



Российская академия наук
Уральское отделение
Коми научный центр
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт биологии Коми научного центра

Стокгольмский университет
Департамент физической географии и четвертичной геологии

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА НА СЕВЕРЕ РОССИИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ



Под редакцией П. Кури и В. Пономарева
Стокгольм—Сыктывкар



Сыктывкар 2013

Фото на задней обложке (вверху): снимок Quickbird исследовательского участка в тундре (бассейн р. Роговая). Лагерь экспедиции располагался около большого меандра в верхнем правом углу (северо-восток) снимка.

Фото на задней обложке (внизу): снимок Quickbird исследовательского участка на болоте в окрестностях пос. Слудка. Дощатый настил для доступа к исследуемому участку болота, который проложен от дороги на юге четко виден на снимке.

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА НА СЕВЕРЕ РОССИИ:
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

*Рекомендовано к изданию Ученым советом
Института биологии Коми НЦ УрО РАН*

Редактор О.А. Гросу
Оригинал макет Е.А. Волкова

Лицензия № 0047 от 10.01.99.

Подписано в печать 16.04.2013 г. Формат 60×90^{1/16}. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 4.0. Усл. печ. л. 4.0. Тираж 250. Заказ № 07(13).

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН.
167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28.

VI РАМОЧНАЯ ПРОГРАММА ЕВРОСОЮЗА
«КЛИМАТ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

ЦЕЛЕВОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТ
«QUANTIFYING THE CARBON BUDGET IN NORTHERN RUSSIA:
PAST, PRESENT AND FUTURE (CARBO-North)»

Номер проекта: 036993

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА НА СЕВЕРЕ РОССИИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Под редакцией П. Кури и В. Пономарева
Стокгольм–Сыктывкар

Общие итоги проекта «CARBO-North»

Сыктывкар 2013

УДК 504.7:546.26:551.58(470-17)

ОЦЕНКА БАЛАНСА УГЛЕРОДА НА СЕВЕРЕ РОССИИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ / Под ред. П. Кури и В. Пономарева. Сыктывкар, 2013. 64 с. (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН).

В издании представлены основные итоги международного проекта «Оценка баланса углерода на севере России: прошлое, настоящее и будущее», профинансированного VI Рамочной программой Европейского Союза в 2006–2010 гг. и нацеленного на определение количества выбросов парниковых газов на севере России. Основная задача проекта – выяснить, как эти выбросы будут меняться в будущем под влиянием глобального потепления и таяния многолетней мерзлоты. Работа над проектом объединила более 50 ученых из 17 учреждений Великобритании, Германии, Дании, Нидерландов, Финляндии, России, США и Швеции. Район исследований расположен на европейском Северо-Востоке России, по большей части представляет собой лесотундру с широким распространением торфяников. На этих торфяниках встречается многолетняя мерзлота – отдельными участками в северной тайге и почти непрерывно – в тундре. В работе обобщены современные знания в области изучения климата и окружающей среды прошлых эпох, проведены комплексные исследования растительности, почв и многолетней мерзлоты, составлены карты, охарактеризованы потоки парниковых газов и гидрологический режим рек, выполнены экосистемное, гидрологическое и климатическое моделирование, а также экстраполяция и интеграция данных. Кроме исследования воздействия климата и динамики многолетней мерзлоты на баланс углерода в чувствительных северных экосистемах также изучены последствия влияния на динамику углерода естественных и антропогенных факторов. Издание рассчитано на самый широкий круг читателей.

Перевод Ю. Дубровского

Фото на обложке: острова северной темнохвойной тайги в тундре вдоль небольшого притока р. Роговая (Российская Арктика). На открытых тундровых пространствах распространены органогенные (торфяные) почвы, подстилаемые многолетней мерзлотой (© В. Пономарев).

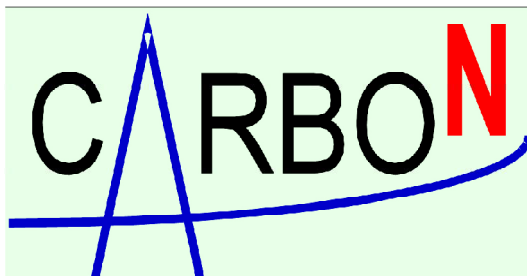
ISBN 978-5-89606-485-5

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Галины Мажитовой	7
Введение	8
Обзор основных результатов	11
Техническое описание проекта	19
Фото полевых работ	22
Обзор направлений исследований	24
Изменения климата и окружающей среды	
Изменения климата и окружающей среды на европейском Северо-Востоке России в прошлом и настоящем	24
Изменения климата в Арктике к концу XXI в.	27
Будущие изменения климата, многолетней мерзлоты и ландшафтов на европейском Северо-Востоке России	30
Запасы углерода и азота в тундровых и таежных экосистемах	
Где концентрируется почвенный углерод и сколько его в слоях многолетней мерзлоты	33
Почвенный азот: важное питательное вещество для роста растений	37
Баланс парниковых газов	
Поглощение и эмиссия парниковых газов из тундровых ландшафтов	39
Тундры работают как резервуар и источник парниковых газов	42
Влияние человека на тундру	44
Углеродный баланс северных болот	45
Выщелачивание почвы и речной сток	
Вымывание органического углерода из почвы	47
Высокая концентрация органического углерода во время весеннего паводка в тундровых реках	49
Моделирование речного стока и экспорта растворенного органического углерода в условиях будущих изменений климата и окружающей среды	50

Масштабирование и моделирование

Проблемы масштабирования – использование спутниковых снимков	52
Моделирование будущего углеродного баланса на европейском Северо-Востоке России	56
Влияние продвижения верхней границы леса на изменение климата будущего	59
Распространение результатов	61
Благодарности	62
Список публикаций	63



Веб-сайт проекта: <http://www.carbonorth.net/>

Контакты координатора проекта:

Профессор Питер Кури (Peter Kuhry)
 Кафедра физической географии и четвертичной геологии
 Стокгольмский университет, 106 91 Стокгольм, Швеция
 Тел.: +46 8 164806; факс: +46 8 164818;
 E-mail: peter.kuhry@natgeo.su.se

Список организаций-участников:

<i>Роль участника¹</i>	<i>Номер участника</i>	<i>Название участника</i>	<i>Сокращенное обозначение участника</i>	<i>Страна</i>
CO	1	Стокгольмский университет	SU	Швеция
CR	2	Университет Лунда	LU	Швеция
CR	3	Институт им. Альфреда Вегенера, Потсдам	AWI	Германия
CR	4	Грейфсвальдский университет	EMAUG	Германия
CR	5	Датский метеорологический институт	DMI	Дания
CR	6	Копенгагенский университет	UKBH	Дания
CR	7	Коми научный центр, Сыктывкар	KSC	Россия
CR	8	Метеорологическая служба Великобритании, Эксетер	METO	Великобритания
CR	9	Университетский колледж Лондона	UCL	Великобритания
CR	10	Ноттингемский университет	UN	Великобритания
CR	11	Университет Хельсинки	UH	Финляндия
CR	12	Университет Куопио /	UKU	Финляндия
CR	18	Университет Восточной Финляндии	UEF	Финляндия
CR	13	Утрехтский университет	UU	Нидерланды
CR	14	Университет Вагенингена	WU	Нидерланды
CR	15	ENSIS, Лондон	ENSIS	Великобритания
CR	16	ООО «Чермет», Сыктывкар	CHER	Россия
CR	17	ООО «Арена-S», Сыктывкар	ARENA-S	Россия
SubCR	к CO(1)	Фундаментпроект, Москва	FSUE	Россия
NO ²	NO ²	Университет Аляски, Фэрбенкс	UAF	США

¹ CO-Координатор; CR-Подрядчик; SubCR-Субподрядчик.

² Участие без формального статуса.

Контакты основных участников проекта-авторов работы

Организация	Страна	Участники	E-mail
Стокгольмский университет	Швеция	Питер Кури (Peter Kuhry)	<peter.kuhry@natgeo.su.se>
Университет Лунда	Швеция	Пауль Миллер (Paul Miller)	<paul.miller@nateko.lu.se>
Институт им. Альфреда Вегенера, Потсдам	Германия	Аннет Ринке (Annette Rinke)	<annette.rinke@awi.de>
Грайфсвальдский университет	Германия	Мартин Уилкинг (Martin Wilking)	<wilking@uni-greifswald.de>
Датский метеорологический институт	Дания	Мартин Стендель (Martin Stendel)	<mas@dmi.dk>
Копенгагенский университет	Дания	Томас Фрибург (Thomas Fribourg)	<tfj@geogr.ku.dk>
Институт биологии Коми НЦ УРО РАН, Сыктывкар	Россия	Василий Пономарев	<ponomarev@ib.komisc.ru>
		Светлана Запирова	<zagirova@ib.komisc.ru>
		Капитолина Бобкова	<bobkova@ib.komisc.ru>
		Елена Патова	<patova@ib.komisc.ru>
		Михаил Сивков	<sivkov@ib.komisc.ru>
		Дмитрий Каверин	<dkav@ib.komisc.ru>
		Людмила Хохлова	<hohlova@ib.komisc.ru>
		<u>Галина Мажитова</u>	
Метеорологическая служба Великобритании, Эксетер	Великобритания	Пит Фолун (Pete Falloon)	<pete.falloon@metoffice.gov.uk>
Университетский колледж Лондона	Великобритания	Вив Джонс (Viv Jones)	<vjones@geography.ucl.ac.uk>
Ноттингемский университет	Великобритания	Питер Криффенден (Peter Crittenden)	<peter.crittenden@nottingham.ac.uk>
Университет Хельсинки	Финляндия	Тармо Виртанен (Tarmo Virtanen)	<tarmo.virtanen@helsinki.fi>
Университет Куопио / Университет восточной Финляндии	Финляндия	Пертти Мартикайнен (Pertti Martikainen)	<pertti.martikainen@uef.fi>
Утрехтский университет	Нидерланды	Ханс Мидделькоп (Hans Middelkoop)	<middelk@geog.uu.nl>
Университет Вагенингена	Нидерланды	Сьёрд ван дер Зи (Sjoerd van der Zee)	<sjoerd.vanderzee@wur.nl>
ENSIS, Лондон	Великобритания	Симон Патрик (Simon Patrick)	<spatrick@geog.ucl.ac.uk>
ЦЕРМЕТ, Сыктывкар	Россия	Анастасия Пономарева	<anastasia_vp@mail.ru>
АРЕНА-S, Сыктывкар	Россия	Феликс Ривкин	<f.rivkin@narod.ru>
Фундаментпроект, Москва	США	Владимир Романовский	<veromanovsky@alaska.edu>
Университет Аляски, Фэрбенкс			

Памяти Галины Мажитовой

Галина Мажитова, старший научный сотрудник Института биологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, скончалась 22 февраля 2009 г. после тяжелой болезни. Мы потеряли близкого друга, коллегу и активного участника проекта «CARBO-North». Многие из нас имели честь работать с ней на протяжении целого ряда лет в рамках большого числа предыдущих международных проектов и научно-исследовательских программ. Она ушла на пике своей научной карьеры, будучи ведущим исследователем арктических и субарктических мерзлотных почв.

Всю свою энергию, знания и опыт она направляла на изучение естественной и антропогенной динамики мерзлотных почв в зависимости от типа почвы и изменений климата. Галина Мажитова изучила закономерности изменения пула почвенного углерода вдоль экоклиматических градиентов на территории европейского Северо-Востока России. Она проанализировала тенденции изменения активного слоя мерзлотных почв в течение последних десятилетий и провела количественную оценку одновременного оседания поверхности земли. Построила модели реакции экосистем на дальнейшее потепление климата, описала температурные условия тундровых почв и их реакцию на изменения, вызванные процессами землепользования. Галина внесла весомый вклад в создание почвенной базы данных Республики Коми, а также разработала почвенную геоинформационную систему (GIS) для бассейна р. Уса и в целом для Республики Коми.

Галина Мажитова была признана международным научным сообществом как уникальный специалист в области криопедологии, исследований многолетней мерзлоты, географии, ботаники и картографии. Она прекрасно владела английским языком и стала важным связующим звеном между сильнейшими традициями российского почвоведения и исследований многолетней мерзлоты и международным научным сообществом. Галине принадлежит перевод монографии «Keys to Soil Taxonomy» с английского на русский язык. Она подготовила актуальный терминологический словарь, одобренный Министерством сельского хозяйства США. Галина была сопредседателем IUSS/IPA – международной рабочей группы по криогенным почвам, участником Сети мониторинга активного слоя мерзлотных почв Арктики (IPA), членом проекта по изучению углеродного пула в районах многолетней мерзлоты (IPA). В качестве делегата от России она принимала участие в разработке международной системы классификации почв (WRB). Галина приняла участие в организации и проведении многих международных экспедиций в России и за рубежом (Норвегия, Финляндия, Швеция, Аляска и др.), а также принимала активное участие в международных конференциях. Она оставила после себя внушительный объем научных работ как на русском, так и на английском языке.

Память о Галине Мажитовой, как о замечательном человеке, талантливом ученом и высококвалифицированном специалисте, навсегда останется в сердце каждого, кто знал ее.



ВВЕДЕНИЕ

Исследования изменений климата чрезвычайно сложны. Прежде всего, важно понять, как парниковые газы влияют на глобальный температурный режим. В настоящее время для оценки возможного глобального потепления используется набор климатических моделей и сценариев эмиссии парниковых газов. Существенным обстоятельством, которое не учитывается должным образом в современных оценках, является то, как «естественные экосистемы» будут реагировать на глобальное потепление, и каким образом эти изменения окажут обратное влияние на климат. С этих позиций хорошим примером представляется реакция тропических лесов на будущее потепление, поскольку уничтожение в настоящее время огромных объемов древесной биомассы может привести к выделению в будущем значительного количества парниковых газов.

В рамках проекта VI Рамочной программы ЕС «CARBO-North» (контракт № 036993), выполняемого по теме «Региональные запасы углерода и парниковых газов» приоритетного направления «Глобальные изменения и экосистемы», мы обратились к изучению другого важного компонента биосферы Земли. Северные тундровые регионы из-за преобладания отрицательных годовых температур отличаются слабым развитием растительного покрова и наличием многолетней мерзлоты. Тундровая растительность, представленная кустарничками, травами, мхами и лишайниками, характеризуется меньшими запасами биомассы по сравнению с лесными районами. Однако запасы органического вещества в тундровых почвах довольно велики, поскольку в условиях холодного климата разложение растительных остатков происходит весьма медленно. Установлено, что северные мерзлотные почвы содержат в три-четыре раза больше углерода, чем его содержится в биомассе всех лесов планеты. Значительная доля данного органического вещества законсервирована в мерзлых горизонтах. Следует отметить, что тундровые заболоченные экосистемы являются также важным потенциальным источником такого парникового газа, как метан.

Проект «CARBO-North», общая продолжительность которого составила 42 месяца, стартовал 1 ноября 2006 г. и формально был завершен 30 апреля 2010 г. Основная задача проекта – оценка изменений регионального баланса углерода на севере России вдоль временных и пространственных градиентов. За время реализации проекта выявлены экосистемные изменения в разных типах ландшафтов, характерные для северной тайги и тундры как в прошлом, так и настоящем. Выполнена оценка влияния изменения климата в отдаленном прошлом (глобальное потепление после последнего ледникового периода, начавшееся около

11 тыс. лет назад), недавнем прошлом (глобальное потепление после малого ледникового периода, начавшееся 100 лет назад) и настоящим (потепление, продолжающееся последние 30 лет). Сделана попытка предсказать будущие изменения (потепление в результате выделения парниковых газов к концу XXI в. и далее). Сравнительный анализ тундровых и таежных экосистем позволил раскрыть возможные изменения тундровых экосистем на качественном и процессном уровнях в связи с ожидаемым потеплением.

Район полевых исследований проекта «CARBO-North» (далее по тексту – регион «CARBO-North») располагается на европейском Северо-Востоке России. Это равнинная территория с постепенными сменами характера растительного и почвенного покрова и наличием многолетней мерзлоты. В регионе расположено несколько крупных городов, в частности, в таежной зоне – г. Ухта (с ее нефтяной и газовой промышленностью), в тундровой – г. Воркута (добыча угля). Здесь сохранены обширные массивы девственных лесов и тундр, которые могут быть использованы для изучения влияния изменений климата на окружающую среду высоких широт.

В ходе реализации проекта были заложены пробные участки для проведения исследований в таежной зоне с преобладанием смешанно-хвойных лесов и открытых болот, в лесотундровой (включая северную границу распространения лесов) и тундровой (с ее открытыми ландшафтами и многолетней мерзлотой) зонах. Нами установлены запасы органического углерода в растительности (фитомасса), почвах (включая болотные и озерные отложения) и слое мерзлоты. Потоки углерода в тайге и тундре исследованы на основе оценки количества диоксида углерода (CO_2), ассимилированного растениями в процессе фотосинтеза, и количества углерода, выделенного в результате дыхания и разложения почвенного органического вещества (ПОВ). При этом чрезвычайно важно, что не весь углеродный обмен проходит через потоки CO_2 . Углерод также выносится из лесных и тундровых экосистем в виде растворенного и дисперсного (мелкие частицы растительного или почвенного материала) органического углерода (DOC и POC), мигрирующего с почвенно-грунтовыми и поверхностными водами, или метана (CH_4), выделяющегося из гидроморфных (переувлажненных) почв, болотных и озерных депозитов. Метан – гораздо более активный парниковый газ, чем диоксид углерода (радиационный эффект), поэтому, даже несмотря на то, что общее количество углерода, выделяемого в виде CH_4 , намного меньше, чем в виде CO_2 , он оказывает заметное влияние на парниковый эффект и глобальное потепление. Кроме того, участники проекта «CARBO-North» проанализировали эмиссию оксида азота, который не относится к соединениям углерода, но также считается очень активным парниковым газом.

Особое внимание было уделено проецированию результатов исследований, полученных на модельных участках в тундре (участки бассейнов рек Сейда и Роговая) и тайге (бассейн р. Вызьма) на ландшафтный и региональный уровни. Карты растительности и почвенные карты составлены с использованием полевых наблюдений (наземный контроль данных) и космоснимков высокого разрешения, подобранных специально для проекта. В последующем результаты полевых исследований и карты

будут использованы остальными участниками проекта для усовершенствования разработанных моделей и увеличения точности будущих прогнозов регионального углеродного баланса в условиях изменяющейся окружающей среды.

Наиболее значимым результатом проекта является ответ на вопрос, окажут ли прогнозируемые изменения климата, многолетней мерзлоты и режимов землепользования на европейском Северо-Востоке влияние на совокупность потоков углерода в регионе в течение XXI в. и далее. К сожалению, эти изменения в углеродном балансе северных экосистем не учитываются в настоящее время Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) ни в одном из сценариев развития парниковых процессов в будущем. Результаты проведенных исследований чрезвычайно важны с точки зрения оценки перспектив развития человечества в контексте пост-Киотских переговоров, а также для корректировки задач по снижению уровня эмиссии парниковых газов.

В рамках проекта «CARBO-North» дана оценка последствий так называемой стратегии ЕС «2 Degree Target». Страны Евросоюза нацелены на стабилизацию уровня концентрации парниковых газов в атмосфере для того, чтобы средняя общемировая температура не поднималась более чем на 2 °С. В связи с этим обстоятельством нами исследованы последствия развития такого сценария стабилизации на европейском Северо-Востоке России.

Настоящее издание имеет следующую структуру. В главе «Обзор основных результатов» представлены важнейшие результаты проекта «CARBO-North», затем следует «Техническое описание проекта». В главе «Фото полевых работ» представлены визуальные впечатления от полевых исследований. В главе «Обзор направлений исследований», которая подготовлена непосредственными участниками проекта, изложено детальное описание результатов исследований. Отчет завершают главы, содержащие обзор способов распространения полученных результатов, благодарности и список публикаций проекта.

*Проф. Питер Кури,
Стокгольмский университет (координатор проекта)*

*К.б.н. В.И. Пономарев,
ИБ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
(российский координатор проекта)*

ОБЗОР ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Начальный период реализации проекта «CARBO-North» был в основном посвящен формулированию «базового сценария» развития региона исследований, т.е. определения того, какие условия (климатические, мерзлотные, режимы землепользования) влияют в последние десятилетия на функционирование таежных и тундровых экосистем. В ходе полевых работ (с весны 2007 г. до весны 2009 г.) собраны обширные данные о климате, растительном покрове, почвах, многолетней мерзлоте, испарении газов с поверхности земли, углероде, запасенном в фитомассе, экспорте растворенного и дисперсного органического углерода, влиянии пожаров, лесной и нефтегазовой промышленности на таежные и тундровые экосистемы. Полученные результаты использованы для калибровки и проверки мерзлотных, гидрологических, экосистемных и планетарных моделей, разработанных участниками проекта, отвечающими за данный раздел.



Спутниковый снимок района проведения исследований в рамках проекта «CARBO-North» на европейском Северо-Востоке России с обозначением районов расположения крупнейших городов региона. Цифрами указана локализация пунктов наблюдения в таежной (1–2) и тундровой (3–6) зонах (1 – Слудка, 2 – Ляли, 3 – Сейда, 4 – Роговая, 5 – Хоседаю, 6 – Колва). Источник: Стокгольмский университет.

Некоторые важнейшие выводы:

1. В последние десятилетия наблюдается потепление климата. Условия в 2004–2008 гг. в целом оказались очень теплыми, даже несмотря на то, что в этот период не были превышены абсолютные максимальные среднегодовые температуры.

2. В некоторых районах тундры отмечается таяние многолетней мерзлоты, сопровождающееся образованием таликов – незамерзающих слоев между верхними слоями почвы, промерзающими в зимний период (сезонная мерзлота), и верхней границей многолетнемерзлых пород.

3. За последние десятилетия граница леса в Арктике не продвинулась на север, несмотря на тренд значительного потепления климата. Выявлен заметный временной разрыв в раннем голоцене между появлением разреженных насаждений и формированием сомкнутых таежных лесов.

4. Запасы биомассы таежных экосистем превышают запасы биомассы в тундре, однако суммарные запасы органического углерода выше в тундре за счет гораздо более значительных запасов почвенного органического вещества.

5. Вырубки лесов оказывают заметное влияние на уровень запасов углерода в биомассе таежных экосистем.

6. Болота тундровой зоны аккумулируют максимальное количество мерзлотного углерода.

7. Показано, что в тундре сухие, лишенные растительности участки торфяников и почвы на буграх пучения, а также кочки на болотах таежной зоны являются источниками CO_2 для атмосферы. Переувлажненные участки болот имеют значение в качестве стока CO_2 и одновременно источника CH_4 . Исследованные смешанно-хвойные леса характеризуются небольшим уровнем поглощения CO_2 .

Климат потеплел в последние десятилетия. На некоторых участках тундры наблюдается оттаивание многолетней мерзлоты.

За последние десятилетия граница распространения леса в Арктике не продвинулась на север.

В 2008 г. тундровые экосистемы поглощали углерод из атмосферы.

В 2008 г. тундровые экосистемы оказывали положительное радиационное (парниковое) влияние на климат.

Лишенные растительности поверхности торфяников тундры являются источниками N_2O .

8. Интегрированная оценка углеродного баланса за 2008 г. показала, что тундра в данный промежуток времени является резервуаром для атмосферного углерода, однако радиационный (парниковый) эффект тундровых экосистем остается положительным из-за эмиссии активных парниковых газов – CH_4 и N_2O .

9. Выявлен большой экспорт органического углерода (ТОС) речным стоком в таежной зоне по сравнению с тундрами.

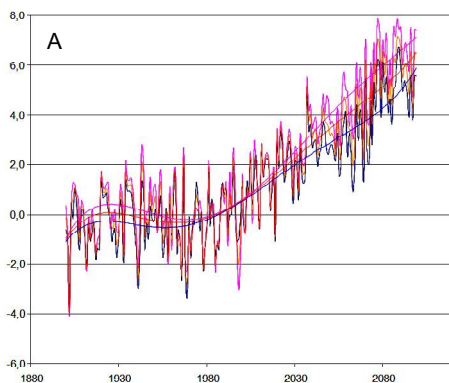
10. В тундровой зоне лишённые растительности участки торфяников, образовавшиеся в процессе криотурбации («вскипание торфа»), являются источниками N_2O .

Вторая часть проекта (с зимы 2008/2009 гг. до весны 2010 г.) была в основном посвящена интегрированной оценке влияния глобального потепления климата, таяния многолетней мерзлоты (в тундре), а также нарушений естественного состояния окружающей среды на состояние таежных и тундровых экосистемы и их углеродный баланс. В дальнейшем проведены оценка и синтез полевых данных, интегрированное моделирование. Принята общая концепция изменений климата (см. далее). Прогнозы предсказали значительное увеличение как температуры (на 5–7 °С, больше в тундре), так и количества осадков (на 30–40%, больше в тайге). В таких условиях к концу XXI в. леса потенциально могут практически полностью занять территорию равнинных тундр. Однако есть данные о том, что продвижению границы леса на север будет предшествовать значительный временной период (см. далее).

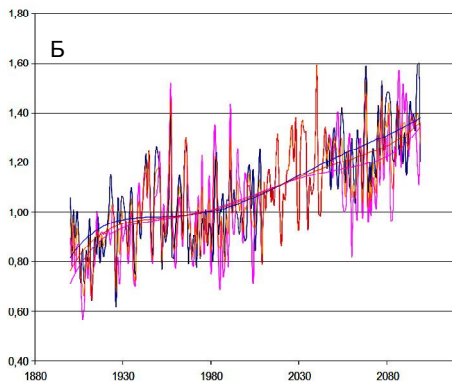
Другим важным индикатором экосистемных изменений, особенно характерным для тундровых экосистем в районе реализации проекта, является таяние многолетней мерзлоты, сопровождающееся просадкой поверхности земли. Нами проведено региональное моделирование эволюции многолетнемерзлых пород на основе пространственных мерзлотных моделей, разработанных для различных типов ландшафта, находящихся под влиянием принятого климатического сценария. Полученные данные указывают на значительное сокращение области многолетнемерзлых пород в районе исследований проекта «CARBO-North» к концу XXI в. Последние наблюдения свидетельствуют о том, что этот процесс уже начался. Таяние мощных слоев льдистой мерзлоты в тундровых почвах (там, где он присутствует) приведет к просадке земной поверхности и образованию так называемых термокарстовых озёр. Последствия этого процесса будут катастрофическими и обусловят трансформацию большей части плоских мерзлотных равнин модельного участка тундры в мелководные озёра, что может серьезно сказаться на углеродном балансе (и эмиссии CH_4) в регионе.

Особое внимание при реализации проекта «CARBO-North» уделено оценке степени воздействия естественных и антропогенных нарушений, что признано потенциально важным для будущего развития экосистем в таежной и тундровой зонах. Оценка изменений объемов фитомассы тайги, проведенная с использованием космоснимков, показала, что вырубка лесов на европейском Северо-Востоке оказывает сильное влияние на общие запасы углерода в растительном покрове. Эти результаты использованы для включения фактора «нарушений» в экосистемную модель LPJ-GUESS. В современных климатических условиях пожары оказывают меньшее влияние на потоки углерода, однако играют значимую роль в прогнозах распределения фитомассы, составленных как в рамках экосистемной модели LPJ-GUESS, так и с использованием планетарной модели Центра Хадли (Hadley Centre).

Серии средних годовых температур 1900-2099:
тундра (розовый), тайга (синий), средний NEE России (оранжевый)

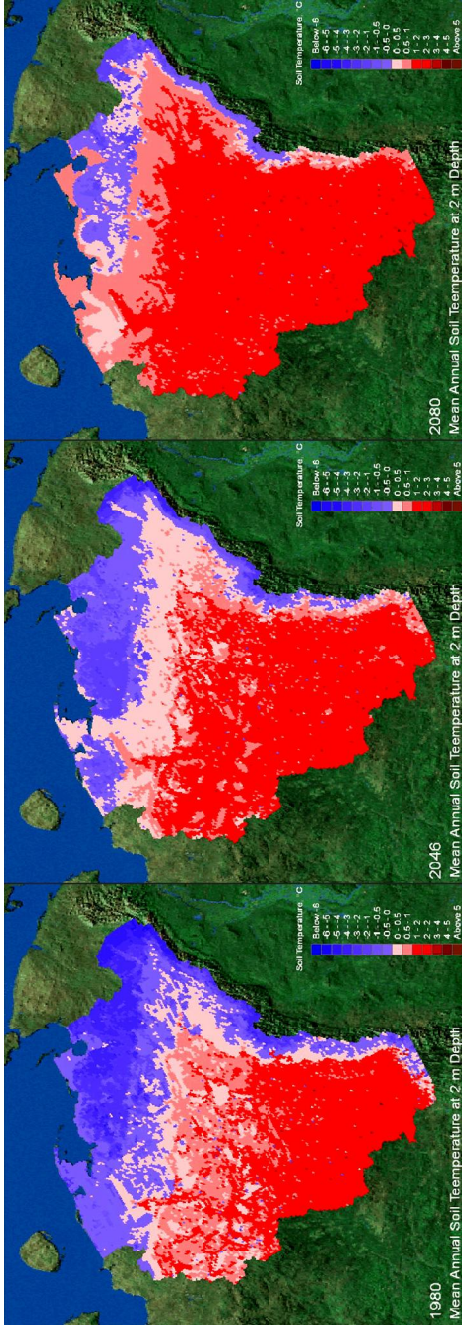


Серии общих годовых сумм осадков 1900-2099:
тундра (розовый), тайга (синий), средний NEE России (оранжевый)



Нарушения естественной среды тундры, связанные с добычей газа и нефти, также оказывают значительное влияние на экосистемный баланс углерода. Использование результатов удаленного зондирования показало, что в настоящее время, как минимум, эти воздействия проявляются на относительно небольших по площади нарушенных территориях.

Аномальные серии среднегодовых температур (А) и годовых сумм осадков (Б), основанные на наблюдениях погодных станций (1900–2008 гг.) и на расчетах с использованием региональной климатической модели HIRHAM, сценария А1В (2009–2099 гг.). Серии рассчитаны для модельных участков тундры и тайги и в среднем для региона, охваченного исследованиями проекта «CARBO-North». Источник: Стокгольмский университет.



Изменение средних годовых температур почвы на глубине 2 м, смоделированное для региона исследований с использованием переходной модели многолетней мерзлоты GIP2.1 и снимков высокого разрешения NIRNAM (4×4 км). Расчет для 1980 (слева), 2046 (в середине) и 2080 (справа) гг. Многолетнемерзлые почвы показаны синим цветом, деградация или отсутствие мерзлоты – красным. Источник: Университет Аляски, Фэрбенкс.

Прогнозируется значительное повышение температуры и увеличение числа осадков к концу XXI в.

Многолетняя мерзлота на территории большей части региона исследований проекта «CARBO-North» будет интенсивно деградировать.

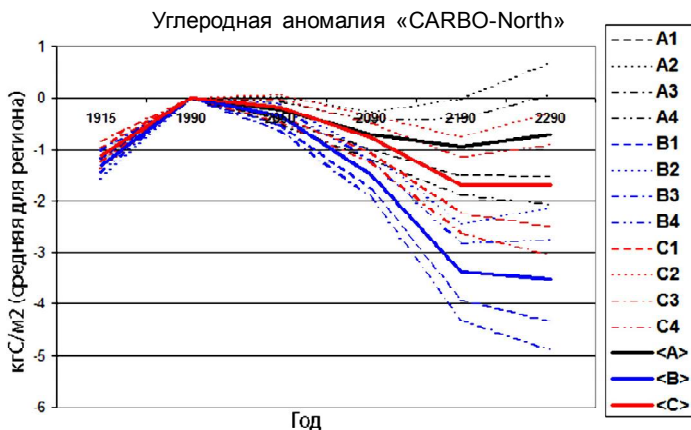
Участники проекта «CARBO-North» приложили значительные усилия для интегрирования полученных данных и построения прогнозных моделей. С самого начала проекта обсуждались вопросы, касающиеся форматов представления данных для оптимизации использования результатов полевых исследований при работе с климатическими, мерзлотными, гидрологическими, экосистемными и планетарными моделями. Помимо запланированных работ осуществлено несколько дополнительных вариантов моделирования. В процессе построения экосистемной модели LPJ-GUESS учитывали факторы влияния потоков метана и прогнозы долговременной динамики северной границы леса. При работе с планетарной моделью, разработанной в Центре Хадли, оценивали неопределенности будущего развития, используя разные настройки модели и сценарии развития парникового эффекта.

Все базовые сценарии послужили основой для расчетов баланса углерода, экстраполированных на ландшафтный и региональный уровни, а также корректировки, калибровки и проверки разработанных прогнозных моделей. Моделирование регионального углеродного баланса проведено на основе адаптированного сценария изменения климата, что позволило улучшить настройку экосистемной модели LPJ-GUESS (добавлены данные о новых функциональных типах растений, долгосрочных запасах углерода в торфяниках, задержках продвижения границы леса, учтены скорректированные модели сведения лесной растительности и разложения органических веществ). В блоке планетарной модели Центра Хадли, который отвечает за обсчет земной поверхности, была улучшена параметризация торфяников и многолетнемерзлых почв.

Данные, представленные в настоящей работе, являются результатом выполнения важнейшей задачи проекта «CARBO-North» – прогнозирования изменений запасов углерода, сконцентрированных на Севере России, в течение XXI в. и далее. Результаты, полученные с использованием модели LPJ-GUESS, показывают, что значительное количество углерода экосистем, исследованных в рамках проекта «CARBO-North», будет потеряно, особенно при реализации сценария снижения скорости продвижения границы леса к северу. Усиление антропогенного пресса также приведет к дополнительным потерям углерода. Если граница леса сместит-

ся на север одновременно с потеплением климата, потери почвенного углерода будут скомпенсированы увеличением биомассы наземных растений. Тем не менее уменьшение альбеда из-за замещения открытых тундровых пространств сомкнутыми лесными сообществами будет способствовать дальнейшему потеплению климата. Постепенное таяние многолетней мерзлоты и распространение болот в течение XXI в. отчасти приведут к замедлению разложения почвенного органического вещества по сравнению с темпами, предусмотренными «упрощенным» вариантом модели, в котором не учитываются такие факторы, как мерзлота и запасы почвенного органического вещества на глубине свыше 1 м от дневной поверхности. Эти результаты подтверждаются в более масштабных исследованиях с применением планетарной модели Центра Хадли для панарктического региона.

Интересно использовать прогнозируемые совокупные потери углерода для расчета общих запасов экосистемного углерода. Средний уровень запаса углерода в экосистемах северной тайги и тундры региона оценивается в 30–40 кгС/м². Таким образом, рассчитанные совокупные потери 2 кгС/м² (наиболее реальный сценарий) к 2090 г. могут привести к 5–7%-ному снижению общих запасов углерода, в основном связанному с потерями почвенного углерода. Учитывая большие запасы почвенного углерода в северной тайге и тундре, годовая эмиссия углерода в атмосферу



Усредненная экосистемная модель углеродных аномалий (кгС/м²) для региона «CARBO-North» за период 1980–1999 гг. Стандартные сценарии A1–4 отмечены черным (<A> – средняя этих графиков), чувствительные сценарии B1–4 (без продвижения границы леса) – синим (– средняя), сценарии C1–4 (усиление нарушений среды) – красным (<C> – средняя) цветами. При комбинации факторов «без продвижения границы леса» и «усиление нарушений среды» потери могут быть выше ожидаемых. Источник: Университет Лунда.

может составить приблизительно 1 pg в год на протяжении XXI в., если мы упрощенно применим наши региональные результаты для всей Арктики. Эти дополнительные выбросы не учитываются в сценариях развития парникового эффекта IPCC или в Киотских планах, которые предусматривают 9%-ное снижение антропогенной эмиссии по сравнению с 1990 г. (0.6 pg C в год).

Также необходимо учесть будущее увеличение речного стока ТОС в условиях потепления климата. Эти потоки не были включены в модели. Наши измерения показывают, что таежные реки экспортируют больше ТОС, чем речные водотоки тундровой зоны. Учитывая это, можно предположить, что при потеплении климата произойдут дополнительные потери почвенного углерода за счет выщелачивания. Однако по мере оттаивания многолетнемерзлых пород тундры все больше органического вещества будет выноситься в глубокие слои почвы, где оно может включаться в процессы образования органо-минеральных комплексов, что частично компенсирует потери органического углерода в экосистемах.

В рамках проекта «CARBO-North» произведена оценка последствий так называемой стратегии ЕС «2 Degree Target». Если глобальная температура увеличится на 2 °C, это все равно приведет к значительным изменениям в северных районах из-за того, что в Арктике ожидается большее потепление, чем в среднем по миру. Увеличение температуры в регионе «CARBO-North» может составить порядка 4–5 °C, что в любом случае приведет к замещению большей части тундр лесами, а основная часть равнинной мерзлоты растает. В соответствии с представленными ранее результатами этот более мягкий сценарий будущего повышения температуры так или иначе приведет к потерям углерода в регионе. Следовательно, задачи по снижению антропогенной эмиссии парниковых газов должны учитывать дополнительные поступления газов из меняющихся экосистем северных районов высоких широт.

Результаты моделирования предсказывают значительное снижение запасов общего экосистемного углерода в районе проведения исследований в рамках проекта «CARBO-North» к концу XXI в.

Значительные изменения экосистем и потоков углерода в северных регионах произойдут даже при условии достижения целей стратегии ЕС «2 Degree Target», что требует дальнейшего снижения уровня антропогенной эмиссии парниковых газов.

Результаты проекта «CARBO-North» показывают, что учет изменений наземных экосистем, расположенных в высоких широтах, имеет первостепенное значение для будущих сценариев развития парникового эффекта IPCC и пост-Киотских соглашений об ограничении процессов изменения климата.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

Основная цель проекта «CARBO-North» – определение запасов углерода на Севере России с учетом временных и пространственных градиентов. В ходе исследований проведена оценка степени экосистемных изменений, воздействий на углеродный бюджет (радиационный эффект), а также последствий для глобального климата и политики (пост-Киотские соглашения). Последние исследования влияния изменения климата на высокоширотные регионы Земли были в основном посвящены изучению «равновесной» ответной реакции экосистем, например, «потенциального» расположения северной границы леса или южных границ многолетней мерзлоты в условиях глобального потепления. Однако переходные характеристики имеют гораздо большее и самостоятельное значение. Как быстро будет мигрировать северная граница леса? Как быстро будет оттаивать многолетняя мерзлота? Как быстро усиление процессов трансформации и минерализации почвенного органического вещества приведет к увеличению эмиссии парниковых газов и выщелачиванию почв? Разные временные задержки в этих процессах вызовут значительные расхождения с равновесными реакциями.

Модельные участки на европейском Северо-Востоке России, выбранные для проведения исследований в рамках проекта «CARBO-North», характеризуются постепенными равнинными переходами растительности и мерзлотных почв. Используемые модели позволяют учитывать эти изменения в рамках задаваемых временных периодов, что позволяет выйти на экосистемный уровень исследований. Выполнена оценка чувствительности данных климатической модели по отношению к особенностям ландшафта, грунта и многолетнемерзлых пород. Косвенные данные (диатомеи, хирономиды, пыльца, крупные растительные ископаемые остатки, годовичные кольца, изотопы в годовичных кольцах деревьев и мхов) были использованы для оценки степени экосистемных изменений в климатических условиях прошлого. Современное состояние окружающей среды изучали на разных уровнях: от конкретных площадок до целых ландшафтов, используя при этом разнообразные подходы, в том числе включающие оценку антропогенных и естественных нарушений среды. Результаты детального мониторинга и картирования растительности, почв и многолетнемерзлых пород позволили перейти к исследованиям динамических процессов (динамика границы леса, потоки углерода в тундровых, лесных и речных экосистемах, осадка поверхности земли и т.д.), а также ГИС-масштабированию до регионального уровня. Полученные данные в дальнейшем использованы для интегрированного моделирования экосистем, подсчета

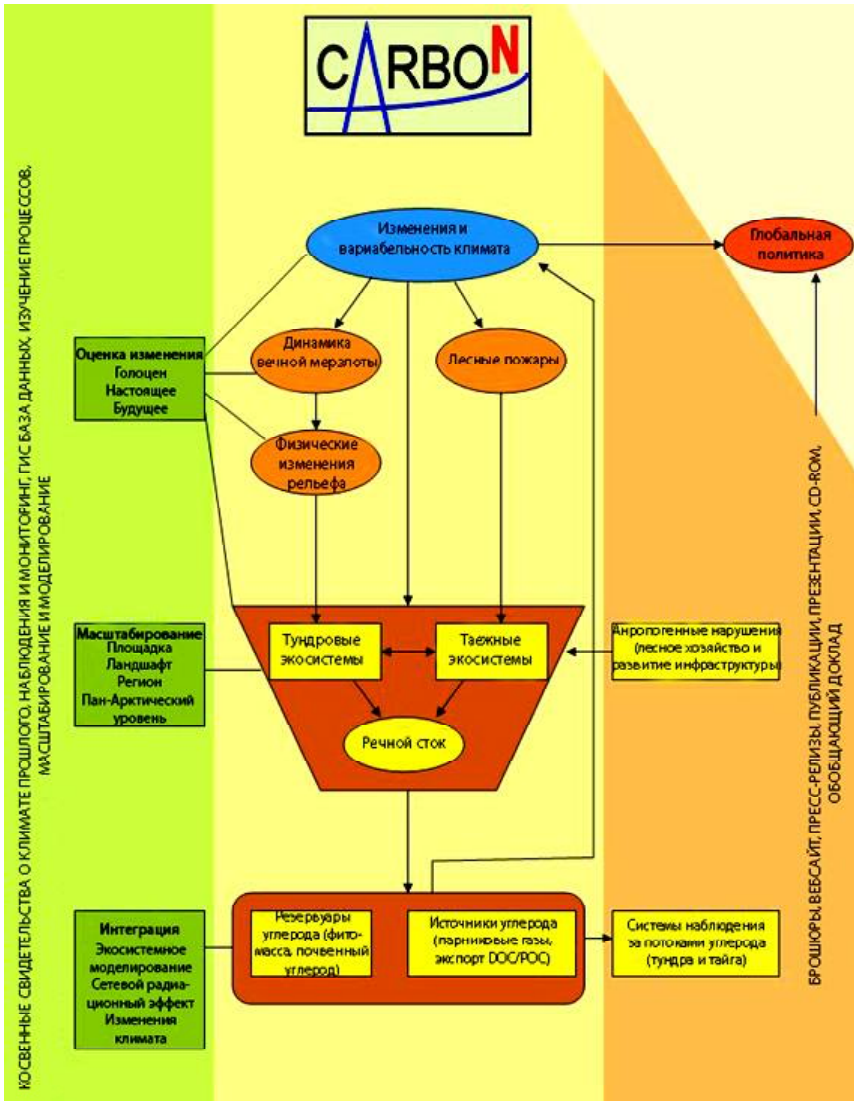
сетевого радиационного эффекта и оценки чувствительности прогнозов климатической модели по отношению к переходным изменениям окружающей среды.

Основное направление проекта «CARBO-North» – изучение переходных пространственно-временных схем северного ландшафта и изменений экосистем в условиях глобального потепления и оттаивания многолетней мерзлоты, включало следующие ключевые моменты:

1. Масштабирование от пробной площадки до регионального уровня (или наоборот).
2. Учет всех ландшафтных компонентов как тайги, так и тундры.
3. Круглогодичные и продолжительные измерения.
4. Ранжирование ключевых ландшафтных и экосистемных процессов.
5. Интеграция переходных изменений в систему реагирования экосистем.
6. Региональные запасы углерода для временного промежутка, охватывающего XXI в. (и далее).

Реализация рабочего плана проекта «CARBO-North» включала несколько ключевых отчетных периодов на протяжении 3.5 лет (42 месяцев) проекта:

1. Вебсайт и брошюра (месяц 2 – «м2»).
2. Совместные полевые исследования весной-летом 2007 и 2008 гг. (м6, м9-10, м18, м21-22).
3. Начало кампании по измерению потоков углерода в тундровых и таежных экосистемах (м6).
4. Начало работы базы метаданных проекта и ГИС платформы (м12).
5. Базовый сценарий на начало XXI в. (м24-26).
6. Влияние глобальных изменений климата на баланс углерода в различных компонентах экосистем (м34-36).
7. Интеграция общих радиационных эффектов на ландшафтном, региональном и панарктическом уровнях (м42-44).
8. Подготовка общего научного отчета по ключевым результатам проекта (м44).



Концептуальная схема, отражающая различные исследовательские компоненты проекта «CARBO-North».

Фото полевых работ

Транспорт в тундре (© P. Kuhry).



Тени, отбрасываемые поздним вечером в тундровом полевом лагере (© P. Kuhry).



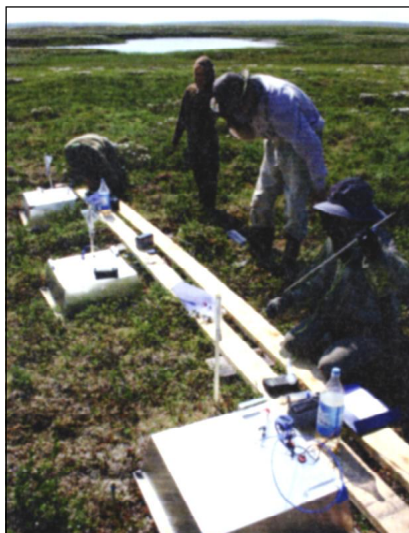
Ландшафт плоскобугристого болота с термокарстовым озером в районе р. Сейда (© P. Kuhry).



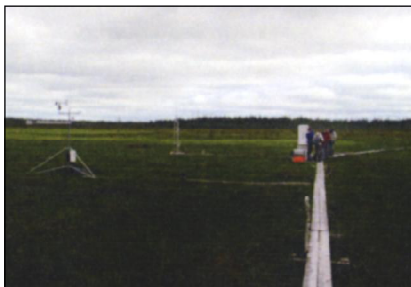
Полевой лагерь на границе леса (© S. Holzkamper).



Базовый полевой лагерь в тундре в окрестностях Сейды (© P. Kuhry).



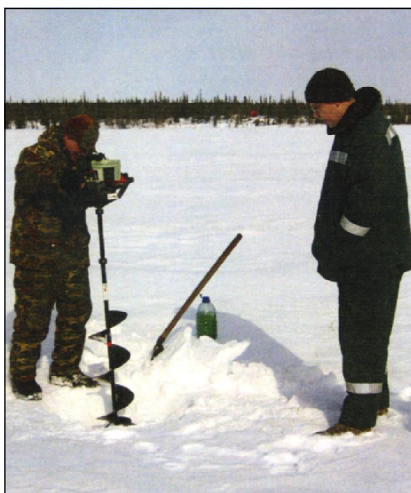
Измерения парниковых газов с помощью камер (© S. Jokinen).



Постройки для измерения потоков парниковых газов на бореальных болотах (© Р. Kuhry).



До болотного участка в тайге можно было добраться на велосипеде (© Р. Kuhry).



Бурение льда на озере для отбора донных отложений (© S. Salonen).



Вышка для измерения потоков парниковых газов в лесу (© Р. Kuhry).



Отряд исследователей на берегу таежной реки, воды которой окрашены в коричневый цвет из-за присутствия органических веществ (© Р. Kuhry).



Отбор донных отложений на озере весной 2007 г. (© S. Salonen).

ОБЗОР НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изменения климата и окружающей среды

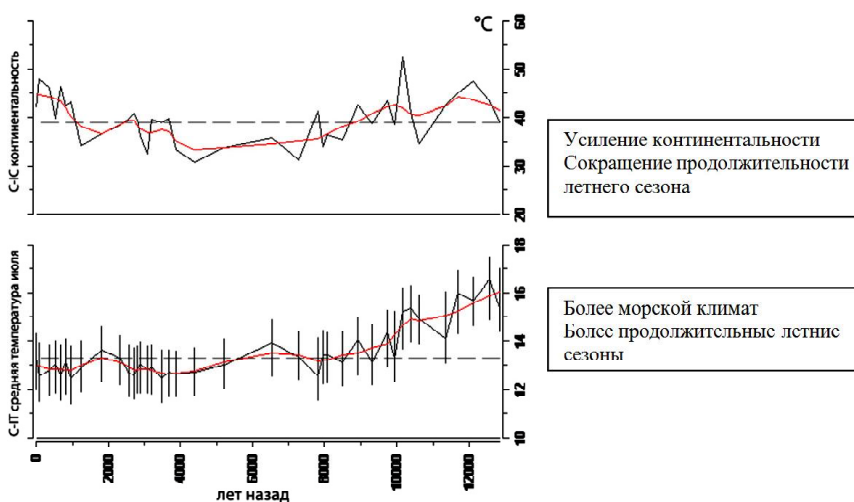
Университетский колледж Лондона (Великобритания)
Кафедра наук о Земле и географии,
Университет Хельсинки (Финляндия)
Грейфсвальдский университет (Германия)

Изменения климата и окружающей среды на европейском Северо-Востоке России в прошлом и настоящем

Озера являются обычным элементом Арктики и существуют тысячи лет. В рамках проекта «CARBO-North» изучены ископаемые остатки, сохранившиеся в придонных отложениях озер, для того, чтобы пролить свет на условия окружающей среды прошлого. Особое внимание уделено свидетельствам климатических условий прошлого, что дало возможность прогнозировать климатические изменения настоящего и будущего в контексте более протяженной временной шкалы. Также исследовательские группы были заинтересованы в определении того, как изменения распространения лесов в прошлом повлияли на озерные экосистемы, поскольку аналогичные процессы ожидаются в будущем из-за вызванного человеком глобального потепления.

На оз. Хариней в тундровой зоне опробование донных отложений в одной из точек провели на глубине 3.2 м. Датировка органического вещества с использованием естественных радиоактивных изотопов показала, что эта проба охватывает период последних 11 500 лет, который включает в себя потепление в начале голоцена после последнего оледенения. В образцах определили состав хирономид и диатомей. Хирономиды, или комары-дергуны, могут служить источником информации о температуре июля в прошлые годы (температура воздуха в этот период достигает максимальных значений) и континентальности климата (разнице между условиями зимы и лета). Полученные результаты показали, что существуют четкие различия по содержанию и составу хирономид на разных участках отобранной пробы грунта оз. Хариней. В отложениях наиболее ранних датировок есть свидетельства того, что июльские температуры были на 3 °C выше современных, а климат имел более континентальный характер (наблюдалась более значительная разница между средними температурами января и июля). Затем 9.5 тыс. лет назад началось похолодание с постепенным снижением температуры в последние 4 тыс. лет. С тех пор июльские температуры оставались стабильными, однако усиление континентальности свидетельствует о

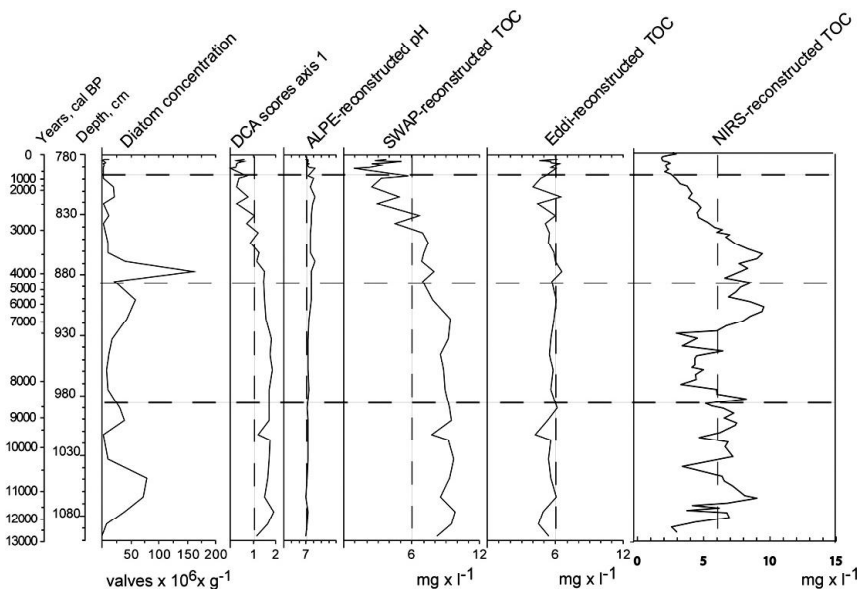
более коротких бесснежных сезонах. В настоящее время континентальность климата усиливается. Температурные свидетельства, полученные путем анализа хирономид, совпадают с инструментально измеренной температурой июля (13,3 °C). Из-за медленного накопления донных отложений детальные свидетельства современного потепления климата на модельном участке отсутствуют.



Позднеледниковые (голоценовые) параметры июльских температур и континентальности на оз. Хариней, полученные на основании анализа хирономид. Источник: Университетский колледж Лондона.

Диатомеи – это микроскопические водоросли, которые являются весьма информативными индикаторными видами, очень чувствительными к изменениям химического состава воды. В ходе исследований были обнаружены изменения видового состава диатомей оз. Хариней, которые связаны с изменением ТОС. Анализ диатомей хорошо коррелирует с другим независимым анализом – спектроскопии в ближней инфракрасной области (NIRS). Более низкие значения показателя последние 4 тыс. лет связаны с отступлением хвойных лесов на юг от оз. Хариней из-за похолодания климата.

В донных отложениях оз. Хариней (и четырех остальных обследованных озер региона) университетом Хельсинки были также проанализированы такие компоненты, как пыльца и макроscopicкие растительные остатки. Пыльцевой анализ в основном показывает изменения в региональной растительности, в то время как макроостатки, например, семена и листья, попадают в отложения с растений, произрастающих возле берегов озера



Позднеледниковые (голоценовые) записи ТОС на оз. Хариней, на основании анализа ископаемых диатомей (с современными калибровочными наборами SWAP и Eddi) и спектроскопии в ближней инфракрасной области (NIRS). Источник: Университетский колледж Лондона.

или в самом озере. Данные по исследованным озерам свидетельствуют о том, что в период до 3–4 тыс. лет назад леса произрастали гораздо севернее, чем сейчас располагается граница леса. Интересной особенностью всех проанализированных образцов



является то, что изолированные или небольшие группировки березы и хвойных деревьев существовали уже в позднеледниковье и раннем голоцене (в период до 8–9 тыс. лет назад), однако для формирования более густого леса потребовались тысячи лет. Это могло происходить по двум причинам. Одна из них – климат был практически идентичен современным условиям на границе леса. В ином случае – климат уже был более

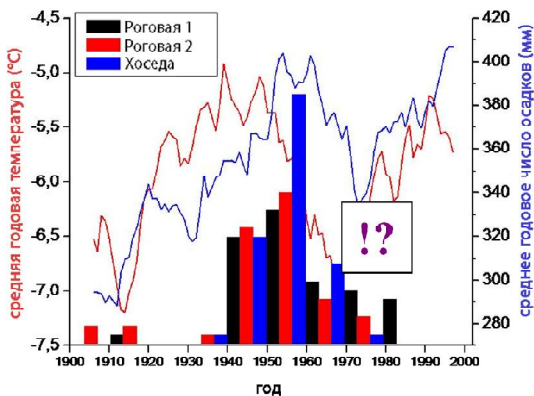
изолированные или небольшие группировки березы и хвойных деревьев существовали уже в позднеледниковье и раннем голоцене (в период до 8–9 тыс. лет назад), однако для формирования более густого леса потребовались тысячи лет. Это могло происходить по двум причинам. Одна из них – климат был практически идентичен современным условиям на границе леса. В ином случае – климат уже был более

теплым, но продвижению границы леса препятствовали такие факторы, как небольшие площади насаждений, медленное распространение семян, оттаивание мерзлоты в почве, ограниченное содержание питательных веществ и т.д.

Более теплый климат в течение позднеледниковья и раннего голоцена подтверждается анализом отложенный хирономид (см. выше) и присутствием

остатков определенных водных растений (например, рогоза), которые указывают на более высокие июльские температуры, чем сейчас. Это говорит о значительной временной задержке в продвижении северной границы леса и формировании леса в тундровой зоне уже после потепления раннего голоцена. Другим интересным результатом исследований является тот факт, что в раннем голоцене сначала сформировались сомкнутые березовые леса, которые затем были замещены смешанно-хвойными насаждениями. В настоящее время на северной границе леса в основном представлены хвойные породы.

Современная динамика границы леса в регионе «CARBO-North» исследована с помощью определения возраста молодых деревьев, растущих на границе самых северных хвойных насаждений. Интересным фактом является отсутствие новой древесной растительности в тундре в течение последних десятилетий потепления климата, что подтверждает возможность значительных задержек будущего продвижения границы леса.



Возраст деревьев на исследованных участках «CARBO-North». Новые деревья не появлялись в тундре в последние десятилетия, несмотря на увеличение температуры и количества осадков. Источник: Грейфсвальдский университет.

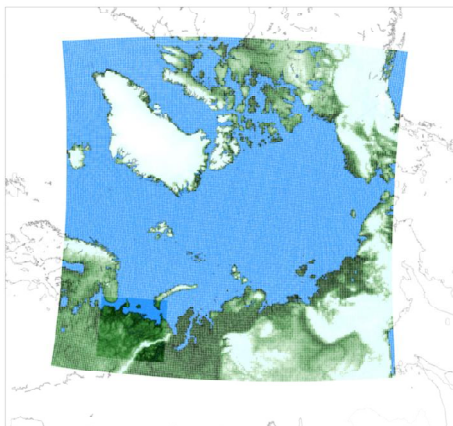
Институт Альфреда Вегенера (Потсдам, Германия)

Изменения климата в Арктике к концу XXI в.

Для моделирования климата Арктики и его будущих изменений была применена региональная климатическая модель (RCM) NHRAM, которая охватывала зону Арктики выше 60° с.ш. При

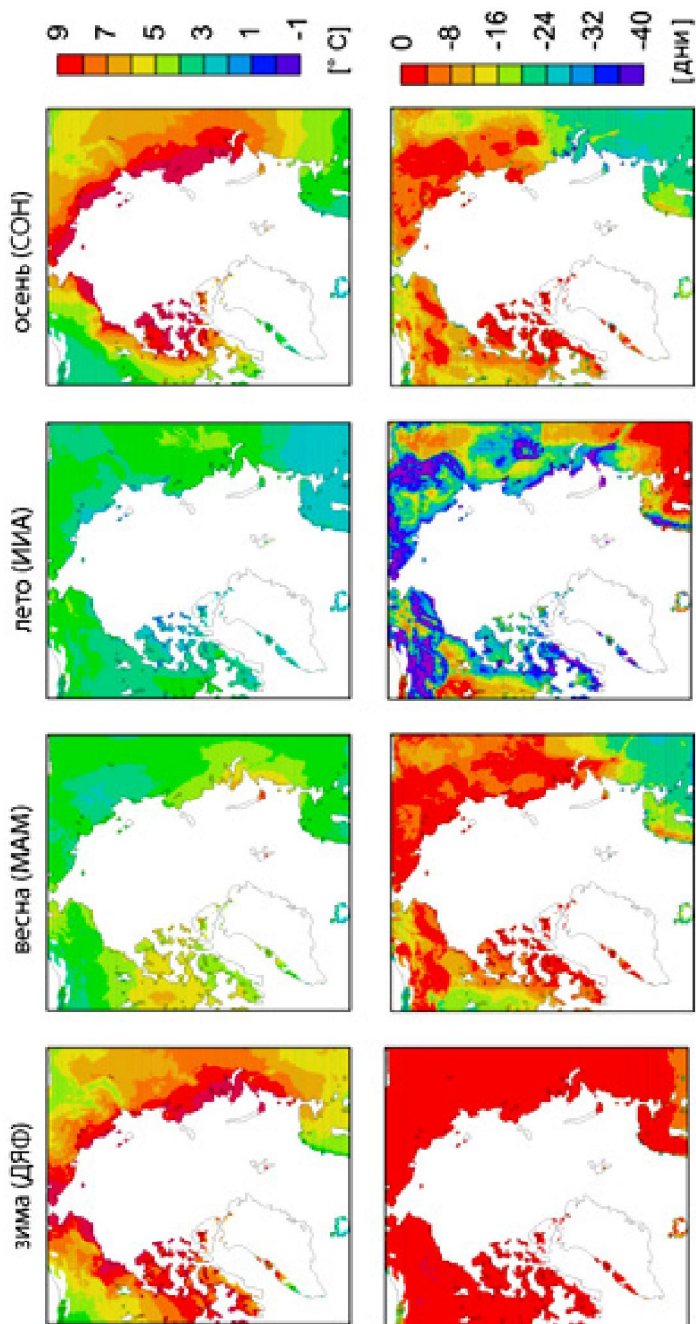
моделировании регионального климата для перехода к работе в выбранном районе с более высоким разрешением, в качестве ограничивающих условий обычно используют «грубые» результаты глобальных климатических моделей (в нашем случае ECHAM/MPI-OM). Для предсказания изменений климата, вызванных увеличением выбросов парниковых газов, Межправительственная группа экспертов по изменению климата разрабатывает несколько сценариев будущей эмиссии парниковых газов, которые учитывают особенности демографического, социального и экономического развития в мире. В этом проекте используется так называемый сценарий A1B – один из более «оптимистичных» сценариев, который предусматривает увеличение эмиссии CO_2 в начале XXI в., стабилизацию – в середине столетия и затем снижение выбросов к концу века. «Оптимистичным» сценарий является потому, что он предполагает принятие программы по снижению глобальной эмиссии парниковых газов. Сценарий «бизнес как обычно» (без уменьшения выбросов) может привести к гораздо более сильному повышению температуры воздуха.

Применяемая новейшая региональная климатическая модель (RCM) работает с разрешением 25 км, которое является наивысшим из доступных для арктических расчетов. Изменения климата рассчитывали по разнице между результатами моделирования для двух временных промежутков «2080-2099 минус 1980-1999». Смоделированные будущие изменения средней сезонной температуры у поверхности земли оказались огромными и варьировали от 1 до 10 °C в зависимости от сезона и района.



Область Арктики, охватываемая моделью NHRAM, разрешение 25×25 км. Регион «CARBO-North» выделен темным фоном в левом нижнем углу. Источник: Датский метеорологический институт.

Максимальное потепление зарегистрировано для осеннего и зимнего сезонов в тундровой зоне, минимальное – для летнего периода. Периоды отрицательных температур, т.е. число морозных дней (когда минимальная температура опускается ниже точки замерзания) будет сокращаться. Особенно сильно морозные периоды изменятся в переходные сезоны (сокращение до 25 дней) и летом (сокращение до 40 дней в высокогорных районах). В современных условиях в исследу-



Смоделированные сезонные изменения климата к концу XXI в. В верхнем ряду – температура воздуха у поверхности, в нижнем – количество дней с отрицательной температурой воздуха. Потепление показывают положительные значения температуры и уменьшение числа морозных дней. Источник: Институт Альфреда Вегенера.

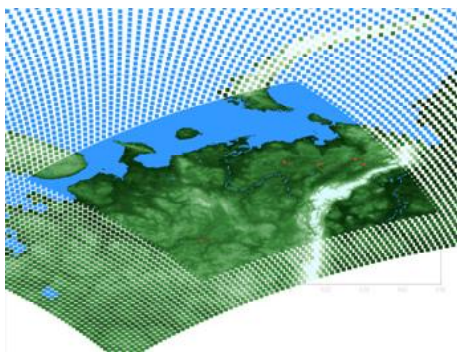
емом регионе достаточно холодно, а морозные дни случаются часто, тогда как к концу XXI в. общее повышение температуры передвинет дневной температурный минимум выше порога 0 °С, так что число морозных дней сократится.

Результаты нашего моделирования показали, что Арктика характеризуется высокой степенью региональной изменчивости и будущих изменений средних и экстремальных температур. Дополнительно мы оценили значимое влияние растительного покрова и почвенных характеристик на прогнозы по изменению климата.

Датский метеорологический институт (Копенгаген, Дания)
Университет Аляски (Фэрбенкс, США)
ОАО «Фундаментпроект» (Москва, Россия)

Будущие изменения климата, многолетней мерзлоты и ландшафтов на европейском Северо-Востоке России

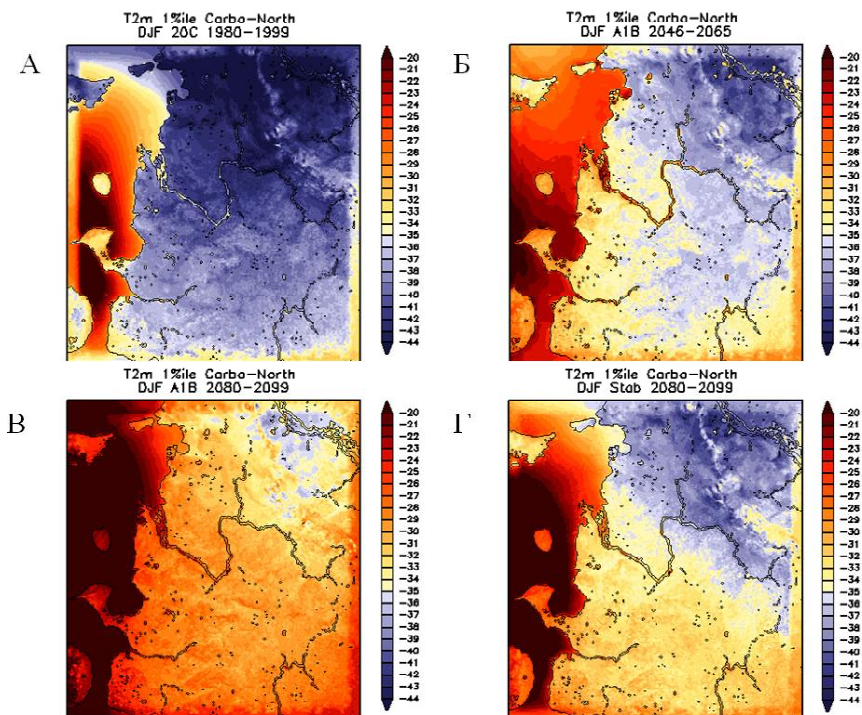
Датский метеорологический институт подготовил несколько моделей высокого разрешения, охватывающих климат и изменения климата. В то время как типичные региональные имитационные модели для области сопоставимого размера (около 1 млн. км²) действуют на ширину сетки 25 км, для данного проекта была выбрана ширина сетки всего 4 км, что позволило достигнуть беспрецедентного разрешения: вместо примерно 1700 узловых точек при типичных настройках в регионе «CARBO-North» было заложено около 60 тыс. узловых точек. Расчеты проведены для четырех временных промежутков – 1980–1999 гг., современный климат, 2046–2065 и 2080–2099 гг., что позволило исследовать развитие в соответствии с IPCC сценарием A1B в середине и конце XXI в. Дополнительно запущен стабилизационный сценарий, соответствующий программе ЕС «2 Degree Target», которая предусматривает, что концентрация CO₂ не превысит 550 мг/м³. Расчет типичного сценария занял у нашего суперкомпьютера четыре месяца.



Домен моделирования климата (изменений) высокого разрешения 4×4 км. Полевые участки проекта «CARBO-North» в тайге и тундре отмечены красными точками. Источник: Датский метеорологический институт.

В качестве доказательства значительного потепления, предсказываемого для региона исследований, мы обнаружили увеличение температуры воздуха у поверхности земли в среднем до 9 и до 16 °C для 1% наиболее холодных зимних дней в период 2080–2099 гг. по сравнению с 1980–1999 гг. Стабилизационный сценарий ЕС позволит сохранить темпы роста температур в районе средневековых значений и таким образом ограничить изменения половинным значением по отношению к современным показателям. Тем не менее это в любом случае свидетельствует о повышении среднегодовой температуры для региона «CARBO-North» на 4 °C.

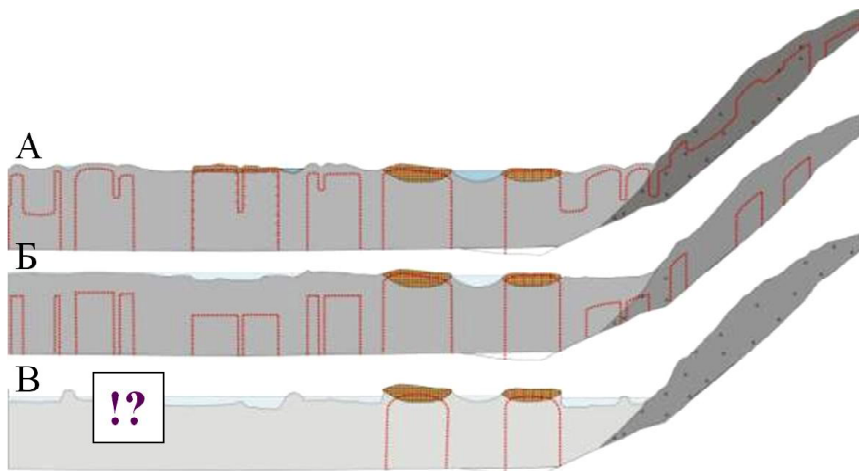
Основываясь на данных о среднемесячных температурах и мощности снежного покрова, полученных в результате климатических имитаций, в университете Аляски (Фэрбенкс) запустили мерзлотную модель GIPL 2.1 для временных промежутков 1980–1999 гг. (современный климат), 2046–2065 и 2080–2099 гг. Тем-



Анализ максимальных и минимальных температур для 18 самых холодных дней в году: современные зимние температуры (А), 2046–2065 гг. (Б), 2080–2099 гг. (В) и 2080–2099 гг., стабилизационный сценарий (Г). Источник: Датский метеорологический институт.

пература грунта на глубине 2 м для 1980, 2046 и 2080 гг. уже представлена в главе «Обзор основных результатов». Согласно проведенным расчетам, к концу XXI столетия многолетняя мерзлота исчезнет или деградирует во всех районах, расположенных южнее Полярного круга. Многолетнемерзлые породы останутся в стабильном состоянии только на наиболее возвышенных участках Уральских гор и северо-восточных низменностей. Произойдет массовое таяние мерзлоты вдоль побережья Ледовитого океана. Эта деградация мерзлоты повлияет на состояние грунта, который содержит льдистую мерзлоту и значительные запасы ПОВ, что заметно скажется на региональном углеродном балансе.

ОАО «Фундаментпроект» провел детальную оценку мерзлотных условий в тундровой зоне в окрестностях пос. Сейда. Эти исследования показали, что многолетнемерзлые породы на этом участке имеют большее распространение и льдистость, чем считалось ранее. Кроме того, полевые наблюдения свидетельствуют о том, что большая часть мерзлоты на участке Сейда уже находится в процессе оттайки с образованием талика (слоя незамерзшей почвы), который развивается между сезонно-талым слоем и подстилающими его многолетнемерзлыми породами.



Прогнозируемая осадка поверхности земли в окрестностях пос. Сейда в течение XXI в.: А – современное состояние; Б – 2046 г.; В – 2080 г. Пунктирными линиями указаны границы расположения многолетнемерзлых пород (на расстоянии 10 м от поверхности), коричневым цветом выделены торфяники, голубым – временные озера. Верхние слои мерзлоты на тундровых возвышенностях (справа) полностью исчезнут, хотя на некоторых торфяных плато они могут оставаться стабильными благодаря изоляции сухими слоями торфа (в конечном итоге, эти области также оттают). Ключевой вопрос заключается в том, как долго оттаявшие (термокарст) озера будут существовать. Источник: ОАО «Фундаментпроект», Москва.

Сотрудниками «Фундаментпроекта» завершена оценка потенциальной просадки поверхности земли в тундре в окрестностях пос. Сейда на основе картирования распределения льдистой мерзлоты в почве и прогнозов оттайки многолетней мерзлоты. Оттайка льдистой мерзлоты в почве и ММП вызовет просадку поверхности земли. Результаты этих процессов масштабны: большая часть тундровых низменностей и торфяных плато временно трансформируется в мелководные озера, что окажет серьезные последствия для углеродного баланса (и эмиссии метана) в регионе. Ключевым фактором неопределенности является то, как долго будут существовать эти новообразованные озера, поскольку дальнейшая оттайка мерзлоты, в конечном счете, позволит воде уйти в землю или в прилегающие водотоки.

Запасы углерода и азота в тундровых и таежных экосистемах

Стокгольмский университет (Швеция)

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, Россия)

Где концентрируется почвенный углерод и сколько его в слоях многолетней мерзлоты

В северных арктических районах существуют огромные запасы почвенного органического углерода, которые сформировались благодаря тому, что скорость разложения растительных остатков замедлена в условиях низких температур и часто заболоченных экотопов. Современная оценка запасов почвенного органического углерода в 1672 Pg (10^{15} г), возможно, является слишком абстрактной. Для сравнения, это более чем в два раза больше общего запаса углерода в атмосфере и более чем в три раза больше общего содержания углерода в мировой биомассе леса. Следовательно, любые изменения пула почвенного углерода из-за глобального потепления и таяния многолетней мерзлоты могут иметь глобальные последствия для концентрации атмосферных парниковых газов и международной политики, касающейся уменьшения выбросов парниковых газов. До сих пор вклад углерода, законсервированного в многолетнемерзлых породах, не учитывался в сценариях развития парникового эффекта будущего, климатических прогнозах и международных переговорах по снижению эмиссии парниковых газов.

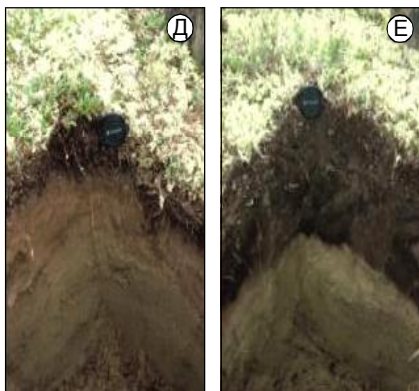
Регион «CARBO-North» не является исключением. Средние запасы органического вещества в почвах, торфяных и озерных отложениях таежной и тундровой зон составляют 30–40 кгС/м². Важный вопрос, на который мы попытались ответить в рамках

проекта «CARBO-North» – где точно располагаются эти гигантские запасы почвенного углерода в пределах исследуемого района и его разных типов ландшафтов. Мы были особенно заинтересованы в определении количества органического углерода в многолетнемерзлых горизонтах тундровых почв, поскольку ожидается, что они подвергнутся наибольшему воздействию оттайки мерзлоты.

К сожалению, не существует быстрого пути оценки пула почвенного углерода. Методами удаленного зондирования невозможно с какой-либо достоверностью оценить содержание и запасы почвенного органического углерода. Карты растительности и почв,

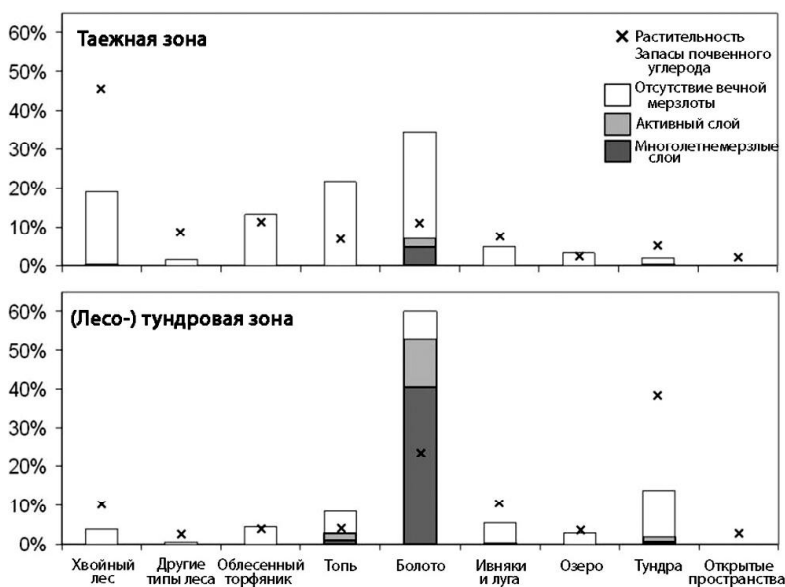


Полевые работы по отбору почвенных образцов. А – забивание стальной трубки в землю и отбор 5-10 см керна за один раз; Б – образец минерального горизонта почвы с льдистой мерзлотой и валунами; В – образец минерального горизонта почвы с погребенной органикой; Г – образцы торфа были отобраны вдоль береговой линии так называемых «термокарстовых» озер, где мерзлота быстро деградирует; Д – лишайниковая тундра с маломощным верхним органомным горизонтом почвы; Е – лишайниковая тундра с более развитым верхним органомным горизонтом почвы (© Р. Kuhry).



основанные на спутниковых снимках (и полевых наблюдениях), помогают при оценке запасов органического углерода индивидуальных почвенных профилей, однако последние можно определять только используя классические методы почвоведения (отбор проб почв из почвенных разрезов или кернов при бурении ММП с последующим химическим анализом на содержание $C_{орг.}$). Эта задача также усложняется огромной вариабельностью запасов почвенного органического углерода на уровне ландшафтов, особенно в тундровых регионах.

Значительные запасы органического углерода в регионе «CARBO-North» приурочены к заболоченным экосистемам (болота и топи), где слои торфа, которые почти полностью состоят из органического вещества – торфа, достигают толщины 4 м. Это справедливо как для таежного, так и для тундрового района. В среднем, такие заболоченные участки покрывают менее 25% территории, но они содержат более 70% пула почвенного органического вещества. Большая часть минеральных почв, за исключением торфяно-глеевых и пойменных, характеризуется относительно невысокими запасами углерода в метровой толще почвы – 9.7–18.1 кгC/м². Весомый вклад в запасы углерода минеральных почв

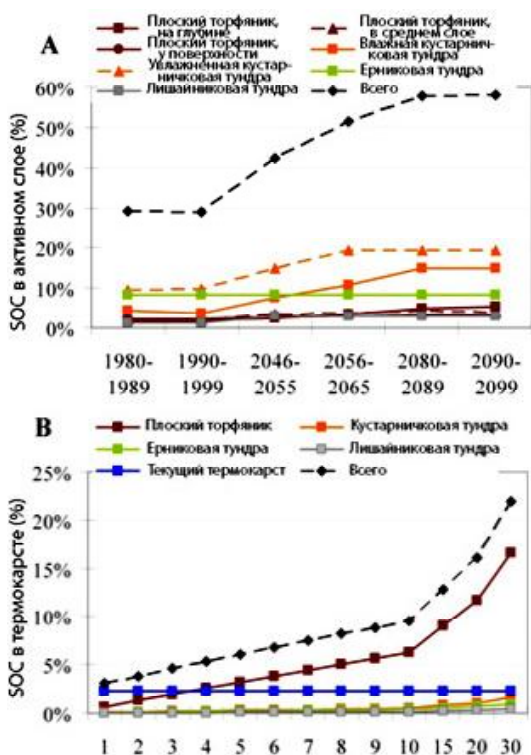


Распределение общего органического углерода в северной тайге и тундровых областях региона «CARBO-North». Большая часть многолетнемерзлого углерода сосредоточена в заболоченных экосистемах тундры. Источник: Стокгольмский университет.

вносит присутствие в почвах криотурбированных горизонтов – от 2.7 до 14.2 кгС/м². Большая часть запасов С_{орг.}, законсервированного в ММП, сосредоточена также в торфяниках, особенно в тундровой зоне, где области многолетней мерзлоты охватывают обширные территории.

Мы оценили процентное содержание почвенного углерода в тундре, который может подвергнуться влиянию обширного, но постепенного таяния многолетней мерзлоты в глубоких слоях, располагающихся ниже сезонно-талого слоя почвы, оттаивающего каждое лето (активный слой). Доля органического углерода при оттаивании тундровых почв, согласно прогнозам, увеличится примерно с 30 до 60% от общего запаса. К этому необходимо добавить почвенный органический углерод, который будет теряться путем локальной, но очень быстротечной латеральной эрозии торфяников, расположенных вдоль берегов термокарстовых озер. В настоящее время эти потери составляют менее 5% от общих запасов, однако при более суровых сценариях их доля может составить более 20% к концу XXI в. Другими словами,

довольно большая часть общих запасов ПОВ, которое сейчас сосредоточено в многолетней мерзлоте, по прогнозам, в процессе таяния ММП растет и станет доступной для трансформации и минерализации в течение текущего столетия.



Изменение содержания общего органического углерода (черная линия) и углерода различных типов ландшафта (цветные линии), который подвергнется оттайке (слева) и латеральной эрозии термокарста (справа). Источник: Стокгольмский университет; модель, прогнозирующая поведение активного слоя почвы, предоставлена университетом Аляски, Фэрбенкс.

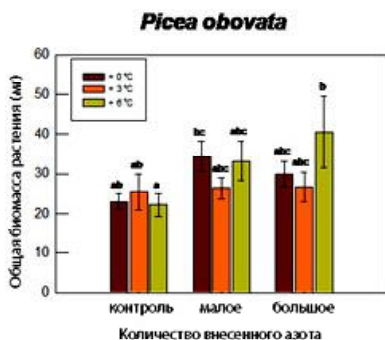
Ноттингемский университет (Великобритания)

Почвенный азот: важное питательное вещество для роста растений

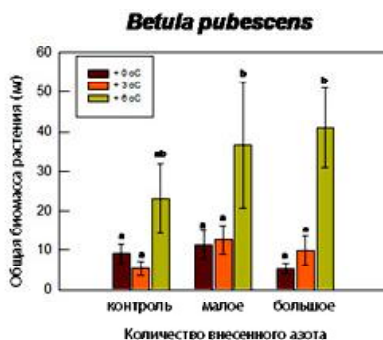
Арктические тундры и бореальные леса – это неплодородные уголья, в которых рост растений обычно ограничен запасами азота. Низкая температура на севере является одним из факторов, который замедляет темпы разложения почвенного органического вещества и переход азота в доступные для растений формы. Глобальное потепление и связанное с ним увеличение температуры почвы, по прогнозам, вызовет ускорение темпов разложения растительного опада, темпов эмиссии азота и роста растений, включая деревья. Дополнительно к этому увеличится азотное загрязнение окружающей среды. Темпы поступления азота в растения с атмосферными осадками в северных регионах сейчас в четыре раза выше, чем в доиндустриальную эпоху. Возможно, что оно уже простиМУлировало рост растений в бореальных лесах и тундровых экосистемах. Наши исследования ставили перед собой цель оценить возможность ускорения роста самосева деревьев на северной границе леса под влиянием возрастающих концентраций азота в снеге и того, что любой стимулирующий эффект будет усилен повышенными температурами, наличие которых предсказывается в будущем.

Нами отобраны образцы верхних горизонтов тундровой почвы в 100 м от изолированного насаждения хвойных деревьев на северной границе распространения леса. Участок располагается на водоразделе и является одним из тех, которые могут быть заселены хвойными. Почву просеяли в полевых условиях для удаления растительных остатков и отправили в Ноттингемский университет, где ее использовали для проведения эксперимента. Семена ели (*Picea obovata*) и березы (*Betula pubescens*), полученные из субарктических лесных районов, проращивали и затем проростки переносили на экспериментальные площадки 6.5×6.5×6.5 см с подготовленной почвой по мере достижения возраста 34 и 21 дня соответственно. Проростки выращивали в течение 16 недель при трех разных температурах и при трех уровнях содержания азота. Базовый график или контрольный температурный режим был построен для того, чтобы отразить текущую температуру, и основывался на 30-летних средних показателях температуры и полевых измерениях, сделанных в ходе реализации проекта «CAR-BO-North». Остальные температурные режимы были выше контроля на 3 и 6°C, последний соответствовал прогнозируемому увеличению температуры в регионе к концу XXI в. Азот привносили в виде единичной добавки 0, 0.8 или 2.5 кг N га⁻¹ год⁻¹. Содер-

жание $0.8 \text{ кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ примерно соответствует содержанию азота в снежном покрове тундры, который затем высвобождается при таянии снега. Самое высокое содержание соответствует потенциальному будущему трехкратному обогащению по сравнению с современным уровнем запаса. Результаты показывают, что оба вида деревьев растут в тундре без добавления азота и при современной температуре, однако они по-разному реагируют на добавки азота.



Изменение общей биомассы проростков *Picea obovata* при внесении азота и увеличении температуры (n=6)



Изменение общей биомассы проростков *Betula pubescens* при внесении азота и увеличении температуры (n=4-6)

Источник: Ноттингемский университет.

Ель оказалась более чувствительной к введению азота в почву, чем к увеличению температуры, тогда как береза демонстрировала обратную тенденцию и реагировала в большей степени на изменение температурного режима. Если эти результаты соотносить с ростом деревьев в природных условиях, то можно ожидать более быстрый рост березы, чем ели, поскольку в последние годы выражена тенденция повышения температуры, тогда как содержание азота увеличивается медленней. Эти результаты также подтверждают, что ель, растущая на северной границе леса и приуроченная к бедным элементами питания почвам, является очень чувствительной к содержанию азота.

Полученные результаты позволяют обосновать рассмотренные выше особенности развития лесов в раннем голоцене. Сначала тундровые сообщества замещались сомкнутыми березовыми лесами, и только после этого развивались смешанные хвойные леса. Происходило ли это благодаря тому факту, что почвам требовалось время, чтобы накопить достаточные запасы азота, который является лимитирующим фактором для роста хвойных деревьев?



а



б



в



г

Проростки березы (а, б) и ели (в, г), выращенные в течение 16 недель при современной температуре с добавлением азота (а, в) и при увеличении температуры на 6 °С и добавлении азота в количестве 2.5 кг/га (б, г). Источник: Ноттингемский университет.

Баланс парниковых газов

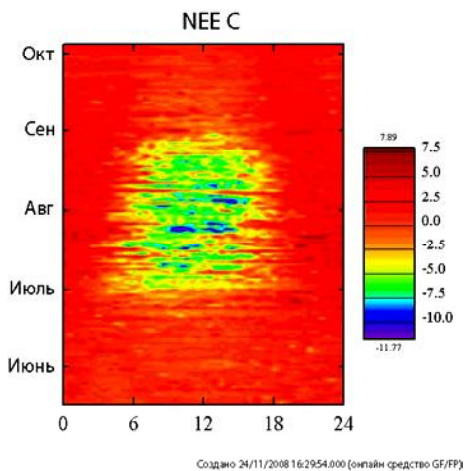
Копенгагенский университет (Дания)

Поглощение и эмиссия парниковых газов из тундровых ландшафтов

По данным ИРСС, средняя годовая температура воздуха в высоких широтах (севернее 65° с.ш.) увеличилась более чем на 1 °С за последние 30–40 лет. При этом потепление прослеживается при оценке зимних температур – в период с осени до весны. Если это потепление продолжится, как прогнозируется в большинстве климатических моделей, последствия для тундровых районов Севера России могут быть очень серьезными. Многолетняя мерзлота, подстилающая уязвимые северные экосистемы, не просто постепенно растает: этот процесс может привести к изменениям темпов эмиссии парниковых газов. Учитывая огромную площадь,

которую покрывают данные экосистемы, такие перемены способны сами по себе привести к преобразованиям глобального климата путем увеличения или снижения атмосферной концентрации важных парниковых газов, в основном диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4). Эти изменения, также известные как механизмы ответной климатической реакции, были основным объектом наших исследований в течение полевых работ в тундре на европейском Северо-Востоке.

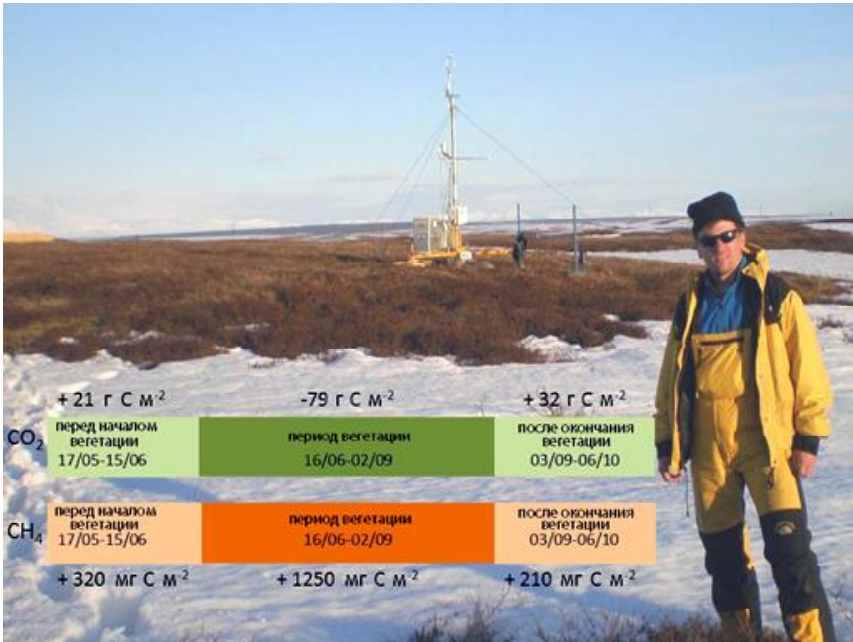
В течение непродолжительного экспедиционного периода 2007 г. и более продолжительных полевых работ 2008 г. (с весны до осени) были измерены потоки CO_2 и CH_4 методом вихревой ковариации. Для измерения концентрации газов на вышку устанавливали необходимую аппаратуру, что позволило наряду с измерениями скорости ветра рассчитать обмен газов между поверхностью земли и атмосферой. В течение 4.5 месяцев наблюдений, проведенных в 2008 г., обнаружено, что на протяжении более теплых сезонов тундра выступает в роли несущественного потребителя CO_2 . Поглощение углекислого газа (нетто) в процессе фотосинтеза растений в течение вегетационного периода несколько выше, чем выделение CO_2 в результате разложения почвенного



органического вещества за весь период измерения. Поглощение было особенно высоким в течение дневного времени суток в наиболее теплые месяцы (июль-август), в то время как эмиссия CO_2 из почвы доминировала в ночное время, а также поздней весной и ранней осенью.

Метан образуется в анаэробных условиях бактериями в процессе разложения почвенного органического вещества. Следовательно, выделение этого газа приурочено к ландшафтам с близким уровнем залегания почвенно-грунтовых вод к дневной поверхности. Проведенные нами измерения показали умеренную эмиссию CH_4 в течение летнего периода с максимумом вы-

деления в июле-августе. Эмиссия CH_4 была особенно высокой в ночное время, а также поздней весной и ранней осенью.



Исследователь Т. Йохансон (Т. Johansson) перед измерительной вышкой в тундре демонстрирует данные по потокам CO₂ и CH₄, полученным за полевой сезон 2008 г. Положительные значения показывают выделение в атмосферу, отрицательные – поглощение тундровыми экосистемами. Источник: Копенгагенский университет.

деления в середине лета, когда температуры воздуха максимальны. В целом, тундровые ландшафты выделяют меньше CH₄, чем водно-болотные угодья на этих широтах, однако, поскольку тундра является совокупностью различных типов поверхности, где гидроморфные (переувлажненные) участки составляют около 20 % площади. Результаты наших исследований хорошо согласуются с тем, что можно ожидать в общем для региона. Поскольку CH₄ является гораздо более сильным парниковым газом, чем CO₂, эффект эмиссии метана тундровыми экосистемами сопоставим примерно с 50 г CO₂/м² с мая по октябрь.

Анализ наших данных свидетельствует о существенных различиях между разными типами тундровых растительных сообществ. Эти различия могут быть использованы для интерпретации того, какой эффект окажет состав растительности под влиянием будущих климатических условий. Для ответа на вопрос, ускорит ли таяние мерзлоты темпы эмиссии парниковых газов тундрами региона, требуются дальнейшие исследования. Однако

возрастающие в течение последних десятилетий и, возможно, в будущем температуры ускорят темпы разложения органического вещества в почве и могут потенциально увеличить выделение CO_2 и CH_4 арктическими тундрами.

Университет восточной Финляндии (Куопио)

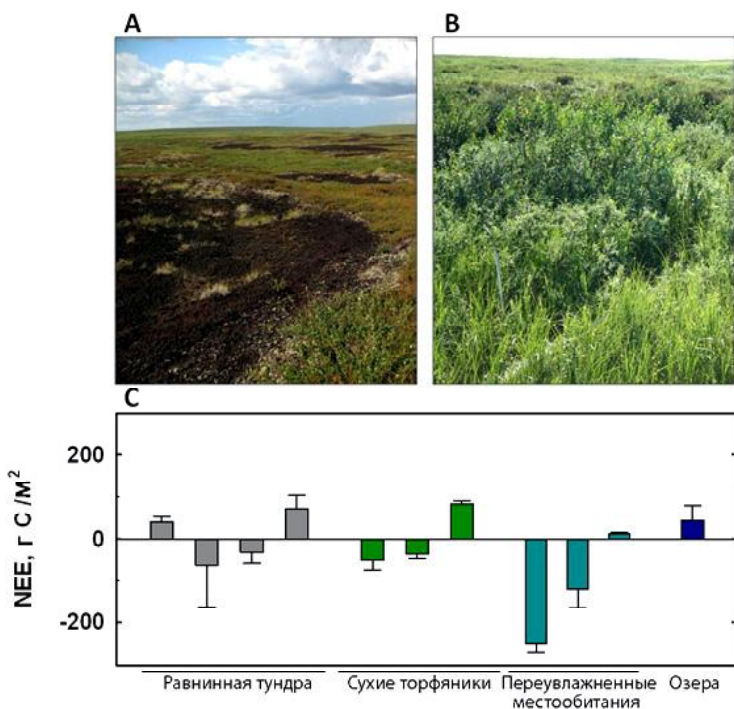
Тундры работают как резервуар и источник парниковых газов

Тундра – это пятнистая экосистема, мозаика из разных растительных сообществ и типов почв. Такое разнообразие обусловлено несколькими взаимодействующими факторами окружающей среды, которые включают в себя уровень влажности почвы, распространение многолетней мерзлоты и высоту снежного покрова в зимнее время. Пятнистость тундры влияет на круговорот углерода и азота, что проявляется в высоком разнообразии типов организации потоков парниковых газов на ландшафтном уровне. Мы исследовали потоки трех наиболее важных парниковых газов – CO_2 , CH_4 и N_2O – в тундровой зоне в окрестностях пос. Сейда с использованием камер.

Растительный покров в тундре варьирует от почти голых участков поверхности земли так называемых «торфяных кругов» до сомкнутых зарослей ивы, достигающих двухметровой высоты. Наземная биомасса определяет способность тундровых экосистем к поглощению CO_2 из атмосферы путем фотосинтеза. Исследования в течение года показали, что хорошо дренированные участки тундры со скудной растительностью играют роль значимых источников атмосферного CO_2 , тогда как влажные экотопы с плотным растительным покровом оказались резервуарами поглощения CO_2 . Эмиссия CH_4 , более сильного парникового газа, чем CO_2 , также значительно варьирует в пространстве от несущественных значений на сухих участках до заметного уровня выделения на сильно заболоченных площадках. Вопреки тому, как считалось раньше, мы обнаружили, что тундровые ландшафты также являются участками, выделяющими большие количества N_2O , сильнее парникового газа. При этом эмиссия N_2O с покрытых растительностью участков незначительна, а наибольший уровень выделения наблюдается на лишенных растительности торфяных кругах, созданных суровыми климатическими условиями.

Прогнозируется, что изменения климата вызовут реорганизацию тундровых ландшафтов в будущем. Оттайка многолетнемерзлых пород приведет к изменению условий дренированности поверхностных вод и, таким образом, изменению соотношения пло-

щади переувлажненных и сухих поверхностей. Формирование лишенных растительности участков происходит под влиянием климата, ожидается, что их площади изменятся в результате глобального потепления. Такие изменения поверхности земли из-за высокого пространственного разнообразия тундровых потоков парниковых газов, безусловно, скажутся на суммарном влиянии тундровых экосистем на атмосферу.



Примеры высокого разнообразия растительного покрова и обмена парниковых газов в тундре: А – лишенные растительности участки на сухих мерзлотных торфяниках; В – заросли ив в переувлажненных экотопах с высокой биомассой растений; С – годовая нетто-продукция экосистем (NEE – Net Ecosystem Exchange) доминирующих типов тундровых ландшафтов, которая показывает общий баланс CO_2 . Положительные значения свидетельствуют о выделении в атмосферу, отрицательные – о поглощении CO_2 экосистемой. Представлены средние со стандартным отклонением ($n = 3$). Источник: Университет восточной Финляндии.

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, Россия)

Влияние человека на тундру

Исследования потоков парниковых газов в основном традиционно ведутся на малонарушенных участках тундры. Процессы газового обмена нарушенных мерзлотных равнин остаются малоизученными. Тундры европейского Северо-Востока России из-за увеличения темпов крупномасштабной добычи нефти и газа являются одним из самых нарушенных регионов Российской Арктики. Наши исследования показали, что естественные природные комплексы в тундре в значительной степени трансформированы в результате развития инфраструктуры, связанной с добычей и транспортировкой углеводородов. Антропогенное влияние приводит к трансформации растительного покрова, оттайке многолетнемерзлых пород и изменениям структуры почвенного покрова, почв, их температуры и влажности. В свою очередь, эти изменения могут привести к сдвигам направления и скорости потоков парниковых газов. Антропогенное воздействие на тундры европейского Северо-Востока России и других районов Севера увеличивается каждый год и может стать более важным в глобальном масштабе.



Нефтедобывающая платформа и трубопровод в окрестностях Колвы (© В. Пономарев).

Полевые исследования, проведенные за трехлетний период, позволили получить новые данные об изменении потоков CO_2 и CH_4 в течение вегетационного периода в трансформированных растительных сообществах комплексов торфяники/термокарст в бассейне р. Колва, который испытывает влияние последствий развития нефтяной промышленности. Был проведен сравнительный анализ потоков CO_2 и CH_4 на трансформированных и нарушенных участках. Результаты исследований показали, что скорость потоков парниковых газов на нарушенных участках увеличивается, при этом наиболее заметная разница наблюдается в условиях повышения температуры воздуха и почвы. Инфраструктурные строения (дороги, трубопроводы, буровые платформы и др.) нарушают естественный внутрпочвенный сток почвенно-грунтовых вод, что приводит к заболачиванию ландшафтов. В результате увеличивается эмиссия парниковых газов, особенно CH_4 . Эти данные могут быть использованы для оценки возможных изменений парникового баланса тундры в условиях антропогенного пресса и глобального потепления климата.

Грейфсвальдский университет (Германия)

Углеродный баланс северных болот

Бореальные области России занимают обширные площади, а болота являются одними из наиболее важных экосистем этой природной зоны. Более 50% площади мировых северных болот расположено в России. Болота характеризуются переувлажненными условиями, которые замедляют процессы разложения мертвых органических остатков и таким образом приводят к накоплению значительных запасов углерода. Однако изменения климата способны привести к сокращению этих запасов, в результате чего углерод может поступить в атмосферу.

Основными типами болот, которые распространены в районе исследований, являются низинные и верховые. Главное различие между низинными и верховыми болотами заключается в типе их водного питания. Низинные болота зависят от грунтовых вод, тогда как в верховые болота вода поступает с атмосферными осадками. Верховые и низинные болота также различаются по pH, содержанию минеральных веществ и составу растительного покрова.

Существует множество разных процессов, вовлеченных в обмен CO_2 и CH_4 между болотами и атмосферой. Например, CO_2 поглощается в ходе фотосинтеза растений и выделяется в результате дыхания растений, почвенных микроорганизмов и живот-



Исследовательский участок на Усть-Пожегском болоте в окрестностях пос. Слудка (© M. Gazovic).

ных. CH_4 производится микроорганизмами в анаэробных зонах болота. Данные процессы зависят от погодных условий, водного режима и содержания питательных веществ, особенностей растительности. Поскольку эти характеристики варьируют между низинными и верховыми болотами, мы можем наблюдать разные количества CO_2 и CH_4 , которые были запасены или выделены в атмосферу. Во время исследований на Усть-Пожегском болоте в районе пос. Слудка верховой участок выделял CO_2 в атмосферу, а низинный – поглощал углекислый газ. В то же время низинный участок выделял больше CH_4 , чем верховой. Широко известно, что выделение и поглощение углерода меняется в разные годы из-за погодных условий. Целью будущих исследований должна быть оценка межгодовой изменчивости обмена CO_2 и CH_4 между болотами и атмосферой.

Университет Вагенингена (Нидерланды)

Выщелачивание почвы и речной сток

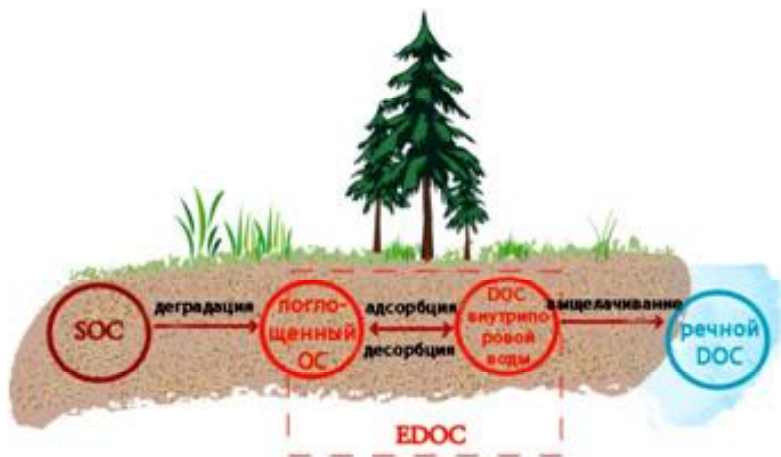
Вымывание органического углерода из почвы

Углерод органических соединений, образующихся в процессе почвообразования, выносится из экосистем не только в результате эмиссии парниковых газов в атмосферу. Органические вещества способны также мигрировать из почвы в нижние горизонты, почвенно-грунтовые воды и водотоки в форме водорастворимых соединений. Ряд участников проекта «CARBO-North» исследовал процессы образования и миграции углерода водорастворимых органических веществ (DOC) в системе почва – почвенно-грунтовые воды – поверхностные воды, а также возможность их изменения под влиянием меняющегося климата и окружающей среды. Для понимания современного функционирования различных компонентов, влияющих на миграцию водорастворимых органических веществ в почвах и водотоках, были проведены соответствующие полевые исследования в 2007 и 2008 гг. Учитывая возможность повышения температуры воздуха на территории европейского Северо-Востока России, предполагается, что к концу XXI в. это увеличение будет примерно соответствовать современной разнице между тундровой и таежной зонами. В связи с этим сравнительный анализ этих двух природных зон в их современном состоянии представляет весьма значительный интерес.

В рамках проекта «CARBO-North» изучены строение и свойства различных типов таежных и тундровых почв, а также макро- и микроэлементный состав почвенно-грунтовых вод. Цель этих исследований – определение содержания углерода водорастворимых органических веществ (DOC) и их фракционного состава (гумусовые (ГК), фульво- (ФК) и гидрофильные (НУ) кислоты), а также почвенных характеристик, которые влияют на сорбцию DOC, в различных типах почв таежной и тундровой зон европейской части России. Богатые органикой верхние горизонты почв содержат в почвенном растворе заметно больше органических веществ, чем нижние горизонты профиля. Более глубокие минеральные горизонты почв активнее сорбируют органические соединения. Водорастворимые органические соединения (DOC) в таежных и тундровых почвах состоят только из НУ и ФК. Содержание НУ возрастает вниз по профилю. Адсорбция DOC минеральными компонентами почв является ключевым геохимическим процессом, выводящим DOC из пула потенциально растворимых органических соединений. Несмотря на то, что суммарное содержание углерода водорастворимых органических соеди-

нений (EDOC), включающих адсорбированные минеральной фазой почвы и находящиеся в почвенном растворе компоненты, является лишь небольшой частью почвенного органического углерода, он представляет собой значительный буферный пул для DOC водотоков. Было показано, что 80–90% EDOC ранее находилось в адсорбированном состоянии. Фракционный состав EDOC обусловлен тем, что минеральной фазой почв адсорбируются преимущественно НУ и ФК. Следовательно, при десорбции именно эти соединения поступают в почвенный раствор. Пути миграции водорастворимых соединений различаются как в почвах тундровой и таежной зон, так и в течение вегетационного периода, что, вероятно, оказывает соответствующее влияние на концентрацию углерода органических соединений (DOC) в поверхностных водах рек и озер.

В условиях меняющегося климата пути миграции почвенных растворов в профиле могут существенно изменяться, особенно, в тундровых ландшафтах, что вызвано таянием многолетней мерзлоты. Таким образом, сорбционные свойства почв являются фактором, контролирующим поступление DOC в водотоки при оттаивании почвенного профиля. Для лучшего понимания процессов адсорбции и десорбции DOC в почвах применяется почвенное химическое моделирование, результаты которого могут пролить свет на состав растворов, растворимость минеральных соединений и специфику протекания реакций адсорбции-десорбции в зависимости от типа почвы.



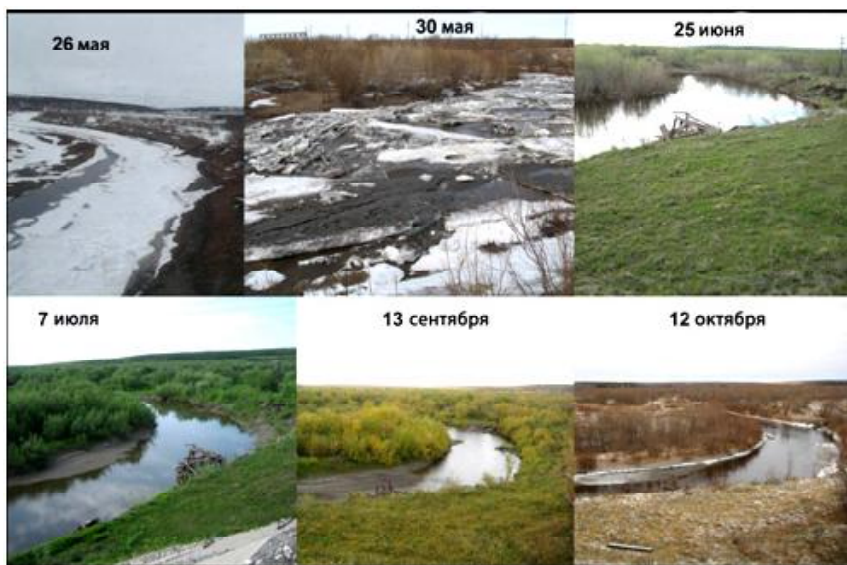
Адсорбция и десорбция углерода водорастворимых органических веществ в почве. Источник: Университет Вагенингена.

Биологическая станция Ламми, Университет Хельсинки
(Финляндия)

Высокая концентрация растворенного органического углерода (DOC) во время весеннего паводка в тундровых реках

Режим стока тундровых рек демонстрирует четкую сезонную динамику. Весенний паводок, включая впечатляющий ледоход в конце мая, совпадает с наивысшей интенсивностью потоков органического углерода и обеспечивает более 90% общего годового стока органики. Летний сезон сам по себе короткий, и потоки органического углерода на порядок менее интенсивны.

Полевая экспедиция состоялась в период с 17 мая по 2 июня 2008 г., на который пришелся ледоход на тундровой р. Седияга. В то время как концентрации DOC в воде зимой составляли 2–4 мг С л⁻¹, во время весеннего паводка значения этого показателя достигли 15–16 мг С л⁻¹. После прохождения паводка содержание DOC снизилось до 4–7 мг С л⁻¹. Высокий уровень стока и высокие концентрации DOC в воде свидетельствуют о том, что весенний паводок обеспечивает наибольшую часть общего годового стока органического углерода, переносимого реками.



Разные сезоны в бассейне тундровой р. Седияга, 2008 г. Источник: биологическая станция Ламми (Университет Хельсинки).

Утрехтский университет (Нидерланды)

**Моделирование речного стока
и экспорта растворенного органического углерода
в условиях будущих изменений климата и окружающей среды**

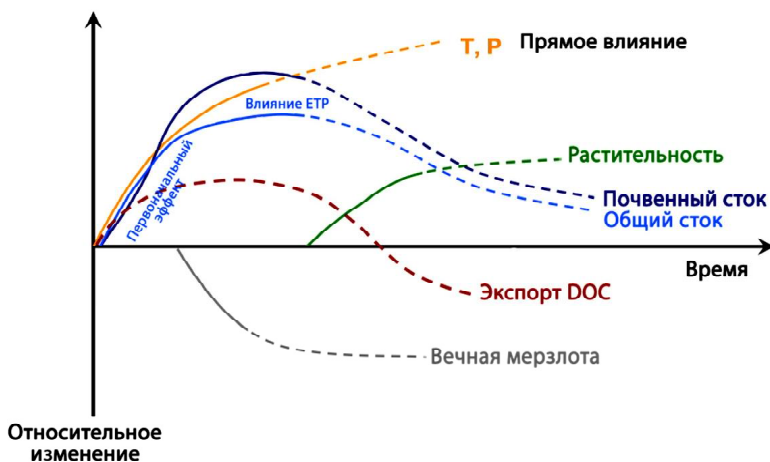
В почвах северных регионов запасены большие количества органического углерода и объемы DOC, которые переносятся реками к Северному Ледовитому океану, потенциально они очень велики. Измерения речного стока и гидрохимических показателей связали и сравнили с количеством воды, поступающей из почв, с помощью гидрологической модели, которая учитывает различные пути движения воды в почве и то, как она попадает в водотоки. Затем были использованы климатические сценарии для того, чтобы оценить потенциальные будущие речные потоки.

Оттайка мерзлоты может привести к выделению большого количества органического углерода, который до этого находился в замороженном состоянии, и это, в свою очередь, может повлечь за собой увеличение речного стока углерода. На данный момент исследования показали, что наибольшее количество углерода наблюдается в речной воде во время весеннего паводка, когда оттаивает замерзшая земля, и преобладает поверхностный и латеральный сток воды сквозь богатые органикой горизонты почв. Летом почвенные условия, т.е. наличие или отсутствие многолетней мерзлоты, определяют глубину прохождения потоков воды по почвенному профилю. Различия между верхними, богатыми органикой почвенными горизонтами и более глубокими минеральными, которые могут адсорбировать DOC, оказывают влияние на окончательный экспорт углерода органических соединений реками.

Возможное будущее потоков $C_{\text{орг}}$ с речным стоком под влиянием более теплого климата иллюстрирует гидрологическая модель, описывающая разные пути движения воды и ее количество в течение года. Мы разработали четыре модели: две для тундровых рек и две – для таежных. В каждой природной зоне была изучена одна крупная и одна малая реки в природных условиях и при моделировании. Химический анализ почвенных растворов показал, что в верхних горизонтах почв и в целом в таежных почвах содержание органического углерода выше по сравнению с минеральными горизонтами. Эти данные верифицировали с использованием показателей, полученных при опробовании поверхностных вод исследованных рек.

Результаты моделирования показали, что повышение температуры и уровня осадков в соответствии с климатическими моделями приведет к увеличению объема речного стока и вместе с

этим на 20–60% увеличится экспорт органического углерода. Затем более высокие температуры обусловят увеличение испарения, что несколько снизит объем речного стока. В то же время определенный эффект может оказать медленнее тающая многолетняя мерзлота. Возрастание объемов внутриводного стока (baseflow) приведет к повышению адсорбции DOC и, соответственно, снижению поступления $C_{\text{орг}}$ в поверхностные воды. Изменения в растительном покрове, включая продвижения границы леса на север, произойдут еще позже. Суммарный эффект потоков $C_{\text{орг}}$ с поверхностными водами до сих пор не определен, поскольку часть бассейнов тундровых рек, которые в настоящее время находятся в области многолетней мерзлоты, содержат значительные запасы торфа, находящегося в мерзлом состоянии. Если они растают, общий эффект может выразиться в увеличении долгосрочного речного стока органического углерода. Интересно отметить, что таежные реки, как правило, переносят больше DOC, чем тундровые. Концентрации DOC в озерах также в общем выше в тайге, чем в тундре, что согласуется с вышеизложенными результатами Университетского колледжа Лондона, которые свидетельствуют об уменьшении содержания DOC в озерах при смене лесной растительности тундровыми сообществами вследствие похолодания климата в позднем голоцене.



Ожидаемые изменения гидрологических характеристик и соответствующих речных потоков углерода. Т – температура, Р – осадки и ЕТР – испарение увеличиваются, растительность тундры замещается тайгой, речной сток и многолетняя мерзлота сокращаются. Источник: Утрехтский университет.

Масштабирование и моделирование

Кафедра наук об окружающей среде, Университет Хельсинки (Финляндия)

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар, Россия)

Проблемы масштабирования – использование спутниковых снимков

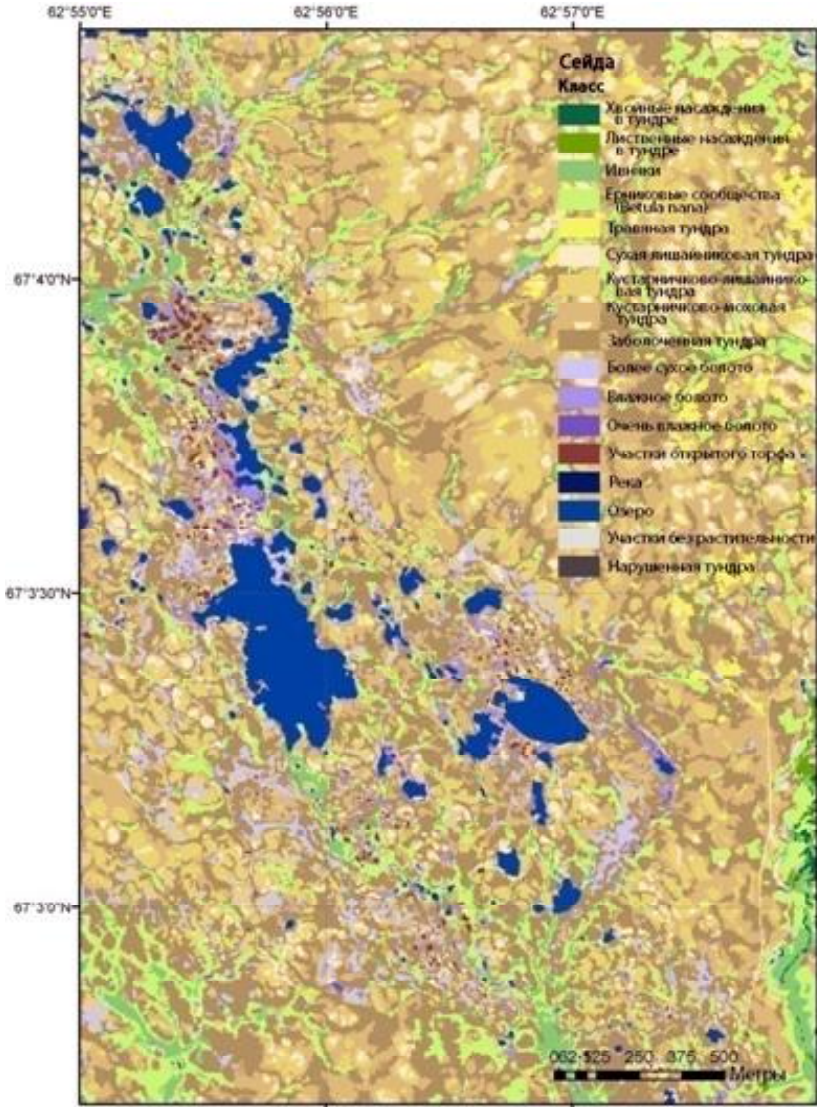
Когда мы ставили перед собой задачу понимания и оценки процессов на ландшафтном уровне, одним из ключевых вопросов была генерализация полевых данных, полученных на одном из модельных участков, до уровня ландшафта. Все необходимые данные для такого масштабирования содержатся в спутниковых снимках. Если мы измерим показатели в различных типах растительности (например, потоки парниковых газов или содержание углерода в почве) и при помощи спутниковых снимков определим, в каких пропорциях эти типы растительности представлены в регионе, то можно будет суммировать результаты. На основании анализа космоснимков также можно картировать другие показатели экосистем, например, биомассу растений и индекс листовой поверхности.

Мы классифицировали ландшафт, применяя снимки разного разрешения, от 2.4 м в пикселе Quickbird, через 15 м снимки Aster, к снимкам Landsat с 30 м разрешением. Использовали также снимки MODIS с 500 м пикселями. По сравнению со всеми остальными растительными зонами Земли растительные сообщества в тундре наиболее фрагментированы. Пример классификации земной поверхности очень высокого разрешения для модельного участка в тундре в окрестностях пос. Сейда показывает основные классы растительности и мелкую ландшафтную мозаику, которую они формируют.

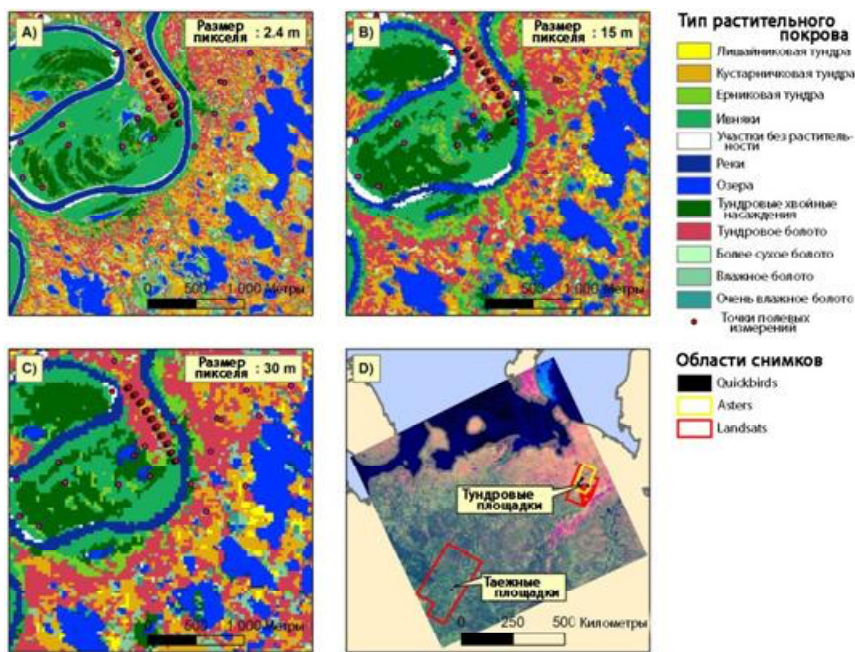
С уменьшением разрешения теряется детальная информация о структуре ландшафта. Число распознаваемых отдельных растительных сообществ на 2.4 м снимках может быть более чем в 10 раз выше, чем при 30 м классификации, а при размере пикселя 500 м отдельные реально существующие участки растительности выделить невозможно. С другой стороны, при очень высоком разрешении можно исследовать только очень небольшие области из-за ограниченной доступности снимков и вычислительной мощности компьютеров.

Обычно в исследованиях динамических процессов в тундровых экосистемах очень детальные ландшафтные схемы игнорировались. Наша классификация земного покрова при разных разрешениях дает возможность оценить, какое количество ин-

формации о ландшафтах мы теряем при использовании снимков более низкого разрешения вместо более точных снимков, и оказывают ли эти различия влияние на масштабирование запасов и потоков углерода.



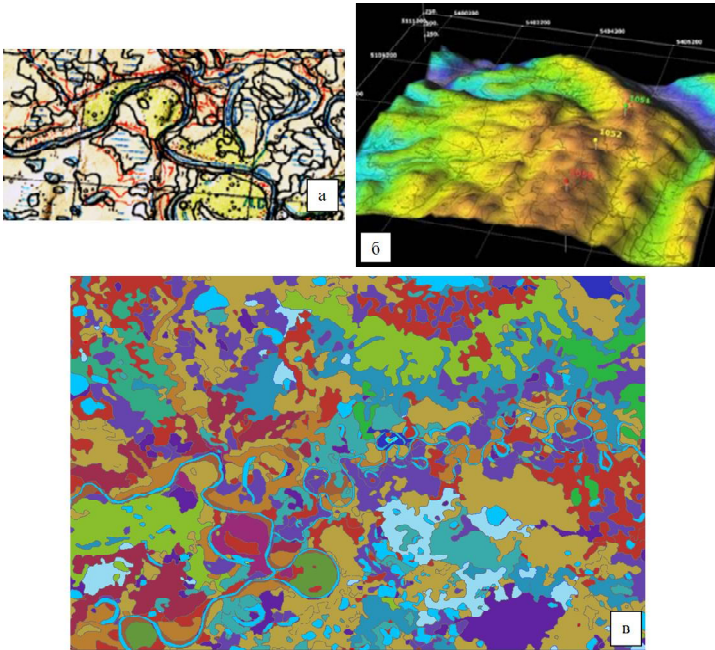
Классификация земной поверхности на основе снимка Quickbird для района Сейды. Источник: Университет Хельсинки.



Изображения ландшафтной классификации при работе со снимками разного разрешения для участка среднего течения р. Роговая: А – Quickbird; В – Aster; С – Landsat; D – размер площади классификации при разных разрешениях, на заднем фоне 500 м снимок MODIS, показывающий район исследований проекта «CARBO-North». Источник: Университет Хельсинки.

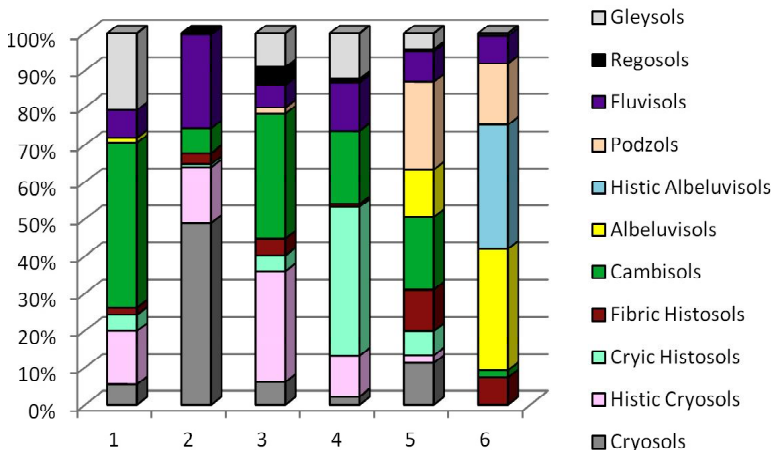
Кроме того, на основе дешифрирования космоснимков различного разрешения (Landsat, Quickbird) были подготовлены векторные почвенные карты для шести ключевых участков, показывающих ландшафты с различным характером распространения многолетнемерзлых пород: сплошная (Верхняя Роговая), несплошная (Сейда с карстовыми депрессиями), островная (Средняя Роговая, Нижняя Роговая, Хоседа), преимущественно талые грунты (Ляли). Атрибутивная информация слоев включает типы почв в классификации почв мировой коррелятивной базы почвенных ресурсов (World reference base..., 2006) и их площади.

На основе полученных карт на каждом ключевом участке были рассчитаны площади, занимаемые различными типами почв. В результате установлено, что в зоне распространения островной мерзлоты (участки средней и нижней Роговой) так же, как и на территории распространения сплошной мерзлоты (участок верхняя Роговая), значительные площади занимают мерзлотные почвы (Histic Cryosol, Cryic Histosol), характеризующиеся залеганием



Фрагмент почвенной карты (в) для ключевого участка верхняя Роговая, построенной на основе дешифрирования космоснимков с учетом топографических данных (а) и цифровой модели рельефа (б), предоставленной Университетом Хельсинки, Финляндия. Источник: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН.

многолетнемерзлых пород в пределах метровой толщи профиля почвы. Это обусловлено относительно плоским рельефом водоразделов в пределах данных ключевых участков и их значительной заболоченностью. Выявлено, что немерзлотные почвы (с глубиной залегания ММП за пределами метровой толщи профиля почв) и почвы с заглубленной кровлей мерзлоты приурочены преимущественно к дренированным водоразделам, речным долинам, локальным понижениям и подветренным склонам. Под редколесьями и высокой кустарниковой растительностью развиты преимущественно слабодифференцированные и глеевые почвы (Cambisols, Gleysols). Под лесной растительностью в зоне лесотундры и тайге распространены оподзоленные типы почв (Albeluvisols). По результатам полевых и химико-аналитических исследований подготовлена база данных основных типов почв ключевых участков. Полученные карты и база данных послужили основой для моделирования и прогноза возможного изменения компонентов наземных экосистем северных широт в условиях меняющегося климата.



Распределение основных типов почв на ключевых участках с различным распространением многолетнемерзлых пород: 1 – верхняя Роговая; 2 – Сейда, 3 – средняя Роговая, 4 – нижняя Роговая, 5 – Хоседа, 6 – Ляли. Источник: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН.

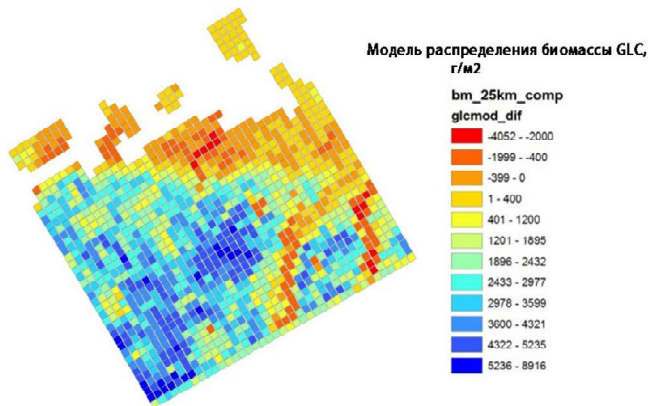
Университет Лунда (Швеция)

Моделирование будущего углеродного баланса на европейском Северо-Востоке России

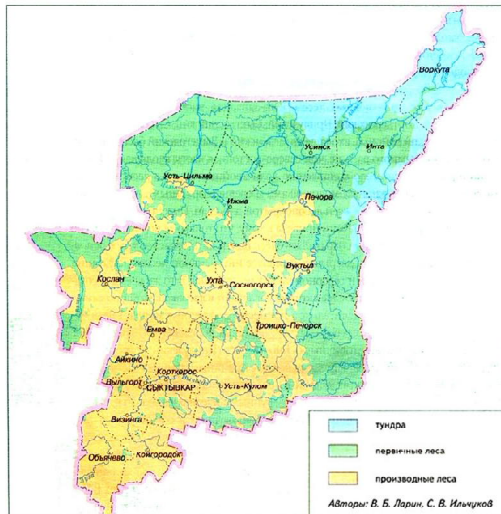
Разнообразие природы региона «CARBO-North», расположенного на европейском Северо-Востоке России, делает прогнозирование будущего углеродного баланса этой территории сложной задачей. Сомкнутые темнохвойные леса (тайга) на юге региона сменяются к северу лиственными деревьями тундрами с обширными областями многолетнемерзлых пород. Огромные площади заняты водно-болотными угодьями с высоким содержанием углерода и уникальной растительностью. Дополнительную сложность проблеме придает лесная промышленность на юге и добыча полезных ископаемых на севере.

Для достижения поставленных задач мы разработали и применили динамическую экосистемную модель LPJ-GUESS, которая моделирует динамику популяций деревьев, распределение растительности, экосистемные запасы и потоки углерода в ответ на изменения климата, в то время как данные о нарушенности экосистем, видовой конкуренции и как биофизических, так и физиологических процессах (например, фотосинтез) представляются механистически. Однако перед применением модели для региона «CARBO-North» ее необходимо было улучшить по разным на-

правлениям. Для того, чтобы правильно учесть современную границу леса в Арктике, нам пришлось настроить биоклиматический оптимум для древесных пород. Также для учета влияния лесной промышленности в регионе нужно увеличить значимость фактора нарушенности лесов. Необходимые материалы предоставлены Университетом Хельсинки. Была улучшена обработка данных о замерзшем грунте и многолетнемерзлых породах, также добавлена механистическая трактовка уникальной гидрологии и динамики углерода (включая как углекислый газ CO_2 , так и метан CH_4) в водно-болотных угодьях. Кроме того, в обрабатываемый моделью набор растительных единиц добавлен новый вид кустарничков и новый тип тундровой растительности.



Относительно невысокие значения биомассы лесов (полученные по разнице между данными Global Land Cover и спектрального анализа Modis) в южной и центральной частях региона (голубые ячейки на рисунке слева) соответствуют областям экстенсивной вырубке лесов (коричневые участки – справа). Источник: Университет Хельсинки.



Исходные данные, требуемые для модели, например, температура, уровень осадков и коротковолновая радиация, были предоставлены другими исполнителями проекта и включали в себя результаты фактических наблюдений с 1901 по 2000 г., а также 100-летние климатические прогнозы изменения этих показателей до 2100 г. Показано, что к 2100 г. в регионе ожидается более теплый, влажный климат, среднегодовая температура увеличится примерно на 6 °С. После этого с использованием данных о состоянии климата в 2090–2099 гг. модель была запущена для следующего 200-летнего промежутка для того, чтобы состояние растительного покрова и пула углерода достигло равновесия с новыми условиями окружающей среды. Модель прогоняли отдельно для водно-болотных и возвышенных участков, а результаты комбинировали для представления об общих углеродных запасах и потоках в растительном и почвенном покрове региона.

Расчеты модели для современных условий могут быть оценены с использованием результатов, полученных другими участниками проекта. Смоделированные показатели биомассы, потоков углерода и температуры почв на приемлемом уровне совпали с реально наблюдаемыми показателями, так же как и модель северной границы леса в регионе. Это совпадение свидетельствует о возможности с достаточной уверенностью прогнозировать будущее. LPJ-GUESS предсказывает, что изменения климата могут вызвать значительные подвижки северной границы леса в регионе «CARBO-North» и увеличение биомассы деревьев. Оба процесса обеспечат в будущем отток CO₂ из атмосферы. Граница леса к концу XXI в. может достигнуть побережья Северного Ледовитого океана, а биомасса деревьев в современной тайге – увеличиться на 10–30%.

Углеродные аномалии, охватывающие весь регион «CARBO-North», были рассчитаны с использованием LPJ-GUESS для периода с 1901 по 2300 г. с учетом вышеописанных воздействий на климат и доработок модели. Обнаружено, что будущее состояние углеродного баланса (включая изменения почвенного углерода) чувствительны к допущениям, сделанным в модели. Результаты прогонов модели с включенными факторами задержки миграции леса (которая не учитывается в стандартной версии LPJ-GUESS), усиления степени нарушения лесного покрова, вариабельности периодов аккумуляции и разложения почвенного углерода в торфяниках были скомбинированы и использованы для создания серии из 12 сценариев будущего развития углеродного баланса региона в целом. Эти данные являются одним из важнейших результатов проекта «CARBO-North» и уже были представлены в данной работе. Ожидается, что в ответ на изменения климата регион будет терять углерод в течение этого столетия и да-

лее. Его точное количество наиболее чувствительно к интенсивности продвижения леса, однако также характеризуется чувствительностью по отношению к степени и природе нарушений естественной среды и точности определения скорости разложения почвенного органического вещества в водно-болотных экосистемах. Наиболее реалистичный сценарий показывает уменьшение запасов углерода на 2 кг м^{-2} , что примерно эквивалентно 5–7% общего регионального пула углерода к 2090 г. Это снижение в основном связано с увеличением темпов разложения почвенного углерода. Далее такие потери будут происходить еще как минимум в течение одного столетия (2 кг С м^{-2} редукция к 2190 г.) несмотря на ожидаемую стабилизацию климата.

Метеорологическая служба (Великобритания, Эксетер)

Влияние продвижения верхней границы леса на изменение климата будущего

В регионе исследований проекта «CARBO-North» более теплая температура может вызвать распространение лесов (тайги) в районы, которые в настоящее время заняты открытой растительностью (тундра). Это может вызвать ускорение темпов накопления углерода в растительной биомассе и оказать охлаждающий эффект на глобальный климат. Однако в заснеженных ландшафтах распространение лесов может вызвать локальные потепления климата, поскольку участки леса темнее снежного покрова и поглощают больше радиации. Такое изменение отражательной способности земной поверхности, или альbedo, в связи с разительным контрастом между низким альbedo темных облесенных ландшафтов и высоким альbedo более светлых открытых ландшафтов является ключевым вопросом в высоких широтах.

Цель в рамках проекта «CARBO-North» – оценка роли изменений растительности в изменении климата северной Евразии.

Наш прототип планетарной модели HadCM3C учитывает растительность и круговорот углерода как полностью интерактивную часть климатической системы. Растительность взаимодействует с климатом как через углеродный цикл, так и оказывая влияние на поверхностный энергетический бюджет, например, через изменения альbedo. Мы использовали HadCM3C для того, чтобы оценить влияние экосистемных изменений на климат северной Евразии (а также на глобальный климат) в течение последних десятилетий и в будущем. Это влияние заключается в изменении баланса парниковых газов и альbedo поверхности Земли. Модель HadCM3C запускали при четырех разных сценариях,



Участки лесов намного темнее и поглощают больше солнечной энергии, чем покрытая снегом тундра. Они поглощают большие количества солнечной энергии даже когда кроны деревьев полностью покрыты снегом из-за того, что солнечная радиация рассеивается между деревьями (© В. Пономарев).

основанных на сценарии средней эмиссии парниковых газов (IPCC A1B) и сценарии, при котором концентрации парниковых газов остаются неизменными с 2020 г., что стабилизирует изменения климата на уровне 2°C (2C20). Все расчеты использовали результаты измеренной эмиссии парниковых газов, наблюдаемые с 1990 г. Были завершены две пары серий расчетов, каждая в условиях свободной реакции растительности на изменения климата и в условиях фиксированного на начальном уровне состояния растительного покрова:

A1B Средний сценарий (1860–2100 гг.)

Интерактивная растительность

Фиксированное (1860 г.) состояние растительного покрова

2C20 Стабилизационный сценарий (2020–2100 гг.)

Интерактивная растительность

Фиксированное (2020 г.) состояние растительного покрова

Результаты моделирования климата с интерактивной растительностью показывают, что рост глобальных средних температур при сценарии развития парникового эффекта A1B достигнет 5.2°C к 2080 г. (по сравнению с 1870 г.), что превышает уровень

увеличения на 5 °С, показанный ЕСНАМ (использовали в региональной климатической модели) с применением того же сценария. Это может быть отчасти связано с углеродным циклом в HadCM3C – потепление климата вызывает высвобождение диоксида углерода из почв и растительности в глобальных масштабах, что приводит к дальнейшему потеплению (позитивная обратная связь).

Глобальные изменения температуры к 2080 г. при сценарии стабилизации климата 2C20 с интерактивной растительностью также превышают значение 1.9 °С, показанное с использованием ЕСНАМ, достигая 2.3 °С. При обоих сценариях глобальное увеличение температуры к 2080 г. оказалось меньшим при фиксированном состоянии растительного покрова, чем при расчетах, учитывающих динамику экосистем: 4.9 и 2.2 °С для А1В и 2C20 соответственно. Таким образом, вклад изменений растительности составляет 0.3 и 0.1 °С изменения глобальной температуры при сценариях А1В и 2C20 соответственно.

Гораздо более значительными оказались изменения температуры к 2080 г. непосредственно для региона «CARBO-North»: 9.4 и 4.1 °С с интерактивной растительностью (А1В и 2C20 соответственно), 8.9 и 3.5 °С без учета изменений экосистем (А1В и 2C20 соответственно). Данные показывают, что вклад изменения экосистем составляет 0.5 и 0.6 °С регионального потепления к 2080 г. при сценариях А1В и 2C20 соответственно. Хотя площадь лесов в регионе увеличивалась при обоих сценариях, прогнозируемое продвижение границы леса на север было относительно небольшим – менее 50 км более чем за два столетия между 1870 и 2080 гг.

Распространение результатов

Важной составляющей проекта «CARBO-North» представляется деятельность по распространению и пропаганде результатов. С целью повышения информированности общества о значении влияния глобального потепления и нарушений целостности окружающей среды на чувствительные экосистемы «далекого и морозного русского Севера», которые, несомненно, имеют глобальные последствия с точки зрения прогнозирования будущего климата и политических решений, в проект были вовлечены два малых предприятия – по одному в Великобритании и России.

На старте проекта изданы брошюры о его целях и задачах на английском и русском языках. Важным наследием нашей работы является вебсайт <http://www.carbonorth.net>, который функционирует также на двух языках. На сайте в соответствии с приглашением, подписанным участниками проекта, размещены базы

данных полученных результатов. Эти данные станут доступны всем желающим через три года после окончания проекта. Настоящая работа, которая издана на английском и русском языках, ставит перед собой целью донести некоторые из важнейших результатов проекта «CARBO-North» не только до специалистов, но и до более широкой аудитории.

Благодарности

Мы хотели бы выразить искреннюю благодарность внешнему консультанту проекта доктору Дэйву МакГиру (Dave McGuire, Фэрбенкс, США). Он принял участие во всех рабочих встречах участников проекта, исключая стартовое совещание в Стокгольме в 2007 г. (на котором он и был выбран консультантом). Все это время доктор МакГир внимательно следил за ходом проекта, оказывал содействие в решении текущих проблем, обращая особое внимание на необходимости интеграции и итерации в обмене информацией между участниками, собирающими полевой материал, и теми, кто проводил моделирование. Координатор проекта и коллектив в целом очень благодарны доктору МакГиру за его заинтересованность проектом, участие в совещаниях и ценные и важные пояснения.

Список публикаций

Andersson, R. A., Kuhry, P., Meyers, P., Zebuhr, Y., Crill, P. and Morth, M., 2011. Impacts of paleohydrological changes on n-alkane biomarker compositions of a Holocene peat sequence in the eastern European Russian Arctic. *Organic Geochemistry*, 42 (9): 1065-1075. Doi:10.1016/j.orggeochem.2011.06.020.

Andersson, R. A., Meyers, P., Hornibrook, E., Kuhry, P. and Morth, M. Elemental and isotopic carbon and nitrogen records of organic matter accumulation in a Holocene permafrost peat sequence in the East European Russian Arctic. Submitted to *Journal of Quaternary Science*.

Falloon, P. D., Jones, C. D., Ades, M. and Paul, K., 2011. Direct soil moisture controls of future global soil carbon changes; an important source of uncertainty. *Global Biogeochemical Cycles*, 25, GB3010, doi:10.1029/2010GB003938.

Gazovic, M., Kutzbach, L., Schreiber, P., Wille, C. and Wilmking, M., 2010. Diurnal dynamics of CH₄ from a boreal peatland during snowmelt. *Tellus B*, 62: 133–139. Doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00455.x.

Hugelius, G. and Kuhry, P., 2009. Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil carbon in a permafrost environment. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB3006, doi:10.1029/2008GB003419.

Hugelius, G., Virtanen, T., Kaverin, D., Pastukhov, A., Rivkin, F., Marchenko, S., Romanovsky, V. and Kuhry, P., 2011. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences*, 116, G03024, doi:10.1029/2010JG001606.

Hugelius, G., Routh, J., Kuhry, P. and Crill, P. Mapping the degree of decomposition of soil organic matter in discontinuous permafrost terrain. Submitted to *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences*.

Hugelius, G. Upscaling point observations using remotely sensed data: an uncertainty analysis for estimates of soil organic carbon storage in permafrost terrain. Submitted to *Global Biogeochemical Cycles*.

Jones, V. J., Solovieva, N., Self, A., McGowan, S., Rosen, P., Salonen, J. S., Seppa, H., Valiranta, M., Parrot, E. and Brooks, S. J., 2011. The influence of Holocene tree-line advance and retreat on an Arctic lake ecosystem: a multi-proxy study from Kharinei Lake, North Eastern European Russia. *Journal of Paleolimnology*, 46: 123-147. Doi: 10.1007/s.10933-011-95287.

Kiepe, I., Friborg, T., Marushchak, M. and Soegaard, H. Temperature response of leaf photosynthetic and respiratory characteristics of arctic species in a Russian tundra ecosystem. Submitted to *Polar Research*.

Kiepe, I. and Soegaard H. Modeling canopy CO₂ exchange between the land and atmosphere in the European Russian Arctic. Submitted to *Arctic, Antarctic and Alpine Research*.

Leavitt, P. R., Fritz, S. C., Anderson, N. J., Baker, P. A., Blenckner, T., Bunting, L., Catalan, J., Conley, D. J., Hobbs, W., Jeppesen, E., Korhola, A., McGowan, S., Ruhland, K., Rusak, J. A., Simpson, G., Solovieva, N. and Werne, J., 2009. Paleolimnological evidence of the effects on lakes of energy and mass transfer from climate and humans. *Limnology and Oceanography*, 54(2): 2330-2348.

Marushchak, M. E., Pitkamaki, A., Koponen, H., Biasi, C., Seppala, M. and Martikainen, P. J., 2011. Hot-spots for N₂O emissions found in different types of permafrost peatlands. *Global Change Biology*, 17: 2601-2614. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2911.02442.x.

Matthes, H., Rinke, A. and Dethloff, K., 2009. Variability of observed temperature-derived climate indices in the Arctic. *Global and Planetary Change*, 69: 214-24. Doi:10.1016/j.gloplacha.2009.10.004.

Matthes, H., Rinke, A. and Dethloff, K., 2010. Variability of extreme temperature in the arctic - observation and RCM, *Open Atmospheric Sciences Journal*, 4: 126-136. Doi:10.2174/1874282301004010126.

Matthes, H., Rinke, A., Miller, P. A., Kuhry, P., Dethloff, K. and Wolf, A., 2011. Sensitivity of high-resolution Arctic regional climate model projections to different implementations of land surface processes. *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-011-0138-1.

Mazhitova, G. G. and Kaverin, D. A., 2007. Thaw depth dynamics and soil surface subsidence at a Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) site, the European North of Russia, *Earth Cryosphere*, XI(4): 20-30.

Mazhitova, G. G., 2008. Soil temperature regimes in the discontinuous permafrost zone in the East European Russian Arctic. *Eurasian Soil Science*, 41(1): 48-62.

Oosterwoud, M. R., Temminghoff, E. J. M. and van der Zee, S., 2010. Quantification of DOC concentrations in relation with soil properties of soils in tundra and taiga of Northern European Russia, *Biogeosciences Discussions*, 7: 3189-3226. Doi: 10.5194/bgd-7-3189-2010.

Pluchon, N., Hugelius G., Kuusinen, N. J. and Kuhry, P. Recent paludification rates and effects on total ecosystem carbon storage in two boreal peatlands of Northeast European Russia. Submitted to *The Holocene*.

Repo, M. E., Susiluoto, S., Lind, S. E., Jokinen, S., Elsakov, V., Biasi, C., Virtanen, T. and Martikainen, P. J., 2009. Large N₂O emissions from cryoturbated peat soil in tundra. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NNGEO434.

Rinke, A. and Dethloff, K., 2008. Simulated circum-Arctic climate changes by the end of the 21st century. *Global and Planetary Change*, 62: 173-186. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.01.004.

Rinke, A., Kuhry, P. and Dethloff, K., 2008. Importance of a soil organic layer for Arctic climate: a sensitivity study with an Arctic RCM. *Geophysical Research Letters*, 35, L13709, doi:10.1029/2008GL034052.

Rinke, A., Melsheimer, C., Dethloff, K. and Heygster, G., 2009. Arctic total water vapor: Comparison of regional climate simulations with observations, and simulated decadal trends. *Journal of Hydrometeorology*, 20: 113-129, doi:10.1175/2008JHM970.1.

Rinke, A., Matthes, H. and Dethloff, K., 2010. Regional characteristics of Arctic temperature variability: Comparison of regional climate simulations with observations. *Climate Research*, 41: 177-192. Doi: 10.3354/cr00854.

Rinke, A., Matthes, H., Christensen, J. H., Kuhry P., Romanovsky, V. E. and Dethloff, K., 2012. Arctic RCM simulations of temperature and precipitation derived indices relevant to future frozen ground conditions. *Global and Planetary Change*, Doi:10.1016/j.gloplacha.2011.10.

Salonen, J. S., Seppa, H., Valiranta, M., Jones, V. J., Self, A., Heikkila, M., Kultti, S. and Yang, H., 2011. Holocene thermal maximum and the late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia. *Quaternary Research*, 75: 501-511.

Salonen, J. S., Ilvonen, L., Seppa, H., Holmstrom, L., Telford, R. J., Gaudamavicius, A., Stancikaite, M. and Subetto, D., 2012. Inverse multivariate regression (WA and WA-PLS) and Bayesian modeling: comparing two transfer function techniques for quantitative palaeoclimate reconstruction. *The Holocene* (in press).

Schneider, J., Kutzbach, L. and Wilmking, M. Carbon dioxide exchange fluxes of a boreal peatland over a complete growing season, Komi Republic, NW Russia. *Biogeochemistry*, doi: 10.1007/s10533-011-9684-x.

Schneider, J., Gazovic, M., Kutzbach, L., Forbrich, I., Wu, J., Wania, R., Miller, P. A., Susiluoto, S., Virtanen, T., Zagirova, S. and Wilmking, M. Boreal peatland net ecosystem CO₂ exchange – an integrative comparison between measured fluxes and LPJ-GUESS model output. Submitted to *Journal of Geophysical Research*.

Self, A. E., Brooks, S. J., Birks, H. J. B., Nazarova, L., Porinchu, D., Odland, A., Yang, H. and Jones, V. J., 2011. The distribution of chironomids in high-latitude Eurasian lakes with respect to temperature and continentality: development and application of new chironomid-based climate-inference models in northern Russia. *Quaternary Science Reviews*, 30: 1122-1141.

Sjoberg, Y., Hugelius, G. and Kuhry, P. Thermokarst lake morphometrics and erosion in two peat plateau areas of Northeastern European Russia. Resubmitted after review to *Permafrost and Periglacial Processes*.

Virtanen, T., Kuusinen, N. and Lopatin, E. Vegetation biomass and carbon storage in forest ecosystems in Komi, Russia: how accurate are the regional estimates? Submitted to *European Journal of Forest Research*.

Valiranta, M., Kaakinen, A., Kuhry, P., Kultti, S., Salonen, J. S. and Seppa, H., 2011. Scattered late-glacial and early Holocene tree populations as dispersal nuclei for forest development in Northeast European Russia. *Journal of Biogeography*, 38: 922-932. Doi:10.1111/j.1365-2699.2010.02448.x.