) Palaeobotanical evidence for warm summers in the East Siberian Arctic during the last cold stage, Quaternary Research 63, 283-300.

Meyer, H., Dereviagin, A., Siegert, C., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W. (2002) Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia - Hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges, Permafrost and Periglacial Processes 13, 91-105.

Schirrmeister, L., Siegert, C., Kuznetsova, T., Kuzmina, S., Andreev, A. A., Kienast, F., Meyer, H., Bobrov, A. A. (2002) Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia, Quaternary International 89, 97-118.

Wetterich, S., Schirrmeister, L., Pietrzyński, E. (2005) Freshwater ostracodes in Quaternary permafrost deposits from the Siberian Arctic, Journal of Paleolimnology 34, 363-376.

**Геоморфологические исследования и изучение эрозии прибрежной зоны в экспедициях корабельного базирования 1998-2002 гг. на судах «Дунай», «Софрон Данилов» и «Павел Башмаков»**

Are, F. E., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Rachold, V. (2005) Using thermoterrace dimensions to calculate the coastal erosion rate, Geo-Marine Letters 25, 121-126.

Are, F., Reimnitz, E., Grigoriev, M., Hubberten, H.-W., Rachold, V. (2008) The Influence of Cryogenic Processes on the Erosional Arctic Shoreface, Journal of Coastal Research 24, 110-121.

Rachold, V., Eicken, H., Gordeev, V. V., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Lisitzin, A. P., Shevchenko, V. P., Schirrmeister, L. (2003) Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean, in: Stein, R., Macdonald, R. W. (eds), Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean: Present and Past, Springer, Berlin, 33-55.

Rachold, V., Grigoriev, M. N., Are, F. E., Solomon, S., Reimnitz, E., Kassens, H., Antonow, M. (2000) Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas, International Journal of Earth Sciences 89, 450-460.

Rachold, V., Grigoriev, M. N., Bauch, H. A. (2002) An estimation of the sediment budget in the Laptev Sea during the last 5,000 years, Polarforschung 70, 151-157.

**Озерные исследования на острове Арга: история и формирование дельты реки Лены**

Andreev, A., Tarasov, P. E., Schwamborn, G., Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Bobrov, A. A., Klimanov, V. A., Rachold, V., Hubberten, H.-W. (2004) Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, Arctic Russia, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 209, 197-217.

Biskaborn, B. K., Herzsich, U., Bolshiyakov, D. Y., Savelieva, L., Diekmann, B. (2013) Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena Delta, Siberian Arctic, Journal of Paleolimnology 49, 155-170.

Schirrmeister, L., Grosse, G., Schelle, M., Fuchs, M., Krbetschek, M., Ulrich, M., Kunitsky, V., Grigoriev, M., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Klimova, I., Babiy, O., Bobrov, A., Wetterich, S., Schwamborn, G. (2011) Late Quaternary paleoenvironmental records from the western Lena Delta, Arctic Siberia, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 299, 175-196.

Schwamborn, G., Andreev, A., Rachold, V., Hubberten, H.-W., Grigoriev, M. N., Tumskey, V., Pavlova, E. Y., Dorozhkina, M. V. (2002) Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, Western Lena River delta, during Late Pleistocene and Holocene time, Polarforschung 70, 69-82.

Schwaborn, G., Rachold, V., and Grigoriev, M. N. (2002) Late Quaternary Sedimentation History of the Lena Delta, *Quaternary International* 89, 119-134.

**Микробная трансформация углерода в сезонно-талом горизонте и вечной мерзлоте**

Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N., Pfeiffer, E.-M. (2018) Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost, *Nature Climate Change* 8, 309-312.

Liebner, S., Zeyer, J., Wagner, D., Schubert, C., Pfeiffer, E.-M., Knoblauch, C. (2011) Methane oxidation associated with submerged brown mosses reduces methane emissions from Siberian polygonal tundra, *Journal of Ecology* 99, 914-922.

Wagner, D., Schirmack, J., Ganzert, L., Morozova, D., Mangelsdorf, K. (2013) *Methanosarcina soligelidi* sp. nov., a desiccation- and freeze-thaw-resistant methanogenic archaeon from a Siberian permafrost-affected soil, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 63, 2986-2991.

**Полевые работы по реконструкции палео-окружающей среды**

Andreev, A., Grosse, G., Schirrmeister, L., Kuznetsova, T. V., Kuzmina, S. A., Bobrov, A. A., Tarasov, P. E., Novenko, E. Y., Meyer, H., Derevyagin, A. Y., Kienast, F., Bryantseva, A., Kunitsky, V. V. (2009) Weichselian and Holocene palaeoenvironmental history of the Bol'shoy Lyakhovsky Island, New Siberian Archipelago, Arctic Siberia, *Boreas* 38, 72-110.

Palagushkina, O. V., Wetterich, S., Schirrmeister, L., Nazarova, L. B. (2017) Modern and fossil diatom assemblages from Bol'shoy Lyakhovsky Island (New Siberian Archipelago, Arctic Siberia), *Contemporary Problems of Ecology* 10, 380-394.

Sher, A. V., Kuzmina, S. A., Kuznetsova, T. V., Sulerzhinsky, L. D. (2005) New insights into the Weichselian environment and climate of the East Siberian Arctic, derived from fossil insects, plants, and mammals, *Quaternary Science Reviews* 24, 533-569.

Wetterich, S., Rudaya, N., Andreev, A. A., Opel, T., Schirrmeister, L., Meyer, H., Tumskey, V. (2014) Ice Complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 Interstadial, *Quaternary Science Reviews* 84, 39-55.

### 3

**Бурение подводной вечной мерзлоты в ходе экспедиции «COAST 2005»**

Rachold, V., Bolshiyakov, D. Y., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Junker, R., Kunitsky, V. V., Merker, F., Overduin, P. P., Schneider, W. (2007) Near-shore Arctic Subsea Permafrost in Transition, *EOS: Transactions of the American Geophysical Union* 88, 149-156.

Overduin, P. P., Grigoriev, M. N., Junker, R., Rachold, V., Kunitsky, V. V., Bolshiyakov, D. Y., Schirrmeister, L. (2007) Russian-German Cooperation System Laptev Sea: The Expedition Coast I. Coast Drilling Campaign 2005: Subsea permafrost studies in the near-shore zone of the Laptev Sea, in: Schirrmeister, L. (ed), *Expeditions in Siberia in 2005*, Reports on Polar and Marine Research 550.

**Старая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский» и ее расширение в 2005 году**

Hubberten, H.-W., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M., Boike, J., Gukov, A. Y. (2006) *The Russian-German*

*Research Station Samoylov, Lena Delta - A Key Site for Polar Research in the Siberian Arctic,*

*Polarforschung* 73, 111 - 116.

Pfeiffer, E.-M., Grigoriev, M. N. (2002) Russian-German cooperation System Laptev Sea: The expedition Lena-Anabar 2003, *Reports on Polar Marine Research* 426, 1-186.

Rachold, V., Grigoriev, M. N. (1999) Russian-German cooperation System Laptev Sea: The Expedition Lena 1998, *Reports on Polar Marine Research* 315, 1-268.

Schirrmeister, L., Grigoriev, M. N., Kutzbach, L., Wagner, D., Bolshiyakov, D. Y. (2004) Russian-German cooperation System Laptev Sea: The expedition Lena-Anabar 2003, *Reports on Polar and Marine Research* 489, 1-231.

Wagner, D., Kobabe, S., Pfeiffer, E.-M., Hubberten, H.-W. (2003) Microbial controls on methane fluxes from a polygonal tundra of the Lena Delta, Siberia, *Permafrost and Periglacial Processes* 14, 173-185.

**Установка обсерватории станции «Остров Самойловский» - Многолетнемерзлые почвы и парниковые газы (исследования 2002-2006 гг.)**

Pfeiffer, E.-M., Wagner, D., Kobabe, S., Kutzbach, L., Kurchatova, A., Stooft, G., Wille, C. (2002) Modern Processes in Permafrost Affected Soils, in: Pfeiffer, E.-M., Grigoryev, M. (eds), *Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: The Lena Delta 2001 Expedition*, Reports on Polar and Marine Research 426, 21-41.

Kutzbach, L., Stooft, G., Schneider, W., Wille, C., Abramova, E. N. (2004) Seasonal progression of active-layer thickness dependent on microrelief, in: Schirrmeister, L. et al. (eds), *Russian-German Cooperation System Laptev Sea: The Expedition Lena-Anabar 2003*, Reports on Polar and Marine Research 489, 34-38.

Kutzbach, L., Wille, C., Pfeiffer, E.-M. (2007) The exchange of carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River Delta, Northern Siberia, *Biogeosciences* 4, 869-890.

Wille, C., Kutzbach, L., Sachs, T., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. (2008) Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling, *Global Change Biology* 14, 1395-1408.

**Микробная трансформация азота в активном слое почвы и более глубоких мерзлотных отложениях в дельте реки Лены**

Beeremann, F., Langer, M., Wetterich, S., Strauss, J., Boike, J., Fiencke, C., Schirrmeister, L., Pfeiffer, E.-M., Kutzbach, L. (2017) Permafrost thaw and liberation of inorganic nitrogen in eastern Siberia, *Permafrost and Periglacial Process* 28, 605-618.

Fiencke, C., Kopelke, S., Pfeiffer, E.-M. (2007) Microbial studies on nitrification from permafrost environments, in: Schirrmeister, L., Wagner, D., Grigoriev, M. N., Bolshiyakov, D. Y. (eds), *Russian-German Cooperation System Laptev Sea, The Expedition Lena 2005*, Reports on Polar and Marine Research 550, 61-65.



Sanders, T., Fiencke, C., Pfeiffer, E.-M. (2010) Small-Scale Variability of Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN), C/N Ratios and Ammonia Oxidizing Capacities in Various Permafrost Affected Soils of Samoylov Island, Lena River Delta, Northeast Siberia, *Polarforschung* 80, 23-35.

**Геокриологические и палеоклиматические исследования в береговой зоне моря Лаптевых (Новосибирские острова)**

Kienast, F., Wetterich, S., Kuzmina, S., Schirrmeister, L., Andreev, A., Tarasov, P., Nazarova, L., Kossler, A., Frolova, A., Kunitsky, V. V. (2011) Paleontological records indicate the occurrence of open woodlands in a dry inland climate at the present-day Arctic coast in western Beringia during the last interglacial, *Quaternary Science Reviews* 30, 2134-2159.

Schirrmeister, L., Grosse, G., Kunitsky, V. V., Fuchs, M. C., Krbetschek, M., Andreev, A. A., Herzsich, U., Babyi, O., Siegert, C., Meyer, H., Derevyagin, A.Y., Wetterich, S. (2010) The mystery of Bunge Land (New Siberian Archipelago): Implications for its formation based on palaeo-environmental records, geomorphology, and remote sensing, *Quaternary Science Reviews* 29, 3598-3614.

Schirrmeister, L., Grosse, G., Wetterich, S., Overduin, P. P., Strauss, J., Schuur, E. A. G., Hubberten, H.-W. (2011) Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the Northeast Siberian Arctic, *Journal of Geophysical Research* 116, G00M02.

Schirrmeister, L., Kunitsky, V. V., Grosse, G., Wetterich, S., Meyer, H., Schwamborn, G., Babyi, O., Derevyagin, A. Y., Siegert, C. (2011) Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on North-East Siberian Arctic coastal lowlands and islands - a review, *Quaternary International* 241, 3-25.

**Долговременные наблюдения за водной фауной в озерах и прудах дельты реки Лены**

Абрамова, Е.Н., Жулай, И.А. (2016) Появление новых видов зоопланктона в водоемах дельты р. Лены. Труды Зоологического института РАН, Том 320, No 4, 2016, с. 473-487.

Abramova, E. N., Vishnyakova, I., Boike, J., Abramova, A., Solovyev, G., Martynov, F. (2017) Structure of freshwater zooplankton communities from tundra waterbodies in the Lena River Delta, Russian Arctic, with a discussion on new records of glacial relict copepods, *Polar Biology* 40, 1629-1643.

## 4

**Динамика берегов моря Лаптевых**

Are, F.E., R Climate Modelling eimnitz, E., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Rachold, V. (2008) The Influence of Cryogenic Processes on the Erosional Arctic Shoreface, *Journal of Coastal Research* 24, 110-121.

Григорьев, М.Н. (2008) Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири, докторская диссертация, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск.

Günther, F., Overduin, P. P., Sandakov, A. V., Grosse, G., Grigoriev, M. N. (2013) Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region, *Biogeosciences* 10, 4297-4318.

Lantuit, H., Overduin, P. P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D., Brown, J., Cherkashov, G., Drozdov, D., Forbes, D. L., Graves-Gaylord, A., Grigoriev, M., Hubberten, H.-W., Jordan, J., Jorgenson, T., Ødegård, R., Ogorodov, S., Pollard, W. H., Rachold, V., Sedenko, S., Solomon, S., Steenhuisen, F., Streletskaia, I., Vasiliev, A. (2011) The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines, Estuaries and Coasts 35, 383-400.

Rachold, V., Grigoriev, M. N., Bauch, H. (2000) An Estimation of the Sediment Budget in the Laptev Sea during the Last 5000 Years, *Polarforschung* 70, 151-157.

**Полевые работы, цифровое моделирование подводной вечной мерзлоты и вопрос существования в ней газовых гидратов**

Bussmann, I., Hackbusch, S., Schaal, P., Wichels, A. (2017) Methane distribution and oxidation around the Lena Delta in summer 2013, *Biogeosciences* 14, 4985-5002.

Overduin, P. P., Haberland, C., Ryberg, T., Kneier, F., Jacobi, T., Grigoriev, M. N., Ohrnberger, M. (2015) Submarine permafrost depth from ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters* 42, 7581-7588.

Overduin, P., Liebner, S., Knoblauch, C., Günther, F., Wetterich, S., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W., Grigoriev, M. N. (2015) Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole, *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences* 120, 965-978.

Romanovskii, N. N., Hubberten, H.-W., Gavrilov, A. V., Eliseeva, A. A., Tipenko, G. S. (2005) Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas, *Geo-marine letters* 25, 167-182.

Winterfeld, M., Schirrmeister, L., Grigoriev, M. N., Kunitsky, V. V., Andreev, A., Murray, A., Overduin, P. P. (2011) Coastal permafrost landscape development since the Late Pleistocene in the western Laptev Sea, Siberia, *Boreas* 40, 697-713.

**Деграция вечной мерзлоты, термокарст и термоэрозия - полевые работы на острове Курунгнах**

Antonova, S., Sudhaus, H., Strozzi, T., Zwieback, S., Kääh, A., Heim, B., Langer, M., Bornemann, N., Boike, J. (2018) Thaw subsidence of a yedoma landscape in northern Siberia, measured in situ and estimated from TerraSAR-X interferometry, *Remote Sensing* 10, 494.

Morgenstern, A., Grosse, G., Günther, F., Fedorova, I., Schirrmeister, L. (2011) Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta, *The Cryosphere* 5, 849-867.

Morgenstern, A., Ulrich, M., Günther, F., Roessler, S., Fedorova, I. V., Rudaya, N. A., Wetterich, S., Boike, J., Schirrmeister, L. (2013) Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study, *Geomorphology* 201, 363-379.

Stettner, S., Beamish, A., Bartsch, A., Heim, B., Grosse, G., Roth, A., Lantuit, H. (2017) Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series, *Remote Sensing* 10, 51.

Ulrich, M., Morgenstern, A., Günther, F., Reiss, D., Bauch, K. E., Hauber, E., Rössler, S., Schirrmeyer L. (2010) Thermokarst in Siberian ice-rich permafrost: Comparison to asymmetric scalloped depressions on Mars, *Journal of Geophysical Research* 115, E10009.

**От бензопилы до моделирования климата. Ледяные жилы как архив зимнего климата.**

Meyer, H., Opel, T., Laepple, T., Hoffmann, K., Dereviagin, A. Y., Werner, M. (2015) Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience* 8, 122-125.

Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Siegert, C., Schirrmeyer, L., Hubberten, H.-W. (2002) Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia - Hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges, *Permafrost and Periglacial Processes* 13, 91-105.

Opel, T., Wetterich, S., Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Fuchs, M. C., Schirrmeyer, L. (2017) Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait), *Climate of the Past* 13, 587-611.

Opel, T., Laepple, T., Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Wetterich, S. (2017) Northeast Siberian ice wedges confirm Arctic winter warming over the past two millennia, *The Holocene* 27, 1789-1796.

Dereviagin, A. Y., Chizhov, A. B., Meyer, H. (2010) Winter temperature conditions of the Laptev sea region during the last 50 Thousand Years in the isotopic records of ice wedges, *Kriosfera Zemli (Earth Cryosphere)* 14, 32-40.

**Исторические и современные изменения границы лесной зоны и озер северной Сибири в связи с потеплением**

Bonan, G. B. (2008) Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320, 1444-1449.

Herzschuh, U., Birks, H. J. B., Laepple, T., Andreev, A., Melles, M., Brigham-Grette, J. (2016) Glacial legacies on interglacial vegetation at the Pliocene-Pleistocene transition in NE Asia, *Nature Communications* 7.

Kruse, S., Wieczorek, M., Jeltsch, F., Herzschuh, U. (2016) Treeline dynamics in Siberia under changing climates as inferred from an individual-based model for Larix, *Ecological Modelling* 338, 101-121.

**Значимость органического вещества и оценка запасов углерода на севере Сибири**

Fuchs, M., Grosse, G., Strauss, J., Günther, F., Grigoriev, M., Maximov, G. M., Hugelius, G. (2018) Carbon and nitrogen pools in thermokarst-affected permafrost landscapes in Arctic Siberia, *Biogeosciences* 15, 953-971.

Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.-L., Schirrmeyer, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J. A., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Y., Z., Palmag, J., and Kuhry, P. (2014) Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps, *Biogeosciences* 11, 6573-6593.

Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., Pfeiffer, E.-M. (2013) Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, *Biogeosciences* 10, 3507-3524.

Schirrmeyer, L., Grosse, G., Wetterich, S., Overduin, P. P., Strauss, J., Schuur, E. A. G., Hubberten, H.-W. (2011) Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic, *Journal of Geophysical Research* 116, G00M02.

Strauss, J., Schirrmeyer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C., Romanovsky, V., Schädel, C., Schneider von Deimling, T., Schuur, E. A. G., Shmelev, D., Ulrich, M., Veremeeva, A. (2017) Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability, *Earth-Science Reviews* 172, 75-86.

**Экспедиции на резиновых лодках и малогабаритных речных судах - гидрология и геоморфология дельты реки Лены**

Большаянов, Д.Ю., Макаров, А.С., Шнайдер, В., Штоф, Г. (2013) Происхождение и развитие дельты р. Лены, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, с. 295.

Bolshiyakov, D., Makarov, A., Savelieva, L. (2015) Lena River Delta formation during the Holocene, *Biogeosciences* 12, 579-593.

Fedorova, I., Chetverova, A., Bolshiyakov, D., Makarov, A., Boike, J., Heim, B., Morgenstern, A., Overduin, P. P., Wegner, C., Kashina, V., Eulenburg, A., Dobrotina, E., Sidorina, I. (2015) Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations, *Biogeosciences* 12, 345-363.

Bolshiyakov, D., Makarov, A. (2001) Geomorphologic route along the URASALAKH River, *Reports on Polar and Marine Research* 489, 67-74.

**Мобилизация и отложения углерода в речной системе Лены**

Dubinenkov, I., Flerus, R., Schmitt-Kopplin, P., Kattner, G., Koch, B. P. (2015) Origin-specific molecular signatures of dissolved organic matter in the Lena Delta, *Biogeochemistry* 123, 1-14.

Winterfeld, M., Laepple, T., Mollenhauer, G. (2015) Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia - Part 1: Radiocarbon inventories, *Biogeosciences* 12, 3769-3788.

Winterfeld, M., Goñi, M. A., Just, J., Hefter, J., Mollenhauer, G. (2015) Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia - Part 2: Lignin-derived phenol compositions, *Biogeosciences* 12, 2261-2283.

**Голоценовые озера в районе дельты Лены**

Biskaborn, B. K., Herzschuh, U., Bolshiyakov, D., Savelieva, L., Zibulski, R., Diekmann, B. (2013) Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena Delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology* 49, 155-170.

Biskaborn, B. K., Subetto, D., Savelieva, L. A., Vakhrameeva, P. S., Hansche, A., Herzschuh, U., Klemm, J., Heinecke, L., Pestryakova, L., Meyer, H., Kuhn, G., Diekmann, B. (2016) Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability, *Quaternary Science Reviews* 147, 406-421.

- Diekmann, B., Pestryakova, L., Nazarova, L., Subetto, D., Tarasov, P. E., Stauch, G., Thiemann, A., Lehmkuhl, F., Biskaborn, B. K., Kuhn, G., Henning, D., Müller, S. (2017) Late Quaternary Lake Dynamics in the Verkhoyansk Mountains of Eastern Siberia: Implications for Climate and Glaciation History, *Polarforschung* 86, 97-110.
- Schleusner, P., Biskaborn, B. K., Kienast, F., Wolter, J., Subetto, D., Diekmann, B. (2015) Basin evolution and palaeoenvironmental variability of the thermokarst lake El'gene-Kyuele, Arctic Siberia, *Boreas* 44, 216-229.
- Schwaborn, G., Dix, J. K., Bull, J. M., Rachold, V. (2002) High-resolution seismic and ground-penetrating radar - geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia, *Permafrost and Periglacial Processes* 134, 259-269.
- Комплексные логистические операции - воздушные наблюдения за потоками тепла и парниковых газов с использованием комплекса аппаратуры «Helipod»**  
Kohnert, K., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Sachs, T. (2017) Strong geologic methane emissions from discontinuous terrestrial permafrost in the Mackenzie Delta, Canada, *Scientific Reports* 7, 5828.
- Kohnert, K., Juhls, B., Muster, S., Antonova, S., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Sachs, T. (2018) Toward understanding the contribution of waterbodies to the methane emissions of a permafrost landscape on a regional scale—A case study from the Mackenzie Delta, Canada, *Global Change Biology* 24, 3976-3989.
- Lampert, A., Hartmann, J., Pätzold, A., Lobitz, L., Hecker, P., Kohnert, K., Larmanou, E., Serafimovich, A., Sachs, T. (2018) Comparison of the fast Lyman-Alpha and LICOR hygrometers for measuring airborne turbulent fluctuations, *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 2523-2536.
- Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Kohnert, K., Zona, D., Sachs, T. (2018) Upscaling surface energy fluxes over the North Slope of Alaska using airborne eddy-covariance measurements and environmental response functions, *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 10007-10023.
- Привлечение новых групп ученых из Германии к исследованиям в ходе экспедиций «Лена»**  
Fedorova, I., Chetverova, A., Bolshiyarov, D., Makarov, A., Boike, J., Heim, B., Morgenstern, A., Overduin, P. P., Wegner, C., Kashina, V., Eulenburg, A., Dobrotina, E., Sidorina, I. (2015) Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations, *Biogeosciences* 12, 345-363.
- Fofonova, V., Danilov, S., Androsov, A., Janout, M., Bauer, M., Overduin, P. P., Itkin, P., Wiltshire, K. H. (2015) Impact of wind and tides on the Lena River freshwater plume dynamics in the summer season, *Ocean Dynamics* 65, 951-968.
- Heim, B., Abramova, E., Doerffer, R., Günther, F., Hölemann, J., Kraberg, A., Lantuit, H., Loginova, A., Martynov, F., Overduin, P. P., Wegner, C. (2014) Ocean colour remote sensing in the southern Laptev Sea: evaluation and applications, *Biogeosciences* 11, 4191-4210.
- Kraberg, A., Druzhkova, E., Heim, B., Löder, M., Wiltshire, K. H. (2013) Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography, *Biogeosciences* 10, 7263-7277.
- Overduin, P., Wetterich, S., Günther, F., Grigoriev, M. N., Grosse, G., Schirmeister, L., Hubberten, H.-W., Makarov, A. S. (2016) Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia, *Cryosphere* 10, 1449-1462.
- Десятилетие прибрежных исследований в дельте реки Лены**  
Bussmann, I. (2013) Distribution of methane in the Lena Delta and Buor-Khaya Bay, Russia, *Biogeosciences*, 10, 4641-4652
- Örek, H., Doerffer, R., Röttgers, R., Boersma, M. and Wiltshire, K. H. (2013) Contribution to a bio-optical model for remote sensing of Lena River water, *Biogeosciences*, 10, 7081-7094
- Kraberg, A. C., Druzhkova, E., Heim, B., Loeder, M. J. G. and Wiltshire, K. H. (2012) Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography, *Biogeosciences Discussions*, 9, 1-40
- Goncalves-Araujo, R., Stedmon, C. A., Heim, B., Dubinenkov, I., Kraberg, A. C., Moiseev, D. and Bracher, A. (2015) From fresh to marine waters: characterization and fate of dissolved organic matter in the Lena River Delta region, Siberia., *Frontiers in Marine Science*, 2, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.844928>
- 5**  
**Новая научно-исследовательская станция «Остров Самойловский»: строительство, церемония открытия, оборудование и эксплуатация**  
Hubberten, H.-W., Grigoriev, M. N. (2014) The new Arctic Research Station "Samoylov Island" in the Lena Delta: Prospects for joint Russian-German Studies, *Nova Acta Leopoldina* 117, 65-76.
- Остров Самойловский в международных программах и научно-исследовательских сетях - «FLUXNET», «GTN-P», «INTERACT»**  
Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stooß, G., Westermann, S., Wischniewski, K., Wille, C., and Hubberten, H.-W. (2013) Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998/2011), *Biogeosciences*, 10, 2105-2128.
- Boike, J., Nitzbon, J., Anders, K., Grigoriev, M., Bolshiyarov, D., Langer, M., Lange, S., Bornemann, N., Morgenstern, A., Schreiber, P., Wille, C., Chadburn, S., Gouttevin, I., and Kutzbach, L. (2018) A 16-year record (2002-2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, in review.

Kutzbach, L., Sachs, T., Boike, J., Wille, C., Schreiber, P., Langer, M., and Pfeiffer, E.-M. (2015) FLUXNET2015 RU-Sam Samoylov, Tech. rep., FluxNet; University of Hamburg; Alfred Wegener Institute; GFZ German Research Centre for Geosciences, <https://doi.org/10.18140/FLX/1440185>.

**Краткий обзор российско-германских проектов по исследованию вечной мерзлоты «CARBOPERM» и «CoPF»**

Pfeiffer, E.-M., Hubberten, H.-W. (2017) CARBOPERM - Kohlenstoff im Permafrost: Bildung, Umwandlung und Freisetzung, Booklet CARBOPERM-Projekt des BMBF.

Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., Pfeiffer, E.-M. (2013) Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, *Biogeosciences* 10, 3507-3524.

**Использование метода дистанционного зондирования в районе моря Лаптевых**

Antonova, S., Sudhaus, H., Strozi, T., Zwieback, S., Kääh, A., Heim, B., Langer, M., Bornemann, N., Boike, J. (2018) Thaw Subsidence of a Yedoma Landscape in Northern Siberia, Measured In Situ and Estimated from TerraSAR-X Interferometry, *Remote Sensing* 10, 494.

Kruppen, T., Janout, M., Hodges, K. I., Gerdes, R., Girard-Arduin, F., Hölemann, J. A., Willmes, S. (2013) Variability and trends in Laptev Sea ice outflow between 1992 - 2011, *The Cryosphere* 7, 349-363.

Langer, M., Westermann, S., Boike, J. (2010) Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of wet polygonal tundra in Siberia - implications for MODIS LST based permafrost monitoring, *Remote Sensing of Environment* 114, 2059-2069.

Muster, S., Langer, M., Heim, B., Westermann, S., Boike, J. (2012) Subpixel heterogeneity of ice-wedge polygonal tundra: a multi-scale analysis of land cover and evapotranspiration in the Lena River Delta, Siberia, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 17301..

Nitze, I., Grosse, G. (2016) Detection of landscape dynamics in the Arctic Lena Delta with temporally dense Landsat time-series stacks, *Remote Sensing of Environment* 181, 27-41.

**Мультидисциплинарные исследования на островах Самойловский и Курунгнах: геофизика, дистанционное зондирование, геология, ботаника и почвоведение**

Хазин, Л.Б., Хазина, И.В., Кузьмина, О.Б. (2017) Микропалеонтологическая характеристика (остракоды, палиноморфы) многолетнемерзлых отложений, вскрытых скважиной на о. Курунгнах (дельта Лены, северо-восток Сибири), Труды XIII Международного научного конгресса ГЕО-Сибирь, Новосибирск, 2017. С. 7-11.

Tsibizov, L., Rusalimova, O. (2017) Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper layer structure, *Lena Delta, Russia, Near Surface Geophysics* 15, 527-532.

Tsibizov, L., Fage, A., Rusalimova, O., Fadeev, D., Olenchenko, V., Yeltsov, I., Kashirtsev, V. (2017) Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography, Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, *Reports on Polar and Marine Research* 709, 56-69.

Tsibizov, L., Fage, A., Olenchenko, V., Grigorevskaya, A., Sosnovtseva, K., Esin, E., Nikitich, P., Kartozia, A., Lashchinskiy, N., Kashirtsev, V., Yeltsov, I. (2018) Multidisciplinary research of cryolithic zone evolution: selected features of permafrost environment in Lena delta case study, Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2017, Submitted to *Reports on Polar and Marine Research*.

Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Фаре А.Н. (2017) Электротомография в Российской Арктике по данным полевых исследований и трехмерного численного моделирования, *Деловой журнал Neftegaz.RU. № 2, С. 54-64*

**Глубокое погружение в прошлое: наземные мерзлотные буровые кампании**

Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stoof, G., Westermann, S., Wischniewski, K., Wille, C., and Hubberten, H.-W. (2013) Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998-2011), *Biogeosciences* 10, 2105-2128.

Schirrmeister, L., Grosse, G., Schnelle, M., Fuchs, M., Krbetschek, M., Ulrich, M., Kunitsky, V., Grigoriev, M., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Babiy, O., Klimova, I., Bobrov, A., Wetterich, S., Schwamborn, G. (2011) Late Quaternary paleoenvironmental records from the western Lena Delta, Arctic Siberia, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 299, 175-196.

Долгосрочные измерения потоков энергии, воды и парниковых газов между землей и атмосферой с 2002 года до настоящего времени и в перспективе Wille, C., Kutzbach, L., Sachs, T., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. (2008) Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: Eddy covariance measurements and modeling, *Global Change Biology* 14, 1395-1408.

Chadburn, S. E., Krinner, G., Porada, P., Bartsch, A., Beer, C., Beletti Marchesini, L., Boike, J., Ekici, A., Elberling, B., Friberg, T., Hugelius, G., Johansson, M., Kuhry, P., Kutzbach, L., Langer, M., Lund, M., Parmentier, F.-J. W., Peng, S., Van Huissteden, K., Wang, T., Westermann, S., Zhu, D., Burke, E. J. (2017) Carbon stocks and fluxes in the high latitudes: using site-level data to evaluate Earth system models, *Biogeosciences* 14, 5143-5169.

**Трансформация углерода при оттаивании вечной мерзлоты в дельте реки Лены**

Höfle, S., Kusch, S., Talbot, H. M., Mollenhauer, G., Zubrzycki, S., Burghardt, S., Rethemeyer, J. (2015) Characterization of bacterial populations in permafrost soils using bacteriohopanepolyols, *Organic Geochemistry* 88, 1-16.

Höfle S., Rethemeyer, J., Mueller, C. W., John, S. (2013) Organic matter composition and stabilization in a polygonal tundra soil of the Lena-Delta, *Biogeosciences* 10, 3145-3158.

Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N., Pfeiffer, E.-M. (2018) Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost, *Nature Climate Change* 8, 309-312.

Walz, J., Knoblauch, C., Böhme, L., Pfeiffer, E.-M. (2017) Regulation of soil organic matter decomposition in permafrost-affected Siberian tundra soils - Impact of oxygen availability, freezing and thawing, temperature, and labile organic matter, *Soil Biology and Biochemistry* 110, 34-43.

Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., Pfeiffer, E.-M. (2013) Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, *Biogeosciences* 10, 3507-3524.

## Выходные данные

Институт полярных и морских исследований им.  
Альфреда Вегенера  
Центр полярных и морских исследований в  
Объединении им. Гельмгольца

На Хандельсхафен 12  
27570 Бремерхафен  
Германия  
Телефон: +49 471 / 48 31 0  
info@awi.de  
www.awi.de/en

Телеграфенберг A45  
14473 Потсдам  
Телефон: +49 331 288 2100

Редакторы:  
Ханс-Вольфганг Хуббертен, Дмитрий Ю. Большианов,  
Михаил Н. Григорьев, Гвидо Гроссе, Анне Моргенштерн,  
Ева-Мария Пфайффер, Фолькер Рахольд, Лутц  
Ширрмайстер

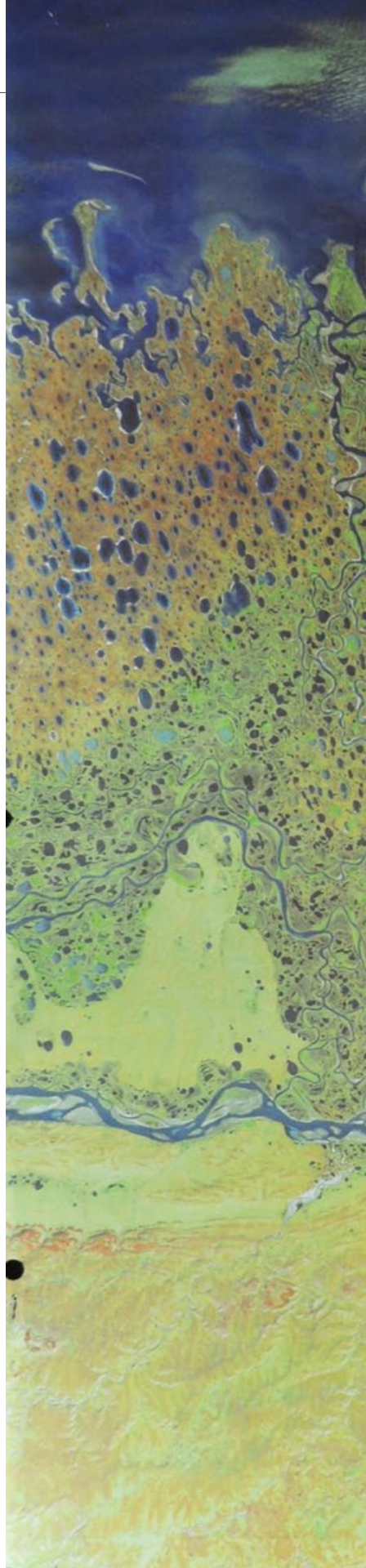
Дизайн: Glinsmann Design, Бремен  
Печать: BerlinDruck GmbH + Co KG, Ахим

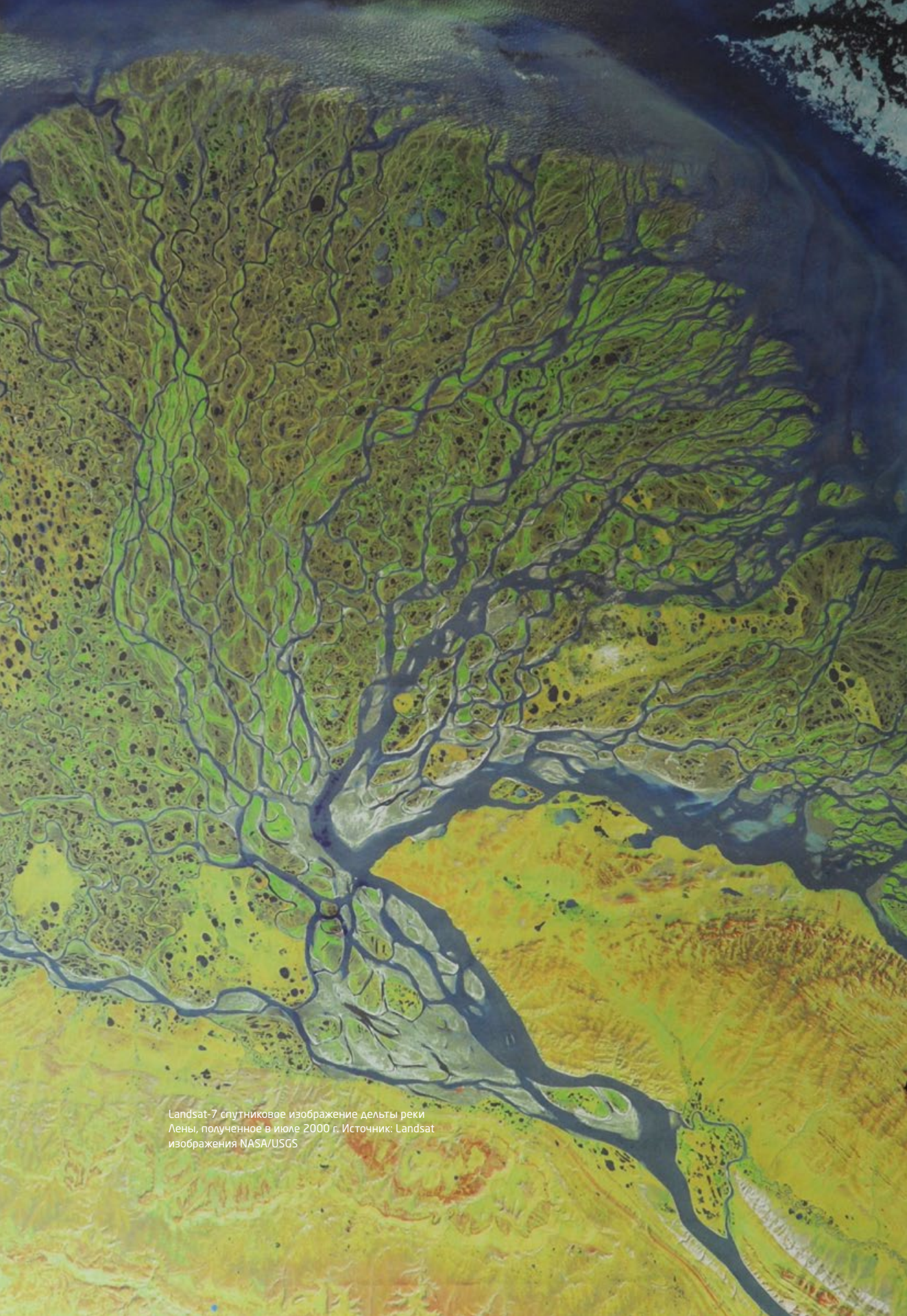
Иллюстрации предоставлены:  
Обложка и футляр: Т. Опель, Г. Штооф, П. Верзоне, К.  
Финке, В. Кохан / RBB, Т. Закс, Й. Штраусс, Ю. Бойке  
Стр. 49, иллюстрации животных: fotolia.com: Тетяна,  
Виктория, frilled\_dragon, Влад Клок, Перисти, К. Пиль

Фотографии и рисунки в отдельных статьях сделаны  
авторами, если не указано иначе

Некоторые из карт в этой брошюре были сделаны с  
помощью ArcGIS®. Программное обеспечение создано  
Esri. ArcGIS® и ArcMap™ являются интеллектуальной  
собственностью Esri и используются здесь по  
лицензии. Copyright © Esri. Все права защищены.  
Для получения дополнительной информации о  
программном обеспечении Esri® посетите, пожалуйста,  
сайт [www.esri.com](http://www.esri.com).

Copyright: 2018, Alfred Wegener Institute  
ISBN 978-3-88808-715-8





Landsat-7 спутниковое изображение дельты реки Лены, полученное в июле 2000 г. Источник: Landsat изображения NASA/USGS



1998 | 1999 | 2000

2001 | 2002 | 2003 | 2004

2005 | 2006 | 2007







2008 | 2009 | 2010

2011 | 2012 | 2013 | 2014

2015 | 2016 | 2017





ALFRED-WEGENER-INSTITUT  
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-  
UND MEERESFORSCHUNG

# HELMHOLTZ

ISBN 978-3-88808-715-8

