



Hanna K. Lappalainen
Markku Kulmala
Sergej Zilitinkevich
Editors

**PAN-EURASIAN
EXPERIMENT
PEEX
SCIENCE PLAN**



ПАН-ЕВРАЗИЙСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
РЕЕХ

НАУЧНЫЙ ПЛАН

Редакторы

Hanna K. Lappalainen

Markku Kulmala

Sergej Zilitinkevich

Редакторы этого документа - Hanna K. Lappalainen, Markku Kulmala и Sergej Zilitinkevich.

Члены редколлегии - Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Theo Kurten, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Huadong Guo и Ella-Maria Duplissy.

Список соавторов представлен в Приложении-1. Содержание Научного плана PEEХ было выработано на основе научных результатов совещаний PEEХ, которые проводились в 2012-2014 в Хельсинки (2012), Москве (2013), Нуутиälä (2013), Пекине (2013) и Санкт-Петербурге (2014), а также на основании добавлений, полученных в ходе написания Научного плана.

Эту версию Научного плана можно скачать с сайта PEEХ. Бумажные копии можно заказать в штаб-квартире PEEХ, Программном офисе PEEХ в Хельсинки:

PEEX PROGRAM OFFICE
DEPARTMENT OF PHYSICS
DIVISION OF ATMOSPHERIC SCIENCES
P.O. BOX 64
FI-00014 UNIVERSITY OF HELSINKI
FINLAND

WEB: www.atm.helsinki.fi/peex

ISBN 978-951-51-0587-5 (printed)

ISBN 978-951-51-0588-2 (online)

COPYRIGHT © 2015

Фотографии на обложке: Ella-Maria Duplissy и Xie Yuning

Тематические фотографии и графический дизайн: Ella-Maria Duplissy, Hanna K. Lappalainen и Stephany Buenrostro Mazon

ПАН-ЕВРАЗИЙСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ (РЕЕХ)

Пан-Евразийский эксперимент (РЕЕХ) – это мультидисциплинарная, мультимасштабная программа, нацеленная на разрешение глобальных проблем в Северной Евразии и Китае, с особым вниманием на Арктику и бореальные регионы. РЕЕХ также будет оказывать содействие при создании служб и планов по адаптации и смягчению негативных последствий для сообществ с целью борьбы с глобальным изменением. Проект РЕЕХ инициирован рядом европейских, российских и китайских исследовательских организаций и институтов при сотрудничестве организаций и институтов из США и Канады. Подход РЕЕХ делает акцент на том, что решение проблем, связанных с изменением климата, качеством воздуха и изменением криосферы, требует крупномасштабного скоординированного сотрудничества международных научных сообществ. Активное участие и международное сотрудничество европейских, российских и китайских партнеров необходимо, чтобы решить проблему климатической политики: как будут северные сообщества справляться с изменениями окружающей среды? Инициаторами этого проекта стали Университет Хельсинки и Финский метеорологический институт от Финляндии; Географический факультет Московского государственного университета, НИИ «АЭРОКОСМОС» и Институт оптики атмосферы (Сибирское отделение РАН) от России; Институт дистанционного зондирования и цифровой Земли (RADI) Китайской академии наук (CAS) и Институт исследования климата и глобальных изменений Университета Нанкина от Китая. РЕЕХ строится на сотрудничестве европейских, российских и китайских участников с привлечением ученых из различных дисциплин, экспериментаторов и разработчиков моделей, а также международных научно-исследовательских проектов, финансируемых по европейским, российским и китайским программам. Первый активный этап РЕЕХ - это 2013-2033, хотя РЕЕХ будет продолжаться до 2100 года. Первое совещание РЕЕХ состоялось в Хельсинки в октябре 2012 года. РЕЕХ открыт для присоединения новых участников.

КОНЦЕПЦИЯ

Пан-Евразийский Эксперимент (РЕЕХ) является мультидисциплинарной, мультимасштабной научно-исследовательской инициативой, нацеленной на разрешение крупных неопределенностей в науке о системе Земли и проблем глобального устойчивого развития в арктических и бореальных регионах Евразии с учетом влияния Китая. Концепция РЕЕХ состоит в решении взаимосвязанных глобальных проблем, влияющих на благополучие человека и сообществ Северной Евразии и Китая, интегрирующим методом, признавая важность роли бореальных регионов и Арктики в контексте глобального изменения. В число исследуемых глобальных проблем входят, например, изменение климата, качество воздуха и питьевой воды, потеря биоразнообразия, химизация, обеспечение продовольствием и производство энергии.

Концепция РЕЕХ включает в себя создание и поддержание долгосрочной скоординированной научной и образовательной деятельности, а также исследовательской инфраструктуры РЕЕХ. РЕЕХ намерен сделать вклад в научную повестку системы Земли и климатическую политику по темам важным для окружающей среды и предоставить стратегии адаптации и снижения негативных последствий для сообществ Северной Евразии и Китая, особенно, в отношении изменения климата и качества воздуха.

МИССИЯ

Стать исследовательской инициативой следующего поколения в области естественных и социально-экономических наук с четко определенным воздействием на будущее экологическое, социально-экономическое и демографическое развитие арктических и бореальных регионов, а также Китая. Стать научным сообществом, строящим инновационную инфраструктуру в регионе Северной Евразии и в Китае.

ВВЕДЕНИЕ

Исходная идея Пан-Евразийского эксперимента (PEEX) была представлена в 2011 году в статье под названием "Об измерениях аэрозольных частиц и парниковых газов в Сибири и необходимость будущих исследований", опубликованной в Boreal Environment Research Маркку Кулмала и соавторами. Эта статья давала общее представление о деятельности по наблюдению аэрозолей и парниковых газов в Сибирском регионе и обращалась к важности динамики суша-атмосфера сибирских бореальных лесов для климатической системы. Идея Пан-Сибирского эксперимента (PSE) заключалась в организации программы измерения аэрозолей, парниковых газов и биогенных летучих органических соединений (BVOC) и создании скоординированной сети наблюдений от Скандинавии до Китая совместно с научной программой, нацеленной на понимание процессов на разделе суша-атмосфера. Вскоре идея PSE была расширена до географического домена Северной Пан-Евразии и получила новое название «Пан-Евразийский Эксперимент» (PEEX). Инициаторами идеи PEEX выступили профессор академии Маркку Кулмала из Университета Хельсинки, Отделение атмосферных наук (ATM) и профессор Сергей Зилитинкевич из Финского метеорологического института и Университета Нижнего Новгорода.

Первое совещание по Пан-Евразийскому Эксперименту (PEEX) было организовано 2-4 октября 2012 года Университетом Хельсинки (ATM) и Финским метеорологическим институтом. Оно собрало около 100 участников из Европы, России и Китая. На основе представленных на совещании докладов и обсуждений в рабочих группах были сформированы исследовательские запросы и самые актуальные научные проблемы Пан-Евразийского региона, также был составлен первый проект Научного плана PEEX. Был начат Подготовительный этап PEEX. В комитет по его реализации вошли институты-инициаторы проекта: Университет Хельсинки, Финский метеорологический институт, Московский государственный университет, НИИ «АЭРОКОСМОС» и Институт оптики атмосферы (Сибирское отделение Российской академии наук). Было решено, что Программный офис предварительного этапа PEEX, который также должен выступать в качестве штаб-квартиры PEEX, будет учрежден в Хельсинки.

Вслед за первым совещанием PEEX в Хельсинки последовали еще четыре - в Москве (12-14 февраля 2013), в Нуутиälä, Финляндии (26-28 августа 2013), в Санкт-Петербурге (4-6 марта 2014), а также стартовое совещание PEEX-Китай в Пекине (ноябрь 2013), проведенное в Институте дистанционного зондирования и цифровой Земли (RADI) Китайской академии наук (CAS). RADI присоединился к комитету Подготовительного этапа PEEX и создал Китайский офис PEEX на своей базе. В рамках деятельности PEEX в Китае в Институте исследования климата и глобальных изменений Университета Нанкина был создан региональный офис PEEX. Эта организация давно

сотрудничает с Университетом Хельсинки в области разработок структуры атмосферных наблюдений in-situ в Китае.

Со времени первого совещания в Хельсинки научное сообщество РЕЕХ из Европы, России и Китая во многих отношениях внесло вклад в содержание Научного плана РЕЕХ, например, путем представления научных тем на совещаниях РЕЕХ, конкретных замечаний к Научному плану, редактирования существующего содержания и написания разделов по конкретным областям, представляющим интерес. Окончательный вариант Научного плана выпущен в феврале 2015, это было приурочено к 1-ой Научной конференции РЕЕХ и 5-ому совещанию РЕЕХ в Хельсинки. С этого момента проект РЕЕХ будет двигаться в сторону детального планирования реализации инфраструктуры РЕЕХ (согласованная сеть наблюдений in-situ, скоординированное использование дистанционного зондирования, системы данных и платформы моделирования). РЕЕХ продолжит заполнять пробелы в данных атмосферных наблюдений in-situ и наземного дистанционного зондирования в регионах Сибири и Дальнего Востока и начнет процесс по направлению к стандартизированным и гармонизированным процедурам обработки данных. Концепция будущей исследовательской инфраструктуры РЕЕХ будет нацелена на поиск синергии с основными европейскими инфраструктурами по наблюдению земля-атмосфера, такими как сети ICOS (Научно-исследовательская инфраструктура для расшифровки баланса парниковых газов в Европе и прилегающих регионах), ASTRIS (Инфраструктурная сеть по изучению аэрозолей, облаков и малых газовых компонент, 2011-2015), GAW (Глобальная служба атмосферы) и ANAEE (экспериментальное исследование наземных экосистем), а также с измерительными флагманскими станциями, такими как SMEAR (Станция для измерений взаимодействий экосистема-атмосфера).

С первых лет своей деятельности РЕЕХ сотрудничает с Международной Академией наук Евразии (IEAS), также он был представлен на нескольких конференциях и научных форумах, таких как: ISAR-3 (Токио, 2013), Future Earth (Париж, 2013), совещание секретариата Geo (Женева, 2013), заседание Изменение климата Северные Территории Арктика (Рейкьявик, 2013), ежегодная конференция EMS (Рединг, 2013), Партнерская конференция Геофизические обсерватории, многофункциональные ГИС и анализ данных (Калуга, 2013), LCES 2013 на Евро-азиатском Экономическом Форуме (Сиань, 2013), Сибирская конференция по аэрозолям (Томск, 2013), EGU (Вена, 2013, 2014), Саммит по наблюдениям Арктики (2014), 4-ая научная конференция iLEAPS (Нанкин, 2014), конференция GEIA (Боулдер, 2014) и конференция по дистанционному зондированию SPIE (Амстердам, 2014).

Содержание

АННОТАЦИЯ

РАСШИРЕННАЯ АННОТАЦИЯ

1 ЦЕЛИ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

2 МОТИВАЦИЯ РЕЕХ

3 ПОВЕСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЕХ (F1)

3.1 КРУПНОМАСШТАБНАЯ СХЕМА И ВОПРОСЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНОГО РЕГИОНА

3.2 КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ВОПРОСЫ И КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ

3.3 АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНАЯ СИСТЕМА СУШИ - КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ

3.3.1 Изменяющиеся процессы экосистемы суши

3.3.2 Структурные изменения и устойчивость экосистем

3.3.3 Территории с риском таяния многолетней мерзлоты

3.4 АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНАЯ АТМОСФЕРНАЯ СИСТЕМА – КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ

3.4.1 Химия и состав атмосферы

3.4.2 Качество воздуха в городах, мегаполисы и характеристики пограничного слоя

3.4.3 Погода и атмосферная циркуляция

3.5 АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНАЯ ВОДНАЯ СИСТЕМА – КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ

3.5.1 Северный ледовитый океан в системе климата

3.5.2 Морские экосистемы Арктики

3.5.3 Озера и крупные речные системы в сибирском регионе

3.6 СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА – КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ

3.6.1 Природные ресурсы и антропогенная деятельность

3.6.2 Опасные природные явления

3.6.3 Социальные трансформации и изменение климата

3.7 ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ, ВЗАИМОСВЯЗИ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

3.7.1 Гидрологический цикл

3.7.2 Углеродный цикл

3.7.3 Азотный цикл

3.7.4 Фосфорный цикл

3.7.5 Цикл серы

4. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РЕЕХ (F2)

4.1 ПРОЕКТНАЯ КОНЦЕПЦИЯ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

4.2 ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ РЕЕХ

4.2.1 Атмосферная компонента

4.2.2 Экосистемная компонента

4.2.3 Криосферная компонента

4.2.4 Компонента внутренних вод

4.2.5 Морская компонента

4.2.6 Прибрежная компонента

4.2.7 Дистанционные наблюдения

4.2.8 Системный анализ

4.3 ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, КОТОРАЯ ЯВЛЯЕТСЯ БАЗИСОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕЕХ

- 4.3.1 Скандинавия
- 4.3.2 Европа
- 4.3.3 Россия и в особенности Сибирь
- 4.3.4 Китай
- 4.3.5 Космический мониторинг
- 4.3.6 Дистанционное зондирование с помощью наземных средств
- 4.3.7 Морские наблюдения in-situ
- 4.3.8 Авиационные наблюдения
- 4.3.9 Лабораторные исследования

4.4 ГАРМОНИЗИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ ДАННЫХ

- 4.4.1 Общие продукты и форматы данных

4.5 ИНФРАСТРУКТУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА

- 4.5.1 Модели системы земли
- 4.5.2 Социально-экономические модели
- 4.5.3 Виртуальная исследовательская среда для поддержки региональных климатических и экологических исследований

5. ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕЕХ НА ОБЩЕСТВО (F3)

5.1 КЛИМАТ: СМЯГЧЕНИЕ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ И АДАПТАЦИЯ К НИМ

- 5.1.1 Смягчение негативных последствий и влияние на общество
- 5.1.2 Адаптация – ключевые аспекты

5.2 ВЫРАБОТКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ

5.3 ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НА ПОЛЬЗУ ОБЩЕСТВА

- 5.3.1 Распределение проверенных данных
- 5.3.2 Системы раннего предупреждения
- 5.3.3 Инновации и новые технологии

5.4 КАЧЕСТВО ВОЗДУХА В МЕГАПОЛИСАХ

6. ПЕРЕДАЧА ЗНАНИЙ (F4)

6.1 МЕЖДУНАРОДНЫМ ФОРУМАМ, ЛИЦАМ, ПРИНИМАЮЩИМ РЕШЕНИЯ И ГОСУДАРСТВЕННЫМ ВЛАСТЯМ

6.2 НАУЧНЫМ СООБЩЕСТВАМ И ЧАСТНОМУ СЕКТОРУ

6.3 ШИРОКОЙ ОБЩЕСТВЕННОСТИ

7. РЕАЛИЗАЦИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ-1 СОАВТОРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ-2 ИНСТИТУТЫ-УЧАСТНИКИ

ПРИЛОЖЕНИЕ-3 ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЕХ

ПРИЛОЖЕНИЕ-4 ССЫЛКИ

АННОТАЦИЯ

Пан-Евразийский Эксперимент (РЕЕХ) является мультидисциплинарной, мультимасштабной научно-исследовательской программой, нацеленной на разрешение крупных неопределенностей в науке о системе Земли и проблем глобального устойчивого развития в арктических и бореальных регионах Евразии, а также в Китае. Концепция РЕЕХ состоит в решении взаимосвязанных глобальных проблем, влияющих на благополучие человека и сообществ Северной Евразии и Китая. Эти проблемы включают изменение климата, качество воздуха, потерю биоразнообразия, химизацию, обеспечение продовольствием, а также использование природных ресурсов в горнодобыче, промышленности, производстве энергии и транспорте. Наш подход является интегрирующим и междисциплинарным, он признает важность арктических и бореальных экосистем в системе Земли. Концепция РЕЕХ включает в себя создание и поддержание долгосрочной скоординированной научно-исследовательской деятельности и научно-образовательной инфраструктуры.

Актуальность проекта РЕЕХ объясняется тем, что роль северных регионов будет возрастать относительно вопросов глобализации, изменения климата, демографии и использования природных ресурсов. Суша и океан, расположенные на 45°с.ш. и выше, претерпят значительные изменения в ближайшие 40 лет. Даже наиболее умеренные климатические сценарии предсказывают, что температура в северных высоких широтах к середине века поднимется на 1.5-2.5°C. Арктические и бореальные природные среды в Евразии будут очень важны для глобального климата посредством изменения альбедо, эмиссий и стоков углерода, эмиссий метана и образования аэрозолей через биогенные летучие органические соединения (BVOC). Помимо этого, экосистемы будут испытывать сильнейшие изменения, включая экспансию новых видов и вымирание существующих, что может иметь непредсказуемые последствия для пищевых сетей и первичной продуктивности различных растительных экосистем.

В РЕЕХ будет разрабатываться и использоваться интегрированная структура наблюдений и моделирования с целью определения различных климатообразующих факторов и механизмов обратной связи в северных регионах Земли, что обеспечит более надежные прогнозы по будущему региональному и глобальному климату. Так как последствия изменения климата для общества уже наблюдаются, и есть понимание важной роли арктических и бореальных регионов в этом контексте, РЕЕХ уделяет особое внимание необходимости проведения исследований следующего поколения и создания соответствующей инфраструктуры в этом регионе. РЕЕХ предоставит экспертные оценки проблем глобального изменения окружающей среды для выработки политических решений и стратегий снижения негативных последствий и адаптации для региона Северной Евразии.

РЕЕХ строится на взаимодействии европейских, российских и китайских партнеров. Проект открыт для расширения сотрудничества в будущем. В сообщество РЕЕХ войдут ученые различных дисциплин, финансирующие организации, представители правительственных структур и представители заинтересованных сторон от промышленности, транспорта, управления возобновляемыми природными ресурсами, сельского хозяйства и торговли, в результате чего будут организованы совместные исследования в регионе по аналогии с исследовательской инициативой “Future Earth”.

Программа РЕЕХ должна начать действовать с 2015 г. В ее рамках будет начато построение долгосрочной комплексной исследовательской инфраструктуры (RI) в Северной Евразии. Такая инфраструктура будет включать в себя наземные, морские, авиационные и спутниковые наблюдения, а также платформы мультимасштабного моделирования. Сфера РЕЕХ охватывает евразийскую бореальную зону и арктические регионы, включая Балтику, Северное море и Северный Ледовитый океан. В регион исследования РЕЕХ также входит Китай в виду своего значительного воздействия. Повестка исследования РЕЕХ сосредоточена на мультидисциплинарном понимании процессов системы Земли во всех соответствующих пространственных и временных масштабах от нано-масштаба до глобального уровня. Стратегическим направлением являются продолжительные передовые измерения в системе суша-атмосфера-океан в Северной Евразии, изучение взаимодействий и обратных связей, относящихся к урбанизации и мегагородам, а также обучение следующего поколения ученых и технических специалистов, способных решить крупномасштабные социально значимые научно-исследовательские вопросы региона.

Научные результаты РЕЕХ будут использованы для разработки новых климатических сценариев в глобальном и региональном масштабах, а также для служб, таких как системы раннего предупреждения в арктическо-бореальных регионах. Для обеспечения устойчивого будущего евразийского региона РЕЕХ намерен сделать вклад в научную повестку системы Земли и климатическую политику по темам, важным для окружающей среды и населения.

Предпосылки и мотивация

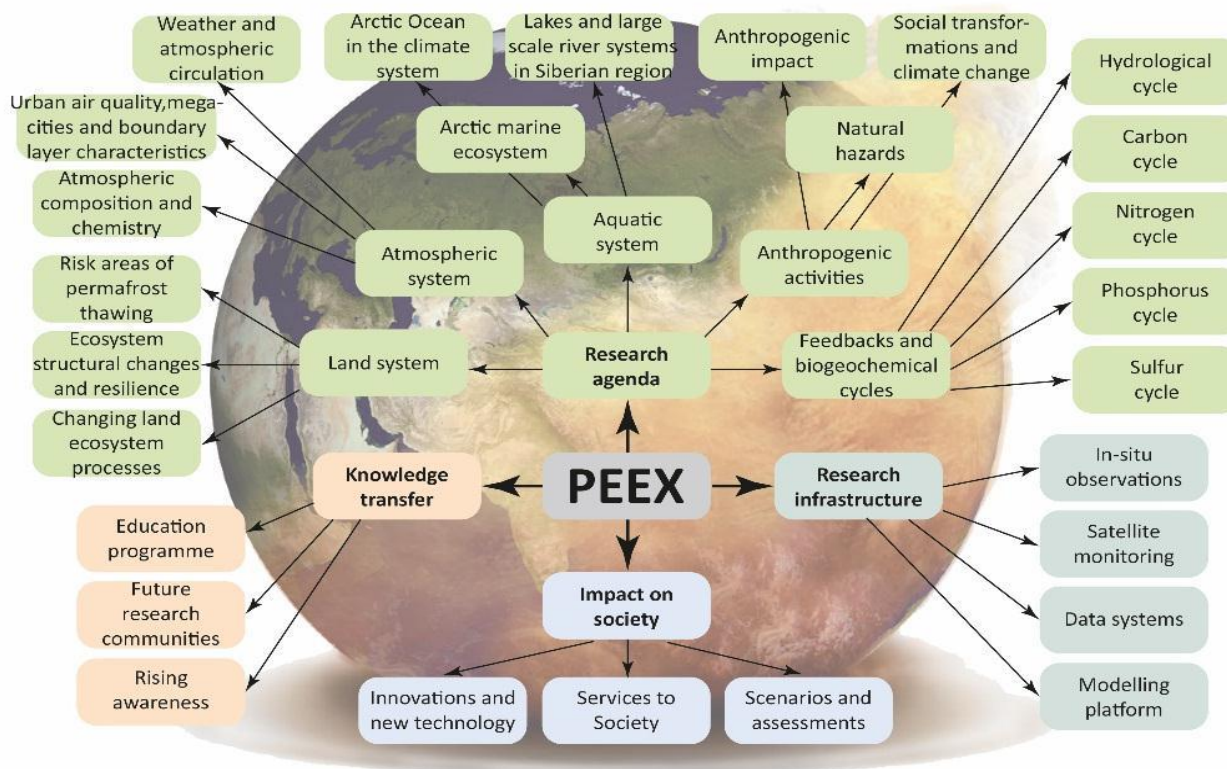


Рисунок 1 Схематическое изображение структуры PEEH.

Решение любой из глобальных проблем - таких как изменение климата, качество воздуха, закисление океана, обеспеченность чистой водой и продовольствием – требует многомасштабной, мультидисциплинарной программы исследований, связанной с ускоренной выработкой политических решений. Пан-Евразийский Эксперимент (PEEX) является мультидисциплинарной, многомасштабной инициативой, а также программой развития исследовательской инфраструктуры, сосредоточенной на Северной Евразии, в особенности, на Арктике и бореальных регионах, включая воздействия и влияние на Китай. Главная цель PEEH состоит в решении взаимосвязанных глобальных проблем, таких как изменение климата, качество воздуха, потеря биоразнообразия, химизация, обеспеченность продовольствием и питьевой водой и производство энергии. Решение должно носить интегративный характер и признавать возрастающую роль Арктики и северных биомов в контексте глобального изменения.

Актуальность проекта PEEH объясняется тем, что роль северных регионов будет возрастать относительно вопросов глобализации, изменения климата, демографии и использования природных ресурсов (Smith, 2010). Суша и океан, расположенные на 45°с.ш. и выше, претерпят значительные изменения в ближайшие 40 лет. Даже наиболее умеренные климатические сценарии предсказывают, что температура в северных высоких широтах к середине века поднимется на 1.5-2.5°C и на 3.5°C к концу столетия, что более чем вдвое больше по сравнению со средним глобальным потеплением (IPCC, 2013).

Арктические и бореальные природные среды в Евразии будут очень важны для глобального климата посредством изменения альбедо, эмиссий и стоков углерода, эмиссий метана и образования аэрозолей через биогенные летучие органические соединения (BVOC). Помимо этого, экосистемы будут испытывать сильнейшие изменения, включая экспансию новых видов и вымирание существующих, что может иметь непредсказуемые последствия для пищевых сетей и первичной продуктивности различных растительных экосистем.

Потепление климата изменяет динамику всей глобальной климатической системы, а также затрагивает взаимосвязанную систему трех других глобальных сил: демографических трендов, использования и потребности в природных ресурсах и глобализацию. Потепление будет влиять на демографические тренды в плане ускорения процесса урбанизации и увеличения миграции в северные регионы, будут также ускорены изменения социальных вопросов и качества воздуха. Одним из главных последствий потепления северных широт являются соответствующие изменения в криосфере, включая таяние многолетней мерзлоты и то, что Северный Ледовитый океан часть года будет свободен ото льда. Если Северный морской путь будет открыт для прохождения судов между Атлантикой и Дальним Востоком, значительно усилится торговая деятельность. Северные экосистемы и арктические регионы богаты залежами многих природных ресурсов, таких как нефть, природный газ и минералы, и их добыча может увеличиться, если инфраструктуры выдержат таяние многолетней мерзлоты.

Подход РЕЕХ подчеркивает сходящееся в одной точке понимание физических и социально-экономических процессов в системе Земли, особенно в изменяющихся естественных и урбанизированных (также в китайских мегаполисах) средах северных регионов (45°с.ш. и выше). Регион РЕЕХ охватывает большую часть соответствующих районов вечной мерзлоты и зоны бореальных лесов в северном полушарии, включая морские среды (рис.2).

Программная повестка разделена на четыре основных направления (1.Научная повестка, 2.Инфраструктура, 3.Воздействие на общество и 4.Передача знаний) (рисунок 1) и строится на научно-исследовательском сотрудничестве российских, китайских и европейских участников. Научная повестка определяет крупномасштабные ключевые темы и исследовательские вопросы для систем суши, атмосферы, водной и антропогенных систем в арктическо-бореальном контексте, а также вопросы взаимодействия мегаполис-климат и вопросы качества воздуха. Исследовательская инфраструктура вводит передовые наблюдения в Евразийском регионе и представляет базис для скоординированной научно-исследовательской инфраструктуры в регионе РЕЕХ. Воздействие на общество обращается к ключевым аспектам, связанным со стратегиями по смягчению последствий изменения климата и адаптации к ним. Сюда также включается планирование подготовки северных сообществ к экологическим изменениям, разработки надежных систем раннего предупреждения, а также учет роли новых технологий в осуществлении этих стратегий и планов. Передача знаний ориентирована на образовательные программы на нескольких уровнях, укрепление будущих научных сообществ и повышение осведомленности о глобальных изменениях и вопросах охраны окружающей среды. Научный план также вводит основные компоненты реализации научной повестки, а также проектирования и строительства научно-исследовательской инфраструктуры. Подробные описания планов реализации приведены в отдельных документах РЕЕХ.

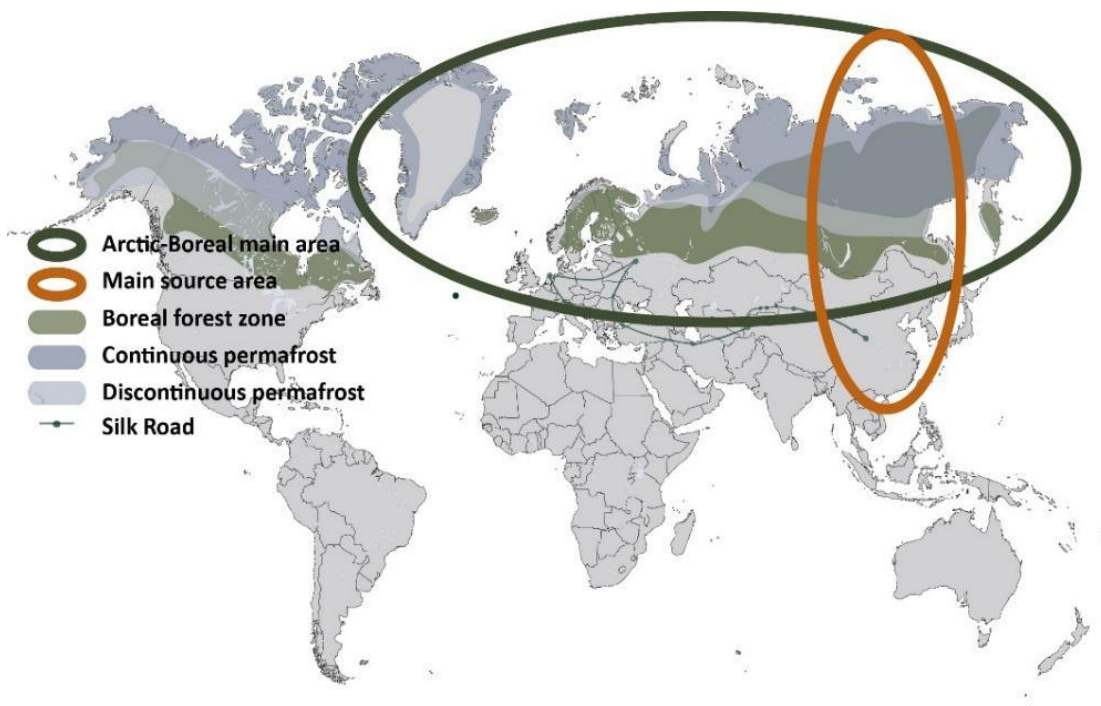


Рисунок 2 Географический регион РЕЕХ

Научная повестка РЕЕХ (Фокус-1)

Научная повестка РЕЕХ спроектирована в форме исследовательской цепочки, нацеленной на совершенствование нашего понимания взаимодействий в системе Земли, которая охватывает не только экосистемы атмосферы, суши и океана, но и антропогенную деятельность и сообщества, с помощью комплекса взаимосвязанных действий, начиная с молекулярного уровня и заканчивая региональным и глобальным. Нашей целью является понимание сложной системы суша-атмосфера-океан-общество в контексте Арктики, северной Евразии и Китая. РЕЕХ будет исследовать изменения и процессы, вызываемые следующими взаимосвязанными факторами: (i) радиационный прогрев, (ii) потепление Арктики, (iii) изменение криосферы, (iv) общество, деятельность человека и (v) обратные связи и взаимосвязи общества, климата и биосферы.

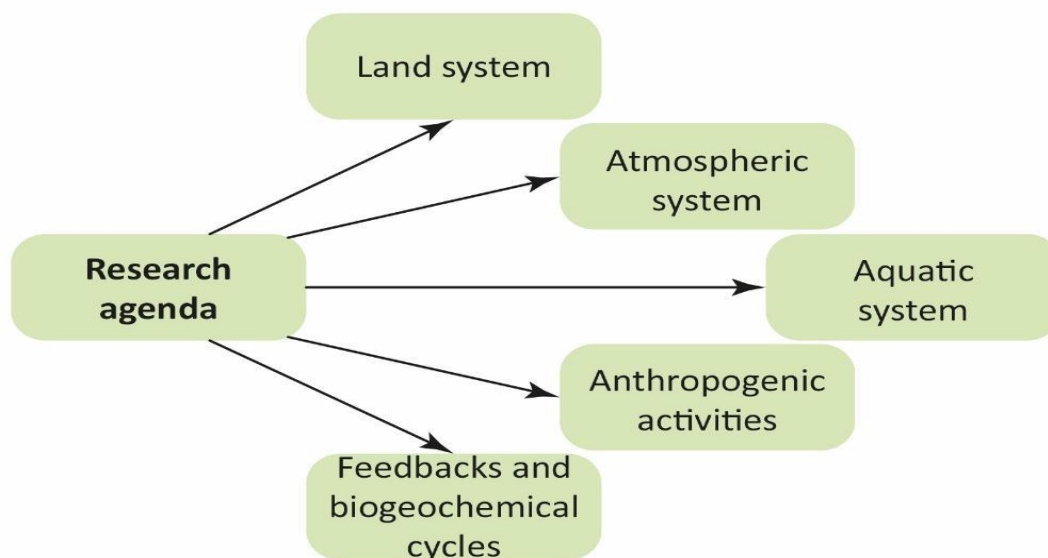


Рисунок 3 Подструктура Научной повестки РЕЕХ (F1).

Научная повестка РЕЕХ охватывают различные пространственные и временные масштабы и разнообразие географические регионы, включающие природные и урбанизированные среды. Четыре основные крупномасштабные системы, изучаемые РЕЕХ, – это суша, атмосфера, водная система и антропогенная деятельность (рис.3). Для каждой из основных систем мы вводим три ключевые темы и соответствующие им крупномасштабные исследовательские вопросы. В дополнение к четырем основным системам, программа исследований РЕЕХ обращается к обратным связям и взаимосвязям между системами и основными биогеохимическими циклами (вода, углерод, азот, фосфор, сера).

Научные результаты РЕЕХ восполняют недостаток знаний о процессах, обратных и прямых связях внутри основных компонент системы Земли и между ними, а также о биогеохимических циклах в арктическо-бореальном контексте. Сфера РЕЕХ охватывает широкий диапазон взаимодействий между человеком и природными системами, где человек рассматривается и как источник климатических и экологических изменений, и как реципиент их воздействий. Надежная информация и сценарии на ближайшие десятилетия очень важны для адаптации к воздействиям климата и криосферы в северных сообществах. Принятие решений относительно, например, землепользования и сжигания ископаемого топлива представлено агентным моделированием (ABM), моделями комплексной оценки (IAM) и климатическими сценариями, которые будут использоваться и получат дальнейшее развитие для северных регионов Евразии. В городских и промышленных регионах неотъемлемой частью биогеохимических циклов являются антропогенные источники, такие как промышленность и удобрения. Климатические сценарии РЕЕХ, особенно оценки типа и частоты экстремальных событий, будут использованы для совершенствования прогнозирования климата в Европе, России и Китае. Кроме того, социально-экономические исследования охватывают (i) наложение природных и социально-экономических факторов, (ii) зависимость последствий природных изменений на социально-экономические условия и их динамику, (iii) идентификация возможностей и методов снижения негативных последствий и адаптации к природным и социально-экономическим изменениям, (iv) пространственная дифференциация реакции общества на национальном, региональном и местном уровнях (региональные и локальные, урбанистические и сельские вопросы) на природные и социально-экономические проблемы.

Научные результаты РЕЕХ используются для создания различных типов сценариев воздействия изменения климата и качества воздуха на общество, энергетические ресурсы и движение капитала. В ходе РЕЕХ будет подготовлена информация для стратегий по снижению негативных последствий и адаптации к ним для изменяющихся арктических сред, а также анализ рисков для деятельности человека и рисков природных угроз (наводнения, лесные пожары, засухи, загрязнение воздуха). Эти планы принимают во внимание различные ключевые аспекты, такие как устойчивое землепользование, вопросы здоровья человека и производство энергии. Передовое знание и сценарии климатических явлений и их воздействий необходимы для предоставления усовершенствованных климатических прогнозов, а также для поддержки мер адаптации. В частности, для прошедших, настоящих и будущих условий необходимы оценки типа и частоты экстремальных событий и возможных нелинейных откликов.

Крупномасштабные исследовательские вопросы

Система суши

Q-1 Как определить регионы и процессы, особенно чувствительные к изменениям климата, и каковы наилучшие методы анализа их реакции?

Ключевая тема: меняющиеся процессы экосистемы суши

Q-2 Как быстро будет происходить таяние многолетней мерзлоты и как это повлияет на процессы в экосистемах и на обратные связи экосистемы и атмосферы, включая гидрологию и потоки парниковых газов?

Ключевая тема: зоны, где существует риск таяния многолетней мерзлоты

Q-3 Каковы структурные изменения и переломные моменты для экосистем севера?

Ключевая тема: структурные изменения экосистем

Система атмосферы

Q-4 Какие ключевые физические и химические процессы в атмосфере значительно влияют на климат?

Ключевая тема: состав и химия атмосферы

Q-5 Каковы ключевые обратные связи между качеством воздуха и климатом в высоких широтах и в Китае?

Ключевая тема: качество воздуха в городах, крупные города, изменяющийся атмосферный пограничный слой

Q-6 Как атмосферная динамика (погода синоптического масштаба, пограничный слой) изменится в арктическо-бореальных регионах?

Ключевая тема: погода и атмосферная циркуляция

Водные системы – Северный Ледовитый океан

Q-7 Как изменится площадь и толщина морского льда в Арктике и снежный покров на суше?

Ключевая тема: Северный Ледовитый океан в системе климата

Q-8. Каково совместное воздействие арктического потепления, опреснения океана, загрязняющей нагрузки и закисления на арктические морские экосистемы, первичную продуктивность и цикл углерода?

Ключевая тема: морская среда Арктики

Q-9 Какова будущая роль арктическо-бореальных озер, заболоченных земель и крупных речных систем (включая термокарстовые озера и проточные воды разных масштабов) в биогеохимических циклах и как скажутся эти воздействия на деятельность человека (жизнедеятельность, сельское хозяйство, лесное хозяйство, промышленность)?

Ключевая тема: озера, заболоченные территории и крупные речные системы Сибирского региона

Антропогенная деятельность

Q-10. Как деятельность человека (изменение землепользования, производство энергии, использование природных ресурсов, изменения энергоэффективности, использование возобновляемых источников энергии) будет влиять на дальнейшие изменения окружающей среды в регионе?

Ключевая тема: антропогенное воздействие

Q-11. Как изменения физического, химического и биологического состояния различных экосистем, внутренних вод, прибрежных зон влияют на экономику и сообщества в регионе и наоборот?

Ключевая тема: воздействие окружающей среды

Q-12 В каких направлениях населенные территории уязвимы перед изменением климата? Как может быть уменьшена их уязвимость, а их способность к адаптации увеличена? Какие реакции могут быть выявлены для адаптации к изменениям климата и смягчения их последствий?

Ключевая тема: стихийные бедствия

Обратные связи - взаимосвязи

Q-13 Как изменения состояния криосферы и последующие изменения в экосистемах повлияют на климат Арктики и погодные системы, включая риск стихийных бедствий?

Q-14 Каково суммарное воздействие различных механизмов обратной связи на (i) изменения почвенно-растительного покрова, (ii) фотосинтетическую активность, (iii) обмен парниковых газов и эмиссии биогенных летучих органических соединений, (iv) образование аэрозолей и облаков, а также радиационное воздействие? Как они изменяются в зависимости от изменения климата в региональном и глобальном масштабах?

Q-15. Как интенсивные урбанизационные процессы изменяют локальный и региональный климат и окружающую среду?

Ключевая темы Q 13-15: состав атмосферы, биогеохимические циклы: вода, углерод (C), азот (N), фосфор (P), сера (S)

Система суши

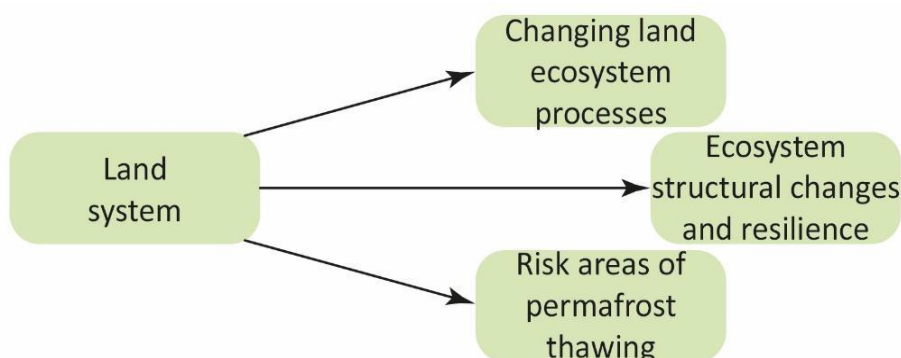


Рисунок 4 Подструктура повестки исследования системы суши.

Q-1 Как определить регионы и процессы, особенно чувствительные к изменениям климата, и каковы наилучшие методы анализа их реакции?

Климатические условия влияют на структуру и функции всех арктических и бореальных экосистем. В будущем, многие процессы будут чутко реагировать на изменение климата, а также влиять на продуктивность и функции экосистем. Непредсказуемыми последствиями этого могут стать, например, изменения масштабов экосистемных стоков углерода, образования газов-предвестников аэрозолей и альbedo поверхности.

Q-2 Как быстро будет происходить таяние многолетней мерзлоты и как это повлияет на процессы в экосистемах и на обратные связи экосистемы и атмосферы, включая гидрологию, потоки парниковых газов и эмиссии летучих органических соединений?

Большая часть географического региона северной Евразии покрыта сплошной многолетней мерзлотой. Даже небольшие в процентном отношении изменения в круговороте накопленного в почве углерода вследствие таяния многолетней мерзлоты превратят наземные экосистемы из накопителя углерода в его источник. Соответственно, очень мало известно об эмиссиях летучих органических соединений, связанных с изменением вечной мерзлоты. Будущность вечномерзлого грунта в тундре важна для глобального климата относительно всех парниковых газов, а также потенциальных эмиссий летучих органических соединений и последующего образования аэрозолей. В основе этих сценариев лежит острая необходимость проведения систематического мониторинга многолетней мерзлоты с измерением парниковых газов и летучих органических соединений в различных экосистемах. Интерпретация состояния многолетней мерзлоты в климатических моделях до сих пор недостаточно разработана.

Q-3 Каковы структурные изменения и переломные моменты для экосистем севера?

Для биогеографического региона РЕЕХ характерны сельскохозяйственные районы, степь, тундра, тайга, болота, мегаполисы и ледяные поля. Ожидаемое изменение климата и возрастающее антропогенное воздействие вызовут значительное перераспределение биоклиматических зон с последующими изменениями структуры, продуктивности и жизнеспособности экосистем суши. Многие из видов, обитающие в бореальных экосистемах, подвержены даже умеренным изменениям в окружающей среде. Структурные изменения экосистем тесно связаны с потребностями в адаптации, а также с разработкой эффективных стратегий смягчения негативных последствий и адаптации. Прогнозы, касающиеся смещения растительных зон, имеют большое значение для оценки воздействий региона на будущие глобальные бюджеты парниковых газов, биогенных летучих органических соединений и аэрозолей. Кроме того, природные и антропогенные стрессовые воздействия, такие как изменения землепользования и биотические и абиотические возмущения формируют экосистемы в Арктике и бореальных регионах и имеют много значимых обратных связей с климатом. При более теплом климате северные экосистемы могут стать восприимчивее к вспышкам массового размножения насекомых, засухам, разрушительным лесным пожарам и другим стихийным бедствиям. Также воздействие человека может привести к внезапным или постепенным изменениям в функционировании экосистем. Устойчивость экосистемы зависит и от скорости, и от масштабов этих изменений. В некоторых случаях изменения могут привести к системному дисбалансу и достичь переломного момента, после которого последствия становятся необратимыми.

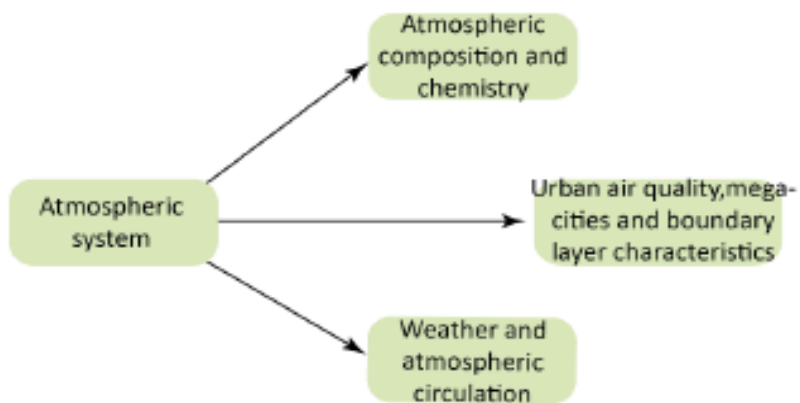


Рисунок 5 Подструктура повестки исследования атмосферной системы.

Q-4 Какие ключевые физические и химические процессы в атмосфере значительно влияют на климат?

Важнейшими антропогенными климатическими факторами являются парниковые газы (ПГ) и частицы аэрозоля. Ожидается, что особенно в Арктике при изменении климата появятся некоторые обратные связи, связанные с аэрозолями и ПГ. К этому можно добавить, что арктическая среда также весьма чувствительна к изменениям концентрации и состава аэрозолей. Концентрации аэрозолей зимой и весной в Арктике находятся под воздействием «Арктического тумана» (Shaw, 1995); предполагается, что это явление возникает вследствие переноса загрязняющих веществ с более низких широт (Stohl, 2006) и затем усиливается сильной стратификацией атмосферы Арктики в зимнее время.

Q-5 Каковы ключевые обратные связи между качеством воздуха и климатом в высоких широтах и в Китае?

Урбанизированные среды в проекте РЕЕХ в основном представлены городами в России и Китае с сильными антропогенными выбросами местной промышленности, транспорта и жилого фонда, а также мегаполисами, такими как Москва и Пекин с вызывающими беспокойство уровнями загрязнения воздуха. Плохое качество воздуха оказывает серьезное воздействие на здоровье населения и наносит вред экосистемам. Кроме того, атмосферные загрязняющие вещества и оксиданты (SO_2 , O_3 , NO_x , сажа, сульфаты, вторичные органические аэрозоли) играют центральную роль в динамике изменения климата посредством прямого и косвенного воздействия на глобальное альbedo, лучистый перенос и процессы облако-осадки.

Q-6 Как атмосферная динамика (погода синоптического масштаба, пограничный слой) изменится в арктическо-бореальных регионах?

Изменения динамики атмосферы в Арктическо-бореальном регионе оказывают серьезное воздействие (i) на краткосрочный прогноз физических свойств в данной области и за ее пределами из-за нелинейных многомасштабных изменений в атмосфере и тесно связанных подсистем и (ii) на более долгосрочный прогноз и перспективны относительно биогеохимических систем в данной области и по всему миру.

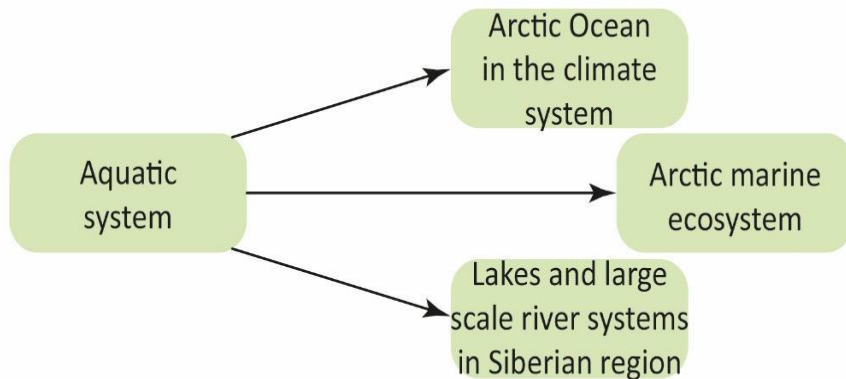


Рисунок 6 Подструктура повестки исследований водной системы и Северного Ледовитого океан

Q-7 Как изменится площадь и толщина морского льда в Арктике и снежный покров на суше?

Северный Ледовитый океан играет важную роль в системе климата. Основные процессы, связанные с взаимодействием между океаном и другими компонентами системы Земли, включают в себя обмен импульсом, теплом и веществом (напр., влага, CO₂ и CH₄) между атмосферой и морем, а также динамику и термодинамику морского льда. Необходимо изучить следующие важные вопросы: (i) роль океана в арктическом усилении изменения климата, (ii) причины уменьшения площади арктического льда, (iii) обмен парниковых газов между океаном и атмосферой, (iv) последствия уменьшения площади морского льда для океана, окружающих его континентов и бюджетов аэрозолей

Q-8. Каково совместное воздействие арктического потепления, опреснения океана, загрязняющей нагрузки и закисления на арктические морские экосистемы, первичную продуктивность и цикл углерода?

Ледовый покров Северного Ледовитого океана претерпевает быстрые изменения, включая уменьшение площади льда и его толщины в летний период. Это приводит к значительному увеличению поверхности моря, свободной ото льда, в вегетационный период и увеличению продолжительности этого периода. Это может вызвать рост годовой общей первичной продукции (GPP) и биомассы фитопланктона. В свою очередь, более высокая GPP может вызвать (i) увеличение потоков CO₂ из атмосферы в океан и (ii) увеличение общей биологической продукции, включая продукцию организмов с высоким трофическим уровнем и популяцию рыб. Увеличение температуры поверхности воды может открыть «двери Арктики» для новых видов и изменить пищевые сети, потоки энергии и биологическое разнообразие Арктики. Климатические и антропогенные факторы, действующие в зонах речных бассейнов, могут привести к увеличению количества пресной воды и аллохтонных материалов, ежегодно приносимых на Арктический шельф и далее в Арктический бассейн. Все описанные процессы могут повлиять на арктические морские экосистемы, их продуктивность и основные биогеохимические циклы в регионе. Одни из наиболее значимых возможных изменений связаны с увеличением антропогенного воздействия в результате добычи и транспортировки нефти и природного газа в шельфовых зонах.

Q-9 Какова будущая роль арктическо-бореальных озер, заболоченных земель и крупных речных систем (включая термокарстовые озера и проточные воды разных масштабов) в биогеохимических циклах, и как скажутся эти воздействия на деятельность человека (жизнедеятельность, сельское хозяйство, лесное хозяйство и промышленность)?

Градиент химического состава воды от тундры до степей поможет представить потенциальные воздействия изменения климата на гидрохимию. В последнее столетие трансграничный перенос загрязняющих веществ в атмосфере на дальние расстояния привел к изменениям геохимических циклов серы (S), азота (N), металлов и других соединений. Кроме того, метан в северной Евразии выходит в различных местах в виде пузырей. Таяние многолетней мерзлоты может ускорить эмиссии метана в озерах. Более того, увеличивается вероятность токсичного цветения. Загрязнение и дефицит водных ресурсов в Китае усугубились за последние десятилетия. Сохранение водных ресурсов становится решающим фактором для общества.

Антропогенная деятельность и общество

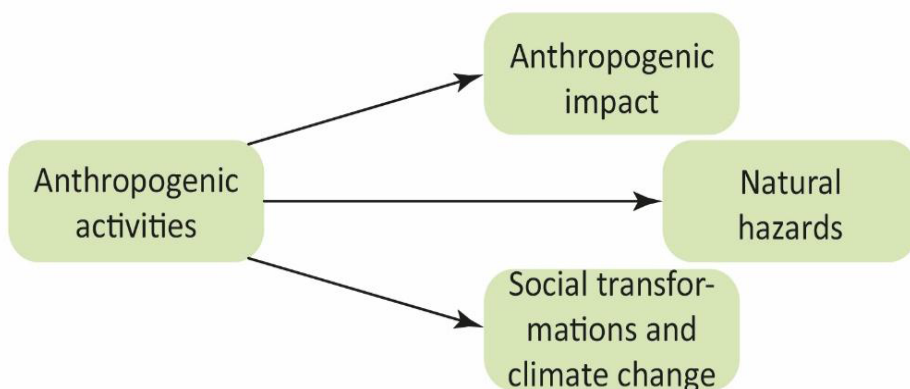


Рисунок 7 Подструктура повестки исследований антропогенной деятельности

Q-10 Как деятельность человека (изменение землепользования, производство энергии, использование природных ресурсов, изменения энергоэффективности, использование возобновляемых источников энергии) будет влиять на дальнейшие изменения окружающей среды в регионе?

Сибирь – это российская сокровищница природных ресурсов, в Сибири находится 85% разведанных запасов газа, 75% запасов угля, 65% запасов нефти. В Сибири находится 75% бурого угля, 95% свинца, около 90% молибдена, платины и платиноидов; 80% алмазов; 75% золота, 70% никеля и меди (Koryntyi, 2009). Промышленное развитие Сибири следует рассматривать как один из важнейших факторов будущих изменений землепользования и почвенно-растительного покрова на территории России.

Q-11 Как изменения физического, химического и биологического состояния различных экосистем, внутренних вод, прибрежных зон влияют на экономику и сообщества в регионе и наоборот?

Частота и интенсивность экстремальных погодных факторов значительно увеличилась за последние десятилетия в Европе, России и Китае, при этом ожидается дальнейший рост. Растущие риски и затраты вследствие влияния экстремальных факторов, а также их воздействие на население, окружающую среду, транспорт и промышленность недостаточно хорошо изучены в северных

широтах Евразии. Важные исследовательские темы включают: анализ и совершенствование прогнозирования экстремальных погодных условий и событий; оценка воздействия природных пожаров на радиационный прогрев и атмосферный состав в регионе; воздействие экстремальных факторов на основные биогеохимические циклы; влияние возмущающих воздействий в лесах на эмиссии биогенных летучих органических компонентов и летучего органического азота.

В северной Евразии от восточной части Баренцева моря до Берингова моря многолетняя мерзлота располагается непосредственно на берегу моря. На многих таких прибрежных территориях уровень моря поднимается, и постоянное разрушение многолетней мерзлоты приводит к значительной эрозии берега и к возможности обрушения береговых сооружений, таких как маяки, порты, дома и т.п. В этом регионе подъем уровня моря неразрывно связан с разрушением многолетней мерзлоты, и этот вопрос требует рассмотрения в будущих исследованиях.

Q-12 В каких направлениях населенные территории уязвимы перед изменением климата? Как может быть уменьшена их уязвимость, а их способность к адаптации увеличена? Какие реакции могут быть выявлены для адаптации к изменениям климата и смягчения их последствий?

Климат и погода сильно влияют на условия жизни сообществ, здоровье людей, уровень заболеваемости и способность к адаптации. Степень уязвимости сообществ, в том числе их способность к адаптации, сильно варьируется в зависимости от физической среды, демографической структуры и экономической деятельности. РЕЕХ оценивает сферы, наиболее уязвимые к последствиям изменения климата. РЕЕХ будет помогать разрабатывать стратегии смягчения последствий изменения климата. В целом, РЕЕХ анализирует научную основу и стратегии по адаптации и смягчению последствий изменения климата (AMS) для сообществ региона с особым вниманием на лесной сектор и сельское хозяйство.

Биогеохимические циклы и обратные связи

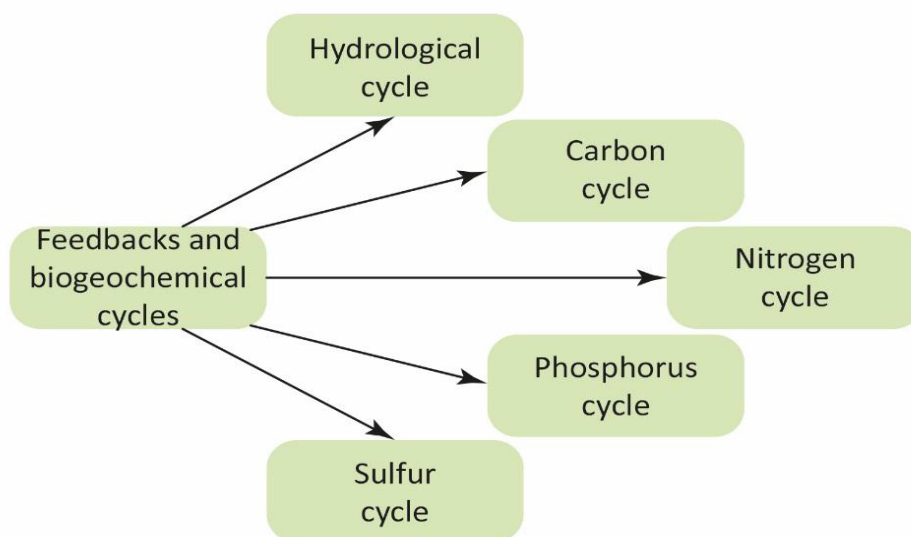


Рисунок 8 Подструктура повестки исследований обратных связей и биогеохимических циклов

Q-13 Как изменения состояния криосферы и последующие изменения в экосистемах повлияют на климат Арктики и погоду, включая риск стихийных бедствий?

Q-14 Каково суммарное воздействие различных механизмов обратной связи на (i) изменения почвенно-растительного покрова, (ii) фотосинтетическую активность, (iii) обмен парниковых газов и эмиссии биогенных летучих органических соединений, (iv) образование аэрозолей и облаков, а также радиационное воздействие? Как они изменяются в зависимости от изменения климата в региональном и глобальном масштабах?

Q-15 Как интенсивные урбанизационные процессы изменяют локальный и региональный климат и окружающую среду?

Обратные связи являются важными компонентами нашей климатической системы, так как они либо увеличивают, либо уменьшают изменения, происходящие в параметрах, связанных с климатом, находясь под внешним воздействием (IPCC, 2013). Одна из первых петель обратной связи, которая будет определена количественно, связана с концентрацией углекислого газа в атмосфере, температурой окружающей среды, общей первичной продукцией, образованием вторичных биогенных аэрозолей, облаками и лучистым переносом (Kulmala et al., 2014a,b). Северный пан-евразийский арктико-бореальный географический регион охватывает широкий спектр взаимодействий и процессов обратной связи между человеком и природными системами. Причем человек действует и как источник изменений климата и окружающей среды, и как реципиент их воздействия. Последствия изменения климата на биогеохимические циклы еще недостаточно поняты, существует много механизмов обратной связи, которые трудно поддаются количественной оценке. В городских и промышленных регионах неотъемлемой частью биогеохимических циклов являются антропогенные источники, такие как промышленность и удобрения. Измерения изменений гидрологических и биогеохимических циклов необходимы для построения и параметризации следующего поколения моделей системы Земли (EMS).

EMS являются наилучшим инструментом анализа воздействия различных изменений окружающей среды на климат или комплексного изучения процессов в Системе Земли. Такие типы анализа и прогнозирования изменений особенно важны в высоких широтах, где изменение климата происходит с наибольшей скоростью и где приповерхностное потепление в последние десятилетия почти в два раза превышает среднемировое значение.

Воздействие изменения климата на биогеохимические циклы до сих пор изучено недостаточно, существует множество механизмов обратной связи, которые сложно описать количественно (Arneeth et al., 2010a,b; Kulmala et al., 2014a,b). Они связаны, например, с взаимодействием циклов углерода и азота, процессами в многолетней мерзлоте и фитотоксичностью озона (Arneeth et al., 2010a,b) или с эмиссиями и атмосферной химией биогенных летучих органических соединений (Grote and Niinemets 2008, Mauldin et al., 2012), последующим формированием аэрозолей (Tunved et al. 2006; Kulmala et al. 2011a) и взаимодействиями аэрозоля и облачности (McComiskey & Feingold 2012; Penner et al., 2012). Для правильного понимания динамики этих процессов важно количественно описать диапазон эмиссий и потоков от различных типов экосистем и сред и их связей с продуктивностью экосистем, а также учесть то, что могут существовать неизвестные ранее источники и процессы (Su et al. 2011, Kulmala and Petäjä, 2011, Bäck et al., 2010).

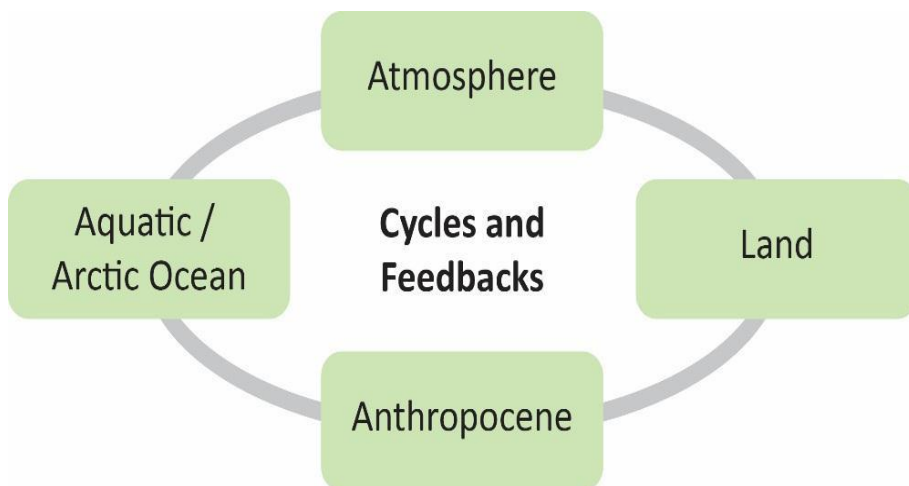


Рисунок 9 Одной из основных целей научной повестки РЕЕХ является создание целостного понимания основных процессов в континууме суша-атмосфера-водная система-антропогенная система.

Исследовательская инфраструктура (Фокус-2)

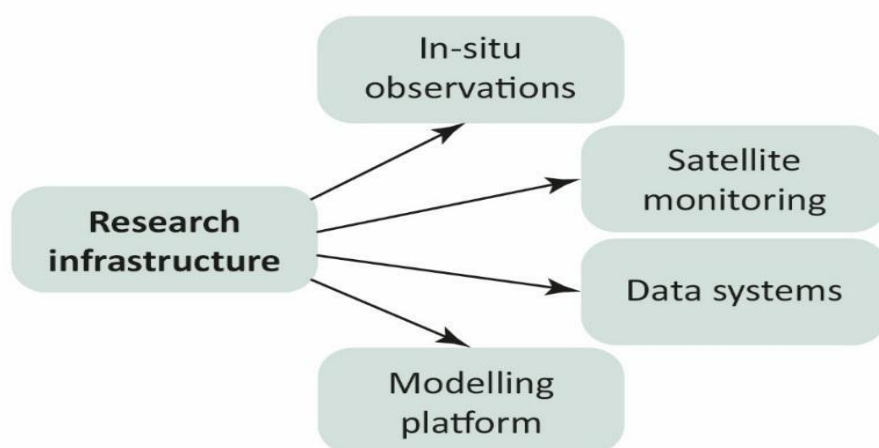


Рисунок 10 Подструктура исследовательской инфраструктуры (Фокус-2).

Скоординированная программа наблюдений и системы данных

Решение взаимосвязанных глобальных экологических проблем может быть найдено только путем гармонизированного и целостного подхода к наблюдениям с использованием всех имеющихся средств моделирования, представляющих различные пространственные и временные масштабы. С другой стороны, все инструменты, включая модели и устройства для наблюдений и проведения экспериментов нуждаются в дальнейшей доработке, чтобы решать исследовательские вопросы и проблемы. Подход РЕЕХ использует методы исследования, которые включают и эксперименты, и инструменты моделирования и варьируются от наблюдений и изучения процессов в масштабе от нанометров и суб-секунд до масштабов глобальных и десятилетних измерений, наборов данных и модельных экспериментов. Видение инфраструктуры РЕЕХ заключается в предоставлении комплексных, непрерывных и надежных гармонизированных данных для служб прогнозирования, а также для научного сообщества.

Исследовательская инфраструктура РЕЕХ нацелена на создание долгосрочной комплексной сети полевых станций в регионе, охватывающем Европу (в особенности Скандинавию и страны Балтии), Россию и Китай. Интегрированные измерения иерархической сети станций предназначены для понимания количественных процессов в континууме суша-атмосфера-океан и влияния антропогенной деятельности на (эко)системы. На первом этапе наземная сеть станций будет основываться на существующей инфраструктуре, состоящей из (i) стандартных станций, включая метеостанции, (ii) потоковых станций (FLUXNET), (iii) флагманских станций и (iv) станций приема спутниковых данных. Стратегической задачей является обеспечение долгосрочных передовых измерений аэрозолей, облаков, парниковых газов и малых газовых компонент в регионе Северной Евразии. Предварительная концепция иерархической сети для морских наблюдений состоит из простых буев, размещенных на морском льду в открытом море, высокотехнологичных буев, научно-исследовательских судов, флагманских станций, обитаемых дрейфующих станций и постоянных станций на побережье и архипелагах.

Флагманские станции РЕЕХ одновременно измеряют метеорологические и атмосферные параметры, а также процессы, связанные с экосистемами (включая циклы углерода, питательных веществ и воды, динамику растительности, биотические и абиотические стрессы). В идеале, сеть наземных станций будет иметь по одной флагманской станции во всех основных экосистемах, на практике это означает станцию на каждые 1000-2500 км. Будущая исследовательская инфраструктура РЕЕХ будет включать в себя воздушные и спутниковые наблюдения, которые обеспечат дополнительную информацию (к местным наблюдениям *in-situ*) о пространственной изменчивости состава атмосферы (аэрозоли, малые газовые компоненты, парниковые газы, облака), а также о свойствах поверхности суши и океанов, включая растительность и снег/лед. И наоборот, инфраструктура РЕЕХ будет играть важную роль в валидации, интеграции и полном использовании спутниковых данных о системе Земли.

Криосфера в Арктике стремительно меняется. Измерения текущих и прошлых состояний криосферы делаются с помощью глубоких скважин, площадок вечной мерзлоты, буев/дрейфующих станций в Северном Ледовитом океане, исследовательских кораблей, а также на основе геофизических наблюдений с борта самолета. РЕЕХ заинтересован в развитии скоординированных наблюдений криосферных изменений и Северного Ледовитого океана.

Морские наблюдения РЕЕХ будут состоять из наблюдений *in-situ* и дистанционных наблюдений. Измерения *in-situ* включают, в частности, температуру океана, соленость, химические компоненты и органическое вещество; толщину, температуру, структуру и состав морского льда и снега; а также морскую атмосферу (температура, влажность, ветры, облака, аэрозоли, химический состав). Дистанционные наблюдения будут включать температуру поверхности океана, цветность и волновое поле, свойства морского льда, в том числе тип льда, его сплоченность, протяженность, толщину и альбедо, а также параметры биологической активности (биомасса планктона). Исследования, основанные на этих наблюдениях, будут поддерживаться анализом и экспериментами с применением моделей процессов, операционных моделей, а также региональных и глобальных климатических моделей. Наблюдения проводятся на дрейфующих станциях, во время исследовательских экспедиций, автономными дрейфующими станциями/буями, заякоренными буйковыми станциями, а также пилотируемыми и беспилотными исследовательскими аппаратами.

В ходе программы РЕЕХ будет получено большое количество данных измерений, научных публикаций, описаний методов и результатов моделирования. План продукта данных РЕЕХ строится на создании постоянных интегрированных платформ РЕЕХ, фиксирующих изменения различных компонентов экосистемы (атмосферных, наземных, морских), и использовании самых современных методик управления, включая автоматическую передачу данных непосредственно с измерительных станций, обработку данных, контроль качества и конвертацию в форматы удобные для международных пользователей и хранения. Данные РЕЕХ будут гармонизованы с международными измерительными системами и форматами данных на основе сотрудничества с существующими инфраструктурными проектами по Арктике и бореальным зонам, такими как IASOA (Международные Арктические системы для наблюдения атмосферы), INTERACT (Международная сеть исследования и мониторинга суши в Арктике), Российская система атмосферного мониторинга (RSAM), Интегрированная система информации по суше, AERONET (Роботизированная сеть изучения аэрозолей), NDACC (Сеть обнаружения изменений состава атмосферы), TCCON (Сеть наблюдения содержания углерода в вертикальном столбе атмосферы), GAW-WMO (Глобальная служба атмосферы Всемирной метеорологической организации), и европейскими исследовательскими инфраструктурами, такими как ICOS (Интегрированная система наблюдения углерода), ACTRIS (Инфраструктурная сеть по изучению аэрозолей, облаков и малых газовых компонент), SIOS (Интегрированная система наблюдения Земли Svalbard) и ANAEE (Инфраструктура для анализа и экспериментального исследования экосистем).

Модельная платформа

Модельная платформа РЕЕХ характеризуется мультимасштабным подходом, начинающимся от уровня молекул и клеток и заканчивающийся комплексным интегрированным моделированием системы Земли, в сочетании с моделями отдельных процессов и элементов системы в различных временных и пространственных масштабах. РЕЕХ использует согласованный подход при объединении результатов моделирования, полученных из разных моделей, от различных участников и стран. РЕЕХ задействует весь потенциал иерархии моделей: анализ сценариев, обратное моделирование, моделирование, основанное на задачах и процессах измерения. Модели проверяются данными дистанционного зондирования и данными *in situ* различных временных и пространственных масштабов с использованием включения данных и нисходящего моделирования. Анализ больших объемов данных, полученных от моделей РЕЕХ и сенсоров, будет поддержан специально разработанной виртуальной исследовательской средой.

Существует критика, что процессы, и, следовательно, параметризация в Моделях системы Земли (ESM) основываются на недостаточных знаниях физических, химических и биологических механизмов климатической системы, и что пространственное и временное разрешение известных процессов недостаточно. Существует недостаток механизмов эффективного продвижения необходимого понимания процессов к ESM. В рамках РЕЕХ мы занимаемся этой проблемой.

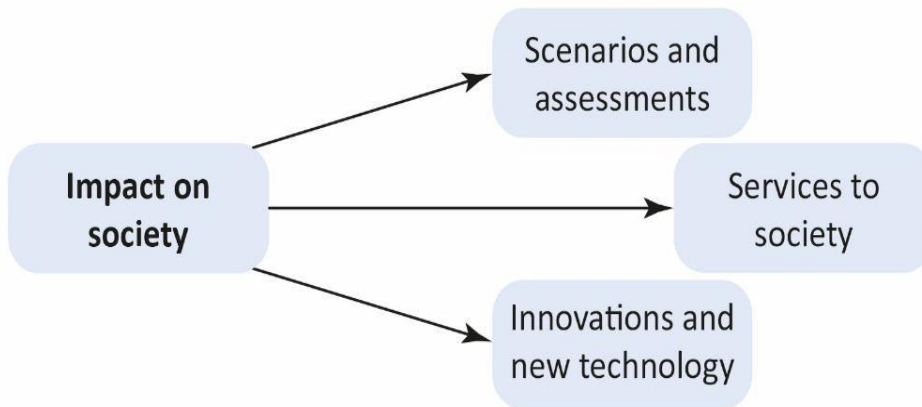


Рисунок 11 Подструктура «Воздействие РЕЕХ на общество».

Сценарии и оценки

Повестка исследований РЕЕХ поддерживает планирование мер адаптации к изменению климата и смягчению его последствий. РЕЕХ обеспечивает научные знания о природных и климатических процессах, которые необходимы для оценки степени климатических рисков в будущем. РЕЕХ будет накапливать научные знания о том, как общество в Европе, России и Китае может адаптироваться к изменению климата и смягчить его последствия, и что может затруднять эти процессы.

Службы

Одним из главных итогов предварительного этапа РЕЕХ является наблюдательная сеть РЕЕХ, которая заполнит текущий недостаток наблюдений в Северной Евразии и утвердит службу данных для разных типов пользователей. Целью является донесение наблюдательной структуры в международный контекст со стандартными или сопоставимыми процедурами. Развитие европейских исследовательских инфраструктур предоставляет модель для гармонизированных продуктов данных РЕЕХ и для калибровки сетевых измерений на основе международных стандартов. РЕЕХ будет перенимать общеевропейские форматы данных и процедуры для развития своей исследовательской инфраструктуры (RI). Кроме того, РЕЕХ будет активно сотрудничать в рамках циркумполярных проектов.

Второй основной областью интересов является обеспечение новых систем раннего предупреждения для арктическо-бореальных регионов. Увеличение использования природных ресурсов в арктическом регионе, совместно с увеличением транспортных потоков, увеличит риск аварий, таких как разливы нефти, а также увеличит антропогенные эмиссии в наземную, воздушную и водные системы, повлечет негативные изменения в землепользовании в лесах и сельскохозяйственных районах. Таяние вечной мерзлоты и экстремальные погодные явления увеличивают риски стихийных бедствий, таких как лесные пожары, наводнения и оползни, а также риски разрушения объектов инфраструктуры, таких как здания, дороги и системы распределения энергии. Скоординированная сеть наблюдений РЕЕХ совместно с моделированием в рамках РЕЕХ образуют

основу для следующего поколения систем раннего предупреждения по всему региону исследований РЕЕХ.

Новые технологии

Общество и фундаментальные исследования тесно связаны друг с другом. Используя ресурсы, предоставляемые обществом, фундаментальные исследования генерирует новые знания, которые затем используются в прикладных исследованиях. Прикладные исследования генерируют инновации, которые создают новые блага и ресурсы для общества. Важно обеспечить, чтобы этот цикл не был нарушен. РЕЕХ активно действует в этой части цикла. Технологическое развитие может ответить на некоторые из вопросов, поставленные в F1. Тем не менее, следует рассматривать все общество, включая его экономические и культурные аспекты, в поисках экологически рациональных решений глобальных проблем.

Передача знаний (Фокус-4)

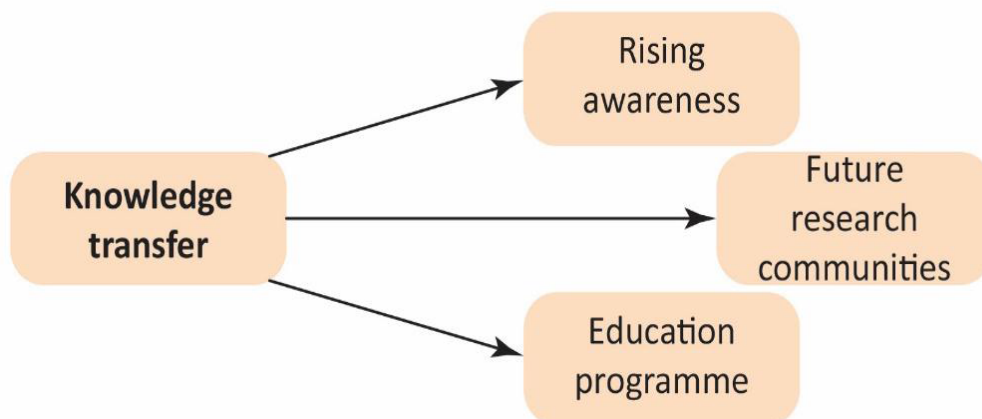


Рисунок 12 Подструктура «Передачи знаний РЕЕХ».

Образовательная программа

Одним из первых мероприятий проекта РЕЕХ будет создание образовательной программы РЕЕХ. Основное внимание будет уделяться распространению существующего образовательного материала и сотрудничеству национальных и региональных программ. РЕЕХ нацелен на обучение исследователей на протяжении развития их карьеры от уровня студентов и выпускников до специалистов, профессоров и руководителей научных институтов. Налаживание связей в естественнонаучной среде, а также с общественными науками является одной из наиболее важных целей международного и междисциплинарного образовательного сотрудничества.

Исследовательские сообщества

РЕЕХ внесет свой вклад в создание нового интегрированного исследовательского сообщества системы Земли в Пан-Евразийском регионе, открывая свою инфраструктуру исследований и моделирования и приглашая международных партнеров и организации для участия в ее разработке и использовании. РЕЕХ станет важным объединяющим фактором социально-экономических и естественнонаучных сообществ для совместного решения крупных проблем, влияющих на благополучие человека, общества и экосистем в арктическо-бореальном регионе.

Повышение осведомленности

РЕЕХ будет распространять информацию для широкой общественности в целях повышения осведомленности об изменении климата и воздействии человека на разные уровни климатических проблем. Это также увеличит заметность деятельности РЕЕХ в Европе, России и Китае.

1 ЦЕЛИ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

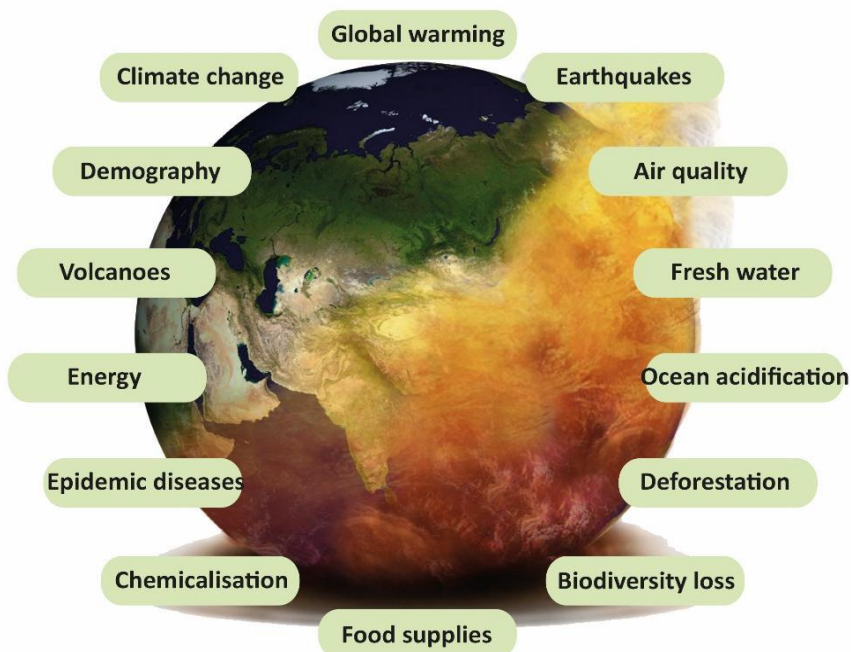


Рисунок 13 Примеры взаимосвязанных глобальных проблем

СИНОПСИС Решение любой из глобальных проблем (изменение климата, качество воздуха, окисление океана, проблема питьевой воды и продовольственных ресурсов, рис.13) требует проведения многомасштабной и мультидисциплинарной научно-исследовательской программы, связанной с ускоренным принятием политических решений. Пан-Евразийский эксперимент (РЕЕХ) вносит вклад в решение глобальных проблем в северной Евразии. Подход РЕЕХ сосредоточен на осмыслении физических и социально-экономических процессов, происходящих в системе Земли, особенно в изменяющихся природных и урбанистических средах северных (45 с.ш. и выше) и арктических регионов. РЕЕХ должен стать естественнонаучным и социально-экономическим проектом следующего поколения, который окажет большое воздействие на будущее экологическое, социально-экономическое и демографическое развитие в арктических и бореальных регионах и станет научным сообществом, строящим инновационную инфраструктуру в северных регионах Евразии.

Перед Землей стоит несколько экологических проблем глобального масштаба, называемых «Глобальными проблемами» (рис.13). «Глобальные проблемы» – это главные факторы, влияющие на благополучие человека, безопасность и стабильность будущего. Все «Глобальные проблемы» связаны между собой сложными обратными связями. «Глобальные проблемы» управляются «Глобальными силами». «Глобальные силы» - это (i) демография, (ii) возрастающий спрос на природные ресурсы, (iii) глобализация и (iv) изменение климата (Smith, 2010). Глобальные силы – это географически-ориентированные и переменные явления, зависящие от тенденций миграции населения, потоков капиталов в экономике, доступа к природным ресурсам и различных воздействий изменения климата, в том числе повышения глобальной и региональной средней температуры.

Пан-Евразийский Эксперимент (РЕЕХ) вносит вклад в решение «Глобальных проблем» в контексте Северной Евразии (рис 14).

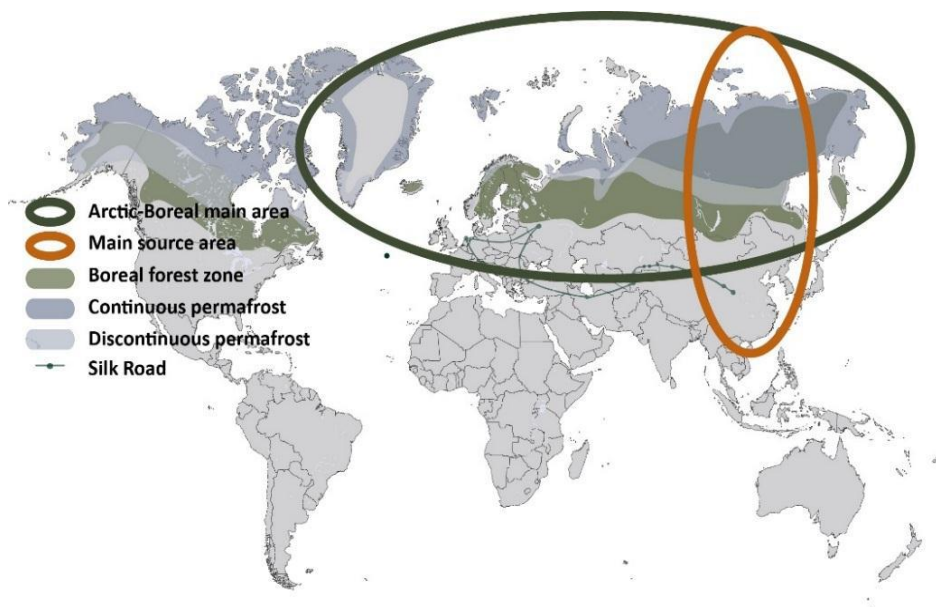


Рисунок 14 Географический регион РЕЕХ включает в себя и вечную мерзлоту и boreальные зоны

Проект РЕЕХ состоит из четырех целевых направлений (фокусов), каждое из которых имеет свои специфические задачи:

Фокус-1 Повестка исследований РЕЕХ

- Понять систему Земли и воздействие экологических и социальных изменений в нетронутых и индустриализированных средах исследуемых районов Евразии (понимание системы).
- Определить процессы, имеющие отношение к изменению климата, демографическому развитию и использованию энергетических ресурсов в арктическо-бореальных регионах (понимание процессов).

Фокус-2 Инфраструктуры РЕЕХ

- Создать и поддерживать долгосрочную комплексную наземную, авиационную и морскую исследовательскую инфраструктуру совместно с использованием спутниковых данных (компонент – наблюдение)
- Разработать новые наборы данных и архивы с постоянным потоком данных (компонент – данные)
- Внедрить прошедшие валидацию и гармонизированные продукты данных в модели соответствующих пространственно-временных масштабов по соответствующим темам (компонент – моделирование).

Фокус-3 Воздействие на общество

- Использовать новое исследовательское знание вместе с научно-исследовательской инфраструктурой для создания:
 - Надежных сценариев и оценок, чтобы на практике решать «глобальные проблемы» в северных регионах и в Китае (изменение климата и природные ресурсы)
 - Систем раннего предупреждения для устойчивого развития общества (демография)
 - Технологических инноваций, необходимых для глобальных экологических, технологических или социальных процессов во взаимосвязанном мире (глобализация)

Фокус-4 Передача знаний

- Обучить следующее поколение специалистов и ученых, нацеленных на мультидисциплинарные исследования «Глобальных проблем»
- Повысить осведомленность общественности о воздействиях изменения климата в Евразийском регионе.
- Распространить научные результаты и продукты данных среди научных сообществ и общественности
- Предоставить инструменты, сценарии и оценки властям и лицам, вырабатывающим политические решения

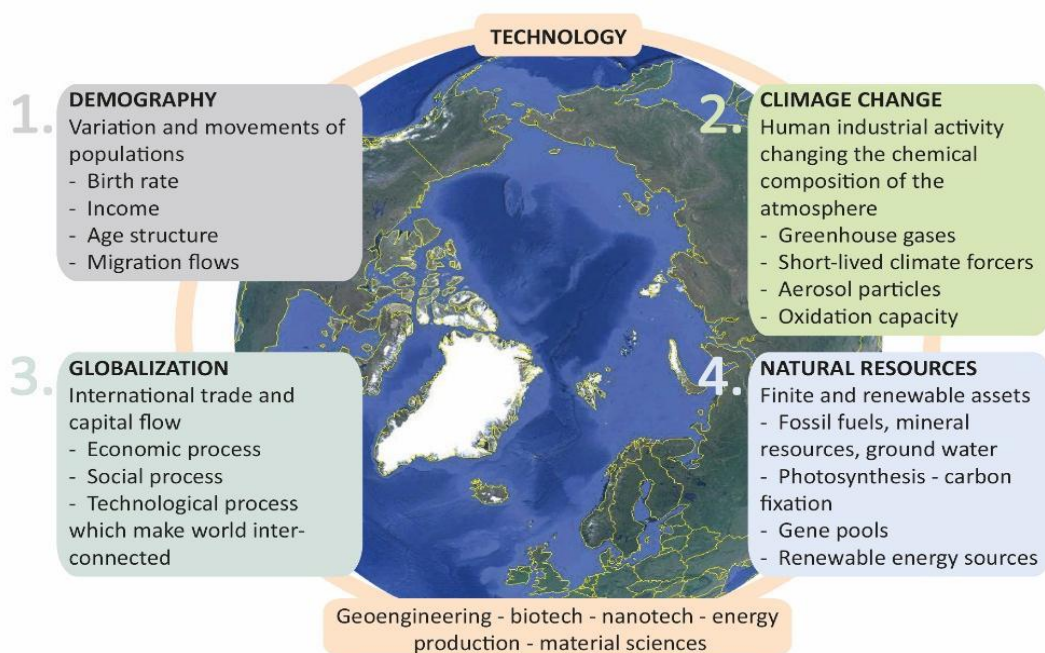


Рисунок 15 Глобальные силы, которые будут менять будущее северных регионов в ближайшие 40 лет (адаптировано из Smith, 2010).

2 МОТИВАЦИЯ РЕЕХ

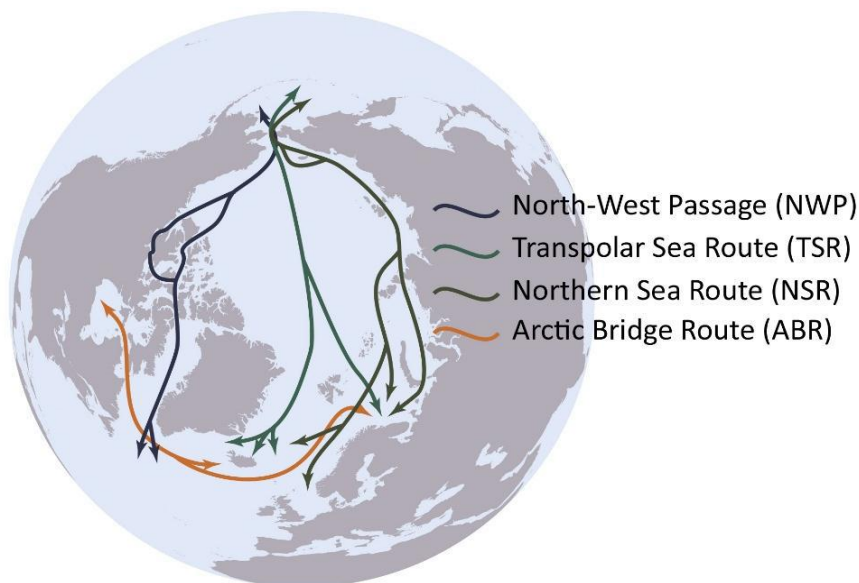


Рис. 16 Ожидаемые морские пути в Арктике (на основе изображения, предоставленного Институтом Арктики)

СИНОПСИС Тот факт, что северные регионы, суша и океан, расположенные на 45° с.ш. и выше в ближайшие 40 лет претерпят значительные изменения, обуславливает интерес РЕЕХ. Даже наиболее умеренные климатические сценарии предсказывают, что температура в северных высоких широтах к середине века поднимется на $1.5-2.5^{\circ}\text{C}$ и на 3.5°C к концу столетия, что более чем вдвое больше по сравнению со средним глобальным потеплением (ref. IPCC, 2013).

Одним из вызовов 21 века является противостояние последствиям изменения климата в глобальном масштабе, трансформации цивилизации и природных экосистем. Решение любой из «Глобальных проблем», таких как изменение климата, требует концептуальных рамок, в которых мультидисциплинарный подход (i) имеет решающий вес и (ii) неразрывно связан с процессом принятия политических решений. Также важно обеспечить устойчивое развитие сред и сообществ северных регионов. Этого можно достигнуть созданием слаженной научно-исследовательской инфраструктуры и образовательных программ, а также повышением экологической информированности общества.

Северные регионы, суша и океан, расположенные на 45° с.ш. и выше в ближайшие 40 лет претерпят значительные изменения. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2013) говорится, что арктические регионы потеплеют от $2,2\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ до $8,3\pm 1,9^{\circ}\text{C}$ к концу этого века в зависимости от сценария эмиссий.

Арктическо-бореальная природная среда Евразии станет очень важной областью для глобального климата через изменение альбедо, накопители и эмиссии углерода, эмиссии метана и образование аэрозолей посредством биогенных летучих органических соединений. Изменение климата влияет на динамику всей глобальной климатической системы, а также затрагивает взаимосвязанную систему трех других глобальных сил: демографических трендов, использование и потребность в природных ресурсах и глобализацию. Потепление будет влиять на демографические тренды в плане ускорения процесса урбанизации и увеличения миграции в северные регионы, а также на изменение

социальных вопросов и качества воздуха. Одним из главных последствий потепления северных широт являются соответствующие изменения в криосфере, включая таяние многолетней мерзлоты и то, что Северный Ледовитый океан часть года будет свободен ото льда. Если Северный морской путь будет открыт для прохождения судов между Атлантикой и Дальним Востоком, значительно усилится торговая деятельность. Северные экосистемы и арктические регионы богаты залежами многих природных ресурсов, таких как нефть, природный газ и минералы, и их добыча зависит от того выдержат ли инфраструктуры таяние многолетней мерзлоты.

Одной из наиболее позитивных для экономики перспектив потепления Арктики является открытие Северного морского пути для навигации между Атлантикой и Дальним Востоком (Рис. 16). Северный Ледовитый океан большую часть года покрыт льдом (с октября по июнь), что препятствует навигации, но количество льда быстро сокращается. Прогнозируемое сокращение периода ледового покрытия привлекает внимание и к природным ресурсам Арктики. Будущая роль этих ресурсов на глобальном энергетическом рынке огромна, так как регион может содержать 25 и более процентов мировых неразведанных ресурсов нефти и газа (Yenikeyeff and Krysiak 2007).

Наряду с этими тенденциями деятельности человека на севере, в экосистемах произойдут значительные изменения, включая экспансию новых видов или вымирание существующих, изменение продуктивности и структуры экосистем, модификацию их роли как стоков или источников газов. Последнее особенно важно для обширных бореальных лесов и торфяников. Такие изменения экосистем могут иметь непредсказуемые последствия для пищевых сетей и для взаимосвязей различных экосистем и деятельности человека.

Помимо крупномасштабных факторов, связанных с глобальным изменением климата, существует региональный социальный аспект, включающий, например, надежность инфраструктуры (электросети, здания, зимние ледяные дороги), построенной в районах таяния многолетней мерзлоты, и вопросы, связанные с обеспечением условий жизни и поддержкой культуры аборигенов, живущих на севере. Большая часть областей с проблемой таяния вечной мерзлоты в арктическо-бореальных областях Северной Евразии находится на территории России и Китая, а обширные территории региона вечной мерзлоты и бореальных лесов (тайги) расположены в Сибири. Таяние вечной мерзлоты и смещение к северу зоны тайги будет иметь значительные последствия для климатической системы. Наиболее важным движущим фактором исследований будут прогнозируемые изменения (i) динамики источников и накопителей парниковых газов (ПГ) и (ii) эмиссий биогенных летучих органических соединений (BVOC). В настоящий момент тайга и торфяники Сибири депонируют значительную часть глобальных потоков ПГ. BVOC влияют на процессы атмосферных аэрозолей и формирования облачности, а объем эмиссий связан с площадью бореальных лесов и структурными изменениями лесных экосистем. Другой географической зоной, оказывающей влияние на ускорение изменения климата, является Северный Ледовитый океан и его морские среды. Изменения арктического льда будут иметь как краткосрочные, так и долгосрочные последствия. Океанографические изменения арктических морей, площади морского льда, арктических течений связаны с глобальным климатом и динамикой погоды.

3 ПОВЕСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЕХ (F1)

3.1 КРУПНОМАСШТАБНАЯ СХЕМА И ВОПРОСЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНОГО РЕГИОНА

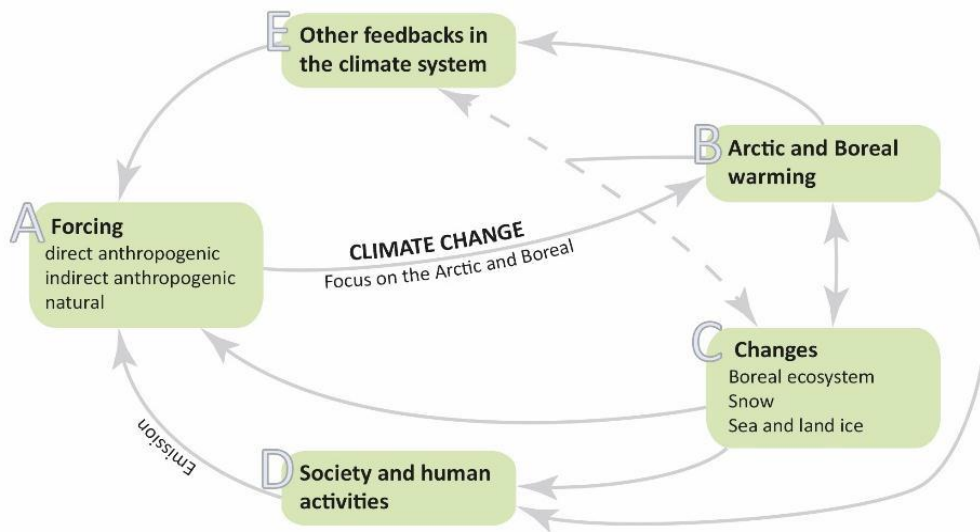


Рисунок 17 Крупномасштабная схема РЕЕХ.

СИНОПСИС Повестка исследований РЕЕХ сосредоточена на осмыслении сложных взаимосвязей системы суша-атмосфера-океан-общество в контексте Арктики, бореальных зон и регионов в Китае. РЕЕХ будет исследовать изменения и процессы, вызываемые взаимосвязанными факторами: (i) радиационный прогрев, (ii) потепление Арктики, (iii) изменение и обратные связи криосферы, (iv) изменения сообществ и деятельности человека, (v) обратные связи в климатической системе, (vi) обратные связи в системе биосферы (рис.17). Этот целостный исследовательский подход был перенят от действующего в настоящее время Скандинавского научно-исследовательского центра (NCoE) по взаимодействию криосферы и атмосферы в меняющемся климате Арктики (CRAICC), но он был расширен, чтобы охватить потепление и Арктики, и бореальных регионов.

Будущее изменение климата Арктики, включая роль бореальных лесов, является особым вопросом для северных научных сообществ. Нет четкого понимания того, почему климат в Арктике изменяется настолько быстро, и будет ли потепление Арктики продолжаться в будущем с такой же скоростью (Lu and Cai, 2010).

Главными компонентами системы являются Северный Ледовитый океан, различные экосистемы регионов северной Евразии, северные сообщества и мегаполисы. Изменение климата нарушает динамику глобальной климатической системы в целом, что влечет потепление Арктики и обширных регионов бореальных лесов. Одним из главных последствий потепления в северных широтах является изменение криосферы и состояния Северного Ледовитого океана, особенно изменения снежного и ледового покрова. Потепление в северных регионах повлияет на сообщества и деятельность человека. Экономический рост, связанный с демографическими тенденциями, урбанизацией, торговлей и использованием природных ресурсов, вызовет дальнейшее увеличение антропогенных эмиссий парниковых газов и изменит концентрации короткоживущих климатических факторов и, таким образом, усилит факторы влияния в Арктическо-Скандинавской системе.

3.2 КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ВОПРОСЫ И КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ

В данном разделе представлены крупномасштабные исследовательские вопросы (РЕЕХ-Q) по основным системам, а также по взаимодействиям и обратным связям. Каждый крупномасштабный исследовательский вопрос представлен как ключевая тема исследовательской повестки РЕЕХ.

Система суши

Q-1 Как определить регионы и процессы, особенно чувствительные к изменениям климата, и каковы наилучшие методы анализа их реакции?

Ключевая тема: меняющиеся процессы экосистемы суши

Q-2 Как быстро будет происходить таяние многолетней мерзлоты и как это повлияет на процессы в экосистемах и на обратные связи экосистемы и атмосферы, включая гидрологию и потоки парниковых газов?

Ключевая тема: зоны, где существует риск таяния многолетней мерзлоты

Q-3 Каковы структурные изменения и переломные моменты для экосистем севера?

Ключевая тема: структурные изменения экосистем

Система атмосферы

Q-4 Какие ключевые физические и химические процессы в атмосфере значительно влияют на климат?

Ключевая тема: состав и химия атмосферы

Q-5 Каковы ключевые обратные связи между качеством воздуха и климатом в высоких широтах и в Китае?

Ключевая тема: качество воздуха в городах, крупные города, изменяющийся атмосферный пограничный слой

Q-6 Как атмосферная динамика (погода синоптического масштаба, пограничный слой) изменится в арктическо-бореальных регионах?

Ключевая тема: погода и атмосферная циркуляция

Водные системы – Северный Ледовитый океан

Q-7 Как изменится площадь и толщина морского льда в Арктике и снежный покров на суше?

Ключевая тема: Северный Ледовитый океан в системе климата

Q-8. Каково совместное воздействие арктического потепления, опреснения океана, загрязняющей нагрузки и закисления на арктические морские экосистемы, первичную продуктивность и цикл углерода?

Ключевая тема: морская среда Арктики

Q-9 Какова будущая роль арктическо-бореальных озер, заболоченных земель и крупных речных систем (включая термокарстовые озера и проточные воды разных масштабов) в биогеохимических циклах и как скажутся эти воздействия на деятельность человека (жизнедеятельность, сельское хозяйство, лесное хозяйство, промышленность)?

Ключевая тема: озера, заболоченные территории и крупные речные системы Сибирского региона

Антропогенная деятельность

Q-10. Как деятельность человека (изменение землепользования, производство энергии, использование природных ресурсов, изменения энергоэффективности, использование возобновляемых источников энергии) будет влиять на дальнейшие изменения окружающей среды в регионе?

Ключевая тема: антропогенное воздействие

Q-11. Как изменения физического, химического и биологического состояния различных экосистем, внутренних вод, прибрежных зон влияют на экономику и сообщества в регионе и наоборот?

Ключевая тема: воздействие окружающей среды

Q-12 В каких направлениях населенные территории уязвимы перед изменением климата? Как может быть уменьшена их уязвимость, а их способность к адаптации увеличена? Какие реакции могут быть выявлены для адаптации к изменениям климата и смягчения их последствий?

Ключевая тема: стихийные бедствия

Обратные связи - взаимосвязи

Q-13 Как изменения состояния криосферы и последующие изменения в экосистемах повлияют на климат Арктики и погодные системы, включая риск стихийных бедствий?

Q-14 Каково суммарное воздействие различных механизмов обратной связи на (i) изменения почвенно-растительного покрова, (ii) фотосинтетическую активность, (iii) обмен парниковых газов и эмиссии биогенных летучих органических соединений, (iv) образование аэрозолей и облаков, а также радиационное воздействие? Как они изменяются в зависимости от изменения климата в региональном и глобальном масштабах?

Q-15. Как интенсивные урбанизационные процессы изменяют локальный и региональный климат и окружающую среду?

Ключевые темы Q 13-15: состав атмосферы, биогеохимические циклы: вода, углерод, азот, фосфор, сера

3.3 АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНАЯ СИСТЕМА СУШИ - КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ



3.3.1 ИЗМЕНЯЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ ЭКОСИСТЕМЫ СУШИ

СИНОПСИС Климатические условия влияют на структуру и функции всех арктических и бореальных экосистем. В будущем, многие процессы будут чутко реагировать на изменение климата, а также влиять на продуктивность и функции экосистем. Беспрецедентными последствиями этого могут стать, например, изменения масштабов экосистемных стоков углерода, образования газов-предвестников аэрозолей и альbedo поверхности.

Q-1 Как определить регионы и процессы, особенно чувствительные к изменениям климата, и каковы наилучшие методы анализа их реакции?

Бореальные леса – это один из крупнейших наземных биомов, они составляют около трети площади всех лесов на Земле (Global Forest Watch, 2002). Почти 70% бореальных лесов мира находится в Сибири. Лесная биомасса, почвы и торфяники в зоне бореальных лесов вместе составляют одно из крупнейших мировых хранилищ углерода (Bolin *et al.*, 2000; Kasischke, 2000; Schepaschenko *et al.*, 2013). Оно создавалось столетиями вследствие благоприятных условий для ассимиляции углерода растительностью, одновременно с низкими температурами, препятствующими его разложению микроорганизмами. Бореальные и арктические экосистемы оказывают значительное воздействие на глобальный углеродный баланс, благодаря большим площадям, покрытым лесом и огромным запасам углерода (~320 гигатонн углерода; GtC). Многолетняя мерзлота, крайне характерная для Сибири, хранит приблизительно 1672 GtC (Tarnocai *et al.*, 2009). Бореальные леса составляют основную зону растительности в водосборных бассейнах крупных речных систем, и, таким образом, являются важной частью глобальных обратных связей воды-энергии-углерода.

Лесная биомасса формирует положительную обратную связь с климатом через ожидаемые изменения температур и наличие биогенных элементов, что воздействует на депонирование углерода в поверхностной биомассе и в почве. Сибирские леса в настоящий момент рассматриваются как накопитель углерода, хотя с большой амплитудой неопределенности в 0-1 PgC yr^{-1} (Gurney *et al.*, 2002). Тем не менее, эти экосистемы чувствительны к глобальному изменению климата во многих отношениях, и воздействие на свойства и функционирование экосистем является весьма сложным. В то время как более высокие концентрации CO_2 в окружающей среде и более продолжительные вегетационные периоды могут усилить рост и продуктивность растений, а также накопление углерода в органическом веществе почвы (*e.g.* Ciais *et al.* 2005, Menzel *et al.*, 2006), потепление влияет на процесс дыхания и отношения экосистем с водой и действует в противоположном направлении (Bauerle *et al.*, 2012; Parmentier *et al.*, 2011). Ожидаемое усиление пожарных режимов может также существенно повлиять на баланс углерода в Арктике и бореальных регионах (Shvidenko and Schepaschenko, 2013).

Одним из примеров значительных обратных связей является важнейшая роль многолетней мерзлоты в поддержании экотона лиственничных лесов на севере Сибири. Бореальные леса в высоких широтах Сибири – это обширная, довольно однородная экосистема с преобладанием лиственницы. Общая площадь лиственничных лесов - приблизительно 260 млн. га, или около одной трети лесов России. Эти леса выживают в полуаридном климате благодаря уникальным симбиотическим взаимосвязям с многолетней мерзлотой – последняя дает достаточное количество воды, обеспечивая преобладание лиственницы, а лиственница, в свою очередь, блокирует излучение, защищая многолетнюю мерзлоту от интенсивного таяния в летний период. Ожидаемое потепление может разорвать эту тесную взаимосвязь и вызвать сильную положительную обратную связь, что усилит потепление еще больше.

Температура окружающей среды, интенсивность излучения, тип растительности и площадь листвы являются основным ограничением для биогенных летучих органических соединений (BVOCs) (Laothawornkitkul *et al.*, 2009). Это делает выбросы BVOC зависимыми от климата и изменений землепользования, например, через повышение продуктивности экосистем или экспансию лесов в регионы тундры. Хотя тормозящее действие CO₂ на уровне процессов может быть важным, "позеленение" Арктики может сильно повысить образование BVOCs в северных экосистемах (Arneeth *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2013). Открытая тундра может также выступать в качестве важного источника BVOCs, особенно если изменяется период снежного покрова (Aaltonen *et al.*, 2012; Faubert *et al.*, 2012). Это приведет к отрицательным климатическим обратным связям, включающим либо взаимодействия цикла аэрозоль-облако, либо аэрозоль-углерод (Kulmala *et al.*, 2013; 2014; Paasonen *et al.* 2013).

Таким образом, даже небольшие пропорциональные изменения в поглощении углерода экосистемами и в обороте углерода, находящегося в почве, могут превратить наземные экосистемы из накопителей углерода в его источник с соответствующими последствиями для концентрации CO₂ в атмосфере. В настоящее время мы не понимаем должным образом факторы, влияющие на накопление углерода, и связи между ассимиляцией углерода, испарением и образованием BVOC в условиях изменяющегося климата. Не вызывает сомнений то, что особенно в высоких северных широтах, изменения этих процессов могут быть весьма большими, и их воздействие может усилить или уменьшить изменение климата.

3.3.2 СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ

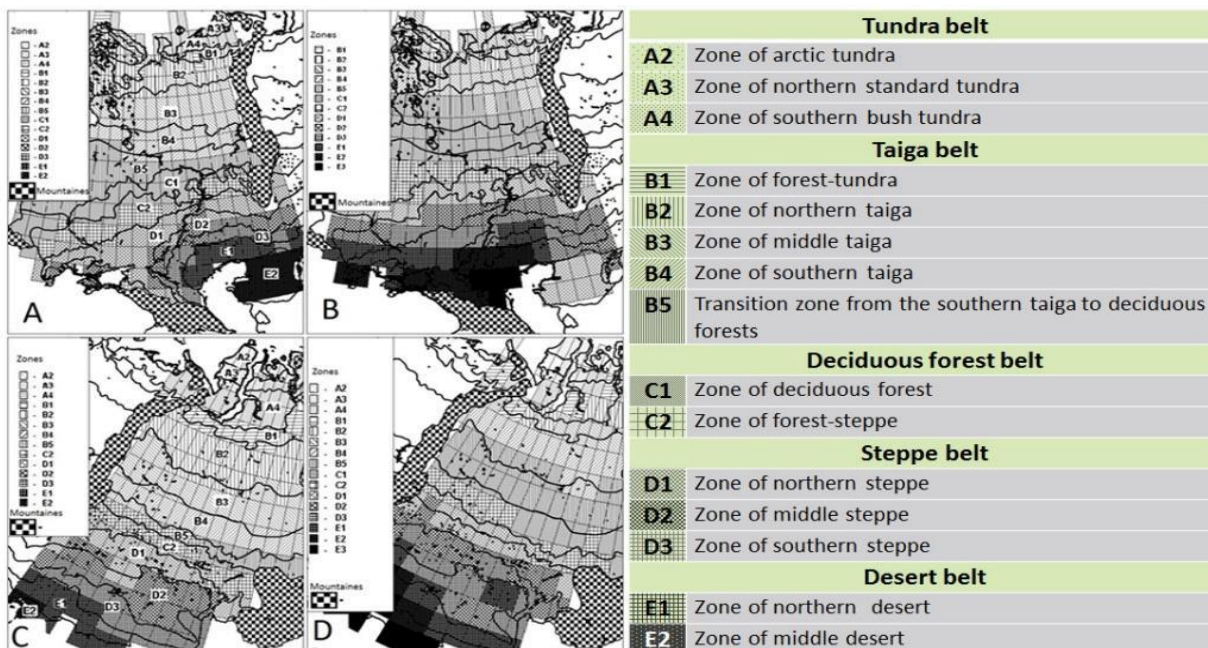


Рисунок 18 Текущий ботанический статус (А, С) клеток 2х2° и их потенциальные реакции (В, D) на изменение климата по климатическому сценарию IPCC A2 (середина XXI века). А и В – это область Восточно-Европейской равнины, С и D - Западная Сибирь. Изображение из книги «Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири». Под редакцией Николая Касимова и Александра Кислова. Москва, 2011, 493 стр. (издание на русском языке).

СИНОПСИС Для биогеографического региона РЕЕХ характерны сельскохозяйственные районы, степь, тундра, тайга, болота, мегаполисы и ледяные поля. Ожидаемое изменение климата и возрастающее антропогенное воздействие вызовут значительное перераспределение биоклиматических зон (рис.18) с последующими изменениями структуры, продуктивности и жизнеспособности экосистем суши. Многие из видов, обитающие в бореальных экосистемах, подвержены даже умеренным изменениям в окружающей среде. Структурные изменения экосистем тесно связаны с потребностями в адаптации, а также с разработкой эффективных стратегий смягчения негативных последствий и адаптации. Прогнозы, касающиеся смещения растительных зон, имеют большое значение для оценки воздействий региона на будущие глобальные бюджеты парниковых газов, биогенных летучих органических соединений и аэрозолей. Кроме того, природные и антропогенные стрессовые воздействия, такие как изменения землепользования и биотические и абиотические возмущения формируют экосистемы в Арктике и бореальных регионах и имеют много значимых обратных связей с климатом. При более теплом климате северные экосистемы могут стать восприимчивее к вспышкам массового размножения насекомых, засухам, разрушительным лесным пожарам и другим стихийным бедствиям. Также воздействие человека может привести к внезапным или постепенным изменениям в функционировании экосистем. Устойчивость экосистемы зависит и от скорости, и от масштабов этих изменений. В некоторых случаях изменения могут привести к системному дисбалансу и достичь переломного момента, после которого последствия становятся необратимыми.

Q-2 Каковы структурные изменения и переломные моменты¹ для экосистем севера?

¹ Gerald Marten et al.: “Переломный момент - это часть системы окружающей среды человека; он может воздействовать на далеко идущие изменения в системе. Достижение переломного момента запускает взаимно усиливающие друг друга петли обратной связи, которые переводят систему на совершенно новый курс”.

Большая годовая изменчивость климата характерна для северных экосистем. Изменчивость климата влияет на распространение видов, биоразнообразие, закономерности сукцессии, структуру, рост, продуктивность экосистем, а также на взаимодействие биотических и абиотических стресс-факторы в различных временных масштабах (*e.g.*, Lapenis *et al.*, 2005; Gustafson *et al.*, 2010; Shvidenko *et al.*, 2013a,b). Вследствие изменения климата в арктическо-бореальном регионе можно ожидать сдвиги растительности в больших масштабах. В результате потепления удлиняется вегетационный период, это стимулирует валовую первичную продуктивность экосистем и предполагает значительное увеличение в объеме биомассы вслед за повышенной способностью поглощать углерод. Из-за повышенной продуктивности рост биомассы растений увеличивается, граница произрастания древесной растительности продвигается вперед, и открытые ранее пространства тундры превращаются в местности, покрытые кустарниками, или в леса; это явление известно как «позеленение» Арктики (Myneni *et al.*, 1997; Xu *et al.*, 2013). Прогнозы о масштабах этого процесса существенно различаются (Tchebakova *et al.*, 2009; Hickler *et al.*, 2012; Shvidenko *et al.*, 2013a,b). По оценкам сдвиг биоклиматических зон в Сибири к северу составит 600 км к концу века (Tchebakova *et al.* 2009). Принимая во внимание, что естественное смещение пород деревьев, характерных для бореальной среды, не превышает 200-500 м в год, то такой прогноз предполагает серьезные изменения растительности на огромных территориях региона. Некоторые другие модели предсказывают менее драматические изменения (Yan and Shugart 2005; Gustafson *et al.* 2010). Тем не менее, все модели прогнозируют четко выраженные изменения в растительном покрове, оказывающие воздействие на распространение, жизнеспособность и продуктивность леса, а также углеродные и водные циклы экосистем. Изменение продуктивности и распространения растительности также будет иметь последствия для состава и объема потоков биогенных летучих органических соединений (Arneeth *et al.*, 2007; Noe *et al.*, 2011; 2012; Walter *et al.*, 2006; Zimov *et al.*, 2006a,b; Schuur *et al.*, 2008).

Торфяники являются типичной экосистемой для высоких широт. Они содержат от 20 до 30% наземного углерода в мире. Торфяники занимают относительно небольшую часть площади суши, около 3%, но они являются важным мировым хранилищем углерода, и действуют как маленькие, но постоянные накопители CO₂ и умеренные источники CH₄ (Frolking *et al.*, 2011). В России количество углерода в торфе в верхнем метровом слое оценивается примерно в 115 PgC (Schepaschenko *et al.*, 2013). Деградация торфяников и их ускоренное разложение являются основными факторами в определении силы источников и стоков в экосистеме. Кроме того, таяние многолетней мерзлоты в торфяниках тундры может изменить эти экосистемы, превращая устойчивую систему в динамическую мозаику суша-вода. Эти изменения могут сильно повлиять на циклы парниковых газов.

Процессы, лежащие в основе эмиссий CH₄ торфяников, сложны и зависят от ряда климатических, ландшафтных и связанных с растительностью переменных, таких как разливы, толщина горизонта грунтовых вод, состав растительности и температура почвы. Торфяники широко осваивались уже в далеком прошлом (O'Sullivan 2007), сегодня деятельность на них варьируется от дренирования и добычи торфа до устройства сельскохозяйственных плантаций и лесов. Полное понимание климатического эффекта от освоения торфяников остается трудным вопросом (Maljanen *et al.* 2010).

Каждый год горит около 1% бореальных лесов (Gromtsev, 2002; Hytteborn *et al.*, 2005), и это число, как ожидается, увеличится с изменением климата. Лесные пожары вызывают большие изменения в экосистемах, например, воспроизводство лесных насаждений и разрушение многолетней мерзлоты воздействуют на инфраструктуру (дороги и трубопроводы) (Jafarov *et al.*, 2013). При пожаре органическое вещество почвы быстро высвобождается в атмосферу. Помимо прямых эмиссий CO₂ огонь влияет на баланс углерода и азота в экосистемах через экологический контроль циклов углерода и азота, а также структуру и продуктивность послепожарного леса. Лесные пожары также влияют на альbedo поверхности, они образуют большое количество сажи, которая распределяется глобально.

Изменения альbedo, связанные с растительностью, в совокупности с изменениями в накоплении CO₂ в растительности и в образовании аэрозолей, связанных с BVOC, ведет к потенциально большим климатическим обратным связям. Однако, эти обратные связи в настоящее время недостаточно хорошо определены. Альbedo поверхности зависит от изменений в растительном покрове и от криосферных процессов, таких как изменения снежного и ледового покрова. Альbedo поверхности определяет долю падающего солнечного излучения, которое отражается обратно в атмосферу, и, таким образом, является ключевым параметром в бюджете излучаемой энергии Земли. Изменения в растительном покрове могут привести к изменениям альbedo, более низкое альbedo ведет к более высокому чистому поглощению излучения лесами по сравнению с открытой растительностью. Это приводит к изменениям суммарного излучения, и, таким образом, изменяет локальные потоки тепла и воды, влияет на параметры пограничного слоя, и, кроме того, влияет на климат в местном и более крупном масштабе (Sellers *et al.*, 1997).

Для моделирования ожидаемых крупных структурных изменений потребуется развитие нового поколения различных моделей растительности. Эти модели разнообразны – от ландшафтных моделей сукцессии и природных возмущений, экофизиологических моделей, включающих зоны критических изменений климатических и экологических показателей (Gustafson, 2013) до моделей, описывающих, как микроорганизмы в многолетней мерзлоте будут реагировать на ее таяние, т.е. как это отразится на таких процессах как дыхание, ферментация, метаногенез, окисление метана и нитрификация-денитрификация.

Устойчивость экосистем, переломные моменты

Экосистемы не только не выигрывают от изменения климата, но и страдают от повышенного состояния напряжения и деградации. Устойчивость означает способность экосистемы реагировать на возмущения путем сопротивления негативному воздействию и быстрого восстановления (Holling, 1973). Такие возмущения могут включать стохастические события, такие как пожары, наводнения, ураганы или вспышки численности популяции насекомых-вредителей, а также деятельность человека, такую как вырубка леса или введение чужеземных видов растений или животных. Возмущения большого масштаба или продолжительности могут глубоко повлиять на экосистему и довести ее до такого состояния, когда преобладающими станут другие режимы процессов и структур.

Северные экосистемы развивались в течение голоцена в условиях устойчивого холодного климата с регулярными сезонными режимами температуры и осадков. Это особенно важно для бореальных

лесов в связи с продолжительным жизненным периодом большинства видов (в нерегулируемых человеком лесах) или долгими периодами оборота рубки (в управляемых лесах) при ограниченной акклиматизационной способности. Весьма вероятно, что бореальные леса будут находиться под сильным воздействием вследствие (i) крупных изменений гидрологических режимов на огромных территориях в результате таяния многолетней мерзлоты; (ii) общего потепления и зимы, и лета; (iii) усиления режимов возмущений, особенно пожаров, вспышек болезней и насекомых, одновременно с сильным антропогенным воздействием (Krankina *et al.*, 1997; Shvidenko *et al.*, 2013a,b).

Потепление климата, изменение осадков в течение периода роста и таяние многолетней мерзлоты значительно увеличат недостаток воды в растениях, что, в свою очередь, увеличит риск гибели деревьев. Этот процесс заметно усиливается по всему приполярному бореальному поясу (Allen *et al.* 2010). В результате, экосистемы могут превратиться из накопителей углерода в его источники (Parmentier *et al.*, 2011).

В будущем, бореальные леса могут пострадать от суховершинности из-за массового заражения инвазивными патогенами или нашествия насекомых, таких как пяденица осенняя (*Epirrita autumnata*), численность которых ранее контролировалась климатически во время суровых зим. Рост и жизненные циклы насекомых или условия их обитания могут изменяться таким образом, что частота и интенсивность вспышек ранее относительно безобидных популяций возрастает (Hunter *et al.*, 2014).

Помимо влияния меняющегося климата бореальная растительность также подвергается усиленным антропогенным воздействиям от осадения загрязняющих веществ и изменения землепользования (Dentener *et al.*, 2006, Bobbink *et al.*, 2010; Savva and Berninger, 2010). Крупные промышленные комплексы могут привести к суховершинности участков леса, как это наблюдается на Кольском полуострове (*e.g.* Tikkanen, 1995; Nöjd and Kauppi, 1995; Kukkola *et al.*, 1997). Социальные преобразования могут привести к оставлению сельскохозяйственных земель или деградации ранее управляемых лесов.

Редко существует единая и понятная причина появления суховершинности, чаще экосистемы страдают от многочисленных стрессов одновременно. Это означает, что один стресс-фактор может не быть очень критичным для устойчивости системы, но при одновременном действии нескольких система может достигнуть переломного момента, что может иметь драматические последствия.

3.3.3 ТЕРРИТОРИИ С РИСКОМ ТАЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

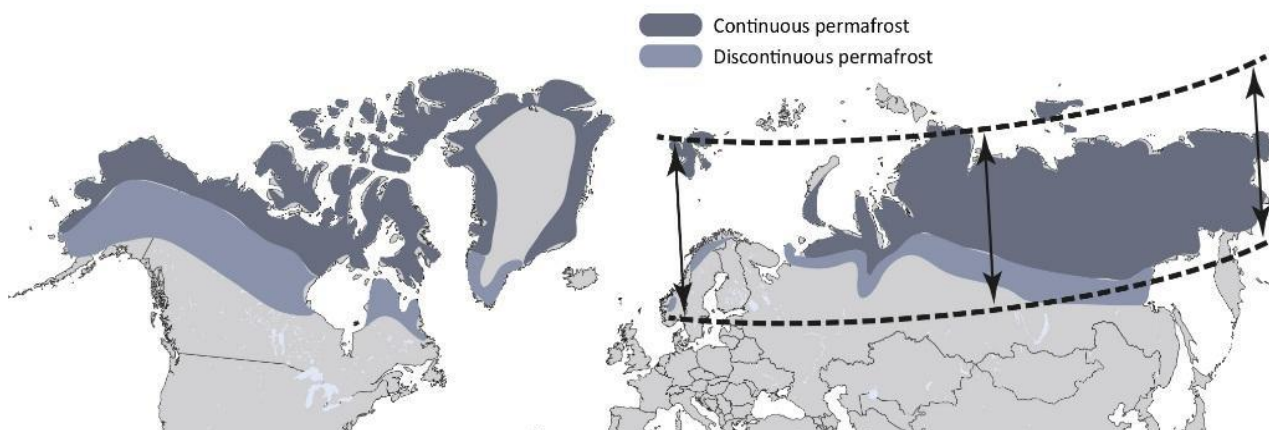


Рисунок 19 Многолетняя мерзлота Арктики

СИНОПСИС Большая часть географического региона северной Евразии покрыта сплошной многолетней мерзлотой (рис.19). Даже небольшие в процентном отношении изменения в круговороте накопленного в почве углерода вследствие таяния многолетней мерзлоты превратят наземные экосистемы из накопителя углерода в его источник. Поведение вечномёрзлых грунтов тундры важно для глобального климата в отношении всех парниковых газов. В основе этих сценариев лежит острая необходимость проведения систематического мониторинга многолетней мерзлоты с измерением парниковых газов в различных экосистемах. Интерпретация состояния многолетней мерзлоты в климатических моделях до сих пор недостаточно разработана.

Q-3 Как быстро будет происходить таяние многолетней мерзлоты и как это повлияет на процессы в экосистемах и на обратные связи экосистемы и атмосферы, включая гидрологию и потоки парниковых газов?

Многолетняя мерзлота (температура грунта равна или ниже 0°C на протяжении более 2-х лет) весьма типична для Арктики (25 % суши в Северном полушарии и 50 % территории России и Канады). С потеплением климата многолетняя мерзлота также становится теплее и тает, что имеет много последствий для циклов углерода и воды, а также для функционирования экосистем. Эти обратные связи до сих пор недостаточно поняты.

Наземная биосфера является ключевым регулятором химического состава атмосферы и климата через способность поглощать углерод (Arneeth *et al.*, 2010a,b; Heimann and Reichstein, 2008). Евразия содержит большой пул органического углерода как в почве и в замерзшем грунте, накопленного в течение голоцена и последнего ледникового периода, так и в живой биоте (как над землей, так и под ней). Содержание углерода в почве (верхние три метра) в циркумполярных экосистемах высоких северных широт оценивается в количестве между 1400 и 1850 Пг (McGuire *et al.*, 2009; Rarnocai *et al.*, 2009). Около 400 Пг углерода, располагающегося в замерзших грунтах, было накоплено в неохваченных оледенением областях во время плейстоцена, являвшихся тогда растительностью степей и тундры (Zimov *et al.*, 2006a,b). Помимо этого, приблизительно 250 Пг может храниться в глубоких аллювиальных отложениях ниже 3м в дельтах семи крупнейших арктических рек (Schuur *et al.*, 2008). Из-за этих крупных хранилищ даже небольшие изменения процессов, влияющих на выбросы углерода, могут оказать значительное воздействие на поведение глобального климата.

В экосистемах высоких широт с большим, неподвижным пулом углерода в торфе и почве, будущий суммарный обмен CO_2 и CH_4 будет зависеть от степени таяния многолетней мерзлоты у поверхности, локальных тепловых и гидрологических режимов и взаимодействия с циклом азота (Tharnocai et al 2009). Избыточная теплота, создаваемая во время разложения веществ микроорганизмами, может увеличить скорость обмена в слое почвы над многолетней мерзлотой, и, возможно, вызвать внезапный и быстрый выброс углерода, хранящегося в богатых углеродом лёссах плейстоцена в Сибири (Khvorostyanov et al., 2008).

Динамика многолетней мерзлоты может влиять на потоки метана во многих отношениях. Грязевые бассейны, выбрасывающие большое количество CH_4 , могут формироваться при таянии вечномёрзлых болот. С другой стороны, в результате фильтрации почвенных вод исчезли озера (Smith et al., 2005). Быстрое исчезновение льда летом вместе с повышением температуры и таянием пластов льда, приводит к береговой эрозии, активации старого углерода и повышению эмиссий CO_2 и CH_4 от морских донных отложений (Vonk et al., 2012). Большие эмиссии метана наблюдались на востоке сибирского арктического шельфа (Shakhova et al., 2010).

Крайне важным аспектом является связь между климатом и тепловыми условиями в подповерхностных слоях (почва и коренная порода) в ближайшие десятилетия. Потепление атмосферы неизбежно приведет к потеплению слоя многолетней мерзлоты, что прослеживается в температурных данных глубоких скважин. Однако изменения зависят не только от типа грунта и породы, а также от жидкостей, заполняющих поры. Так как поры в настоящее время заполняет лед, климатические изменения отражаются, в основном, на толщине активного слоя и медленном изменении температуры в самом слое многолетней мерзлоты. В местах, где доминируют низкие температуры грунта и толстые слои пористых слоев почвы (например, песок, ил, торф), латентная теплота льда, заполняющего поры, будет эффективным «буфером» и замедлит окончательное таяние. Это одна из причин, почему относительно старая многолетняя мерзлота существует на мелких глубинах в почвах с высокой пористостью. С другой стороны, совершенно отличные условия преобладают в областях с низкой пористостью, например, в местах залегания кристаллических пород.

3.4 АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНАЯ АТМОСФЕРНАЯ СИСТЕМА – КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ



3.4.1 ХИМИЯ И СОСТАВ АТМОСФЕРЫ

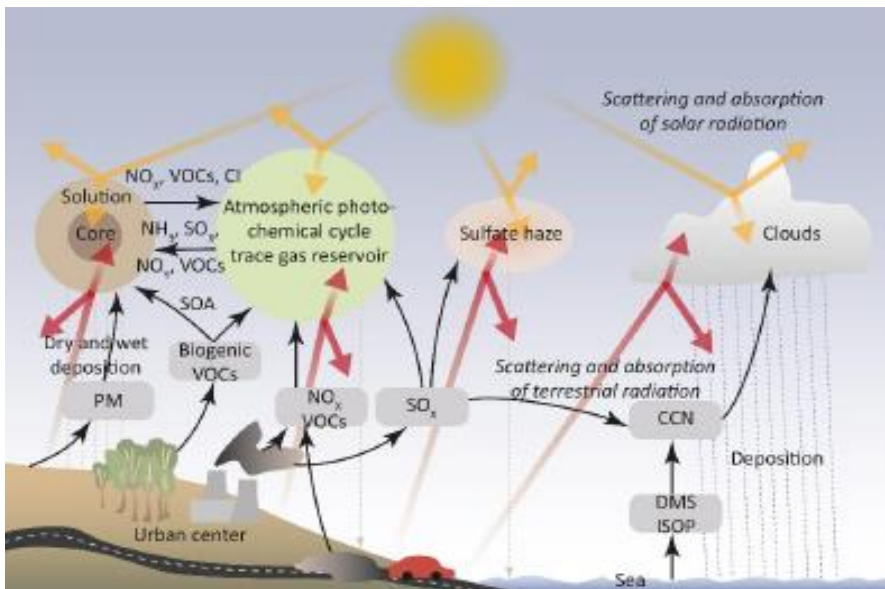


Рисунок 20 Взаимодействия в атмосферной системе. Изображение адаптировано из Zhang (1994) и Zhang (2007).

СИНОПСИС Важнейшими антропогенными климатическими факторами являются парниковые газы (ПГ) и частицы аэрозоля. Ожидается, что особенно в Арктике при изменении климата появятся некоторые обратные связи, связанные с аэрозолями и ПГ. К этому можно добавить, что арктическая среда также весьма чувствительна к изменениям концентрации и состава аэрозолей. Концентрации аэрозолей зимой и весной в Арктике находятся под воздействием «Арктического тумана» (Shaw, 1995); предполагается, что это явление возникает вследствие переноса загрязняющих веществ с более низких широт (Stohl, 2006) и затем усиливается сильной стратификацией атмосферы Арктики в зимнее время (Asmi *et al.*, 2012).

Q-4 Какие ключевые физические и химические процессы в атмосфере значительно влияют на климат?

Атмосферные парниковые газы и озон

Существует острая необходимость в лучшем ограничении бюджета источников и накопителей ПГ (CO_2 , CH_4) в регионе исследования РЕЕХ, особенно в Сибири, и количественном описании атмосферного воздействия эмиссий CH_4 важнейших природных экосистем (болота, многолетняя мерзлота). Важно выявлять и наблюдать антропогенные источники короткоживущих загрязняющих веществ (CO , O_3 , сажа, тонкие частицы), а также охарактеризовать их перенос на большие расстояния по Евразии (рис.20). Новые данные по ПГ необходимы для валидации атмосферных

моделей и моделей потоков на суше. Для своей успешной реализации подход РЕЕХ требует применение наземной и спутниковой аппаратуры для сбора данных по крупному и недостаточно исследованному региону. Необходимо охарактеризовать локальные источники, особенно лесные пожары и их воздействия на качество воздуха в регионе и в Арктике.

Сейчас осуществляется очень мало программ измерений для документирования тропосферного состава в Сибири (Crutzen et al., 1998; Ramonet et al., 2002; Paris et al., 2008; Sasakawa et al., 2010; Kozlova et al., 2008). Поэтому, в настоящее время имеется значительная неопределенность знания о биогеохимии, а также распределении и эмиссиях соединений, влияющих на химию тропосферы и изменение климата. Соответствующие соединения, требующие дальнейших измерений, включают CO_2 и CH_4 для биогеохимических циклов и CO , O_3 и аэрозоли, включая сажу, для тропосферного состава. Другие индикаторы, которые требуют дальнейшего изучения, включают стабильный изотопный состав CO_2 и CH_4 для определения источников и стоков этих соединений в рассматриваемом регионе.

Биомы высоких широт влияют на глобальный бюджет метана (Bousquet et al., 2006) несколькими способами, включая эмиссии водно-болотных угодий, реактивацию бактериальной активности вследствие таяния многолетней мерзлоты (Zimov et al., 2006a,b), образование пузырей в термокарстовых озерах (Walter et al., 2006) и возможную дестабилизацию гидратов метана в многолетней мерзлоте прибрежной зоны. Ожидается, что в теплеющем климате эти измененные процессы повлияют на глобальный радиационный прогрев и, следовательно, на дальнейшее изменение климата. Наше нынешнее понимание протяженности и амплитуды этих источников, а также крупномасштабных движущих факторов остается весьма неопределенным (Bloom et al., 2010). Антропогенные эмиссии CH_4 в результате утечек природного газа из газопроводов также не достаточно хорошо оценены количественно. Кроме того, в результате потепления, происходящего в северных регионах России, там, скорее всего, будет вестись дополнительная разработка запасов природного газа. В связи с отсутствием региональных наблюдений, можно только предполагать на основе зональных градиентов, что недавно возобновленное повышение глобальных атмосферных концентраций CH_4 было вызвано необычно высокой температурой в высоких северных широтах в 2007 году (Dlugokencky et al., 2009).

Несмотря на огромные размеры и значение Сибири в климатической системе, очень мало известно о том, как отличается региональный бюджет O_3 от остальной части северного полушария (Berchet et al., 2013). Например, образование O_3 в шлейфах лесных пожаров в бореальных регионах кажется слабее по сравнению со шлейфами пожаров на более низких широтах (Jaffe and Wigder, 2012). Это может происходить в связи с более низкими эмиссиями NO_x и/или большим депонированием NO_x как PAN (пероксиацилнитрат). Также, учитывая важность для качества воздуха и глобального бюджета парниковых газов, требуется проводить больше атмосферных измерений O_3 , его предвестников и других загрязняющих веществ над Сибирью (см. Elansky, 2012). Эти данные особенно полезны для валидации моделей химического состава атмосферы и спутниковых продуктов. Эмиссии NO_x и ЛОС (летучих органических соединений) от антропогенных и биогенных источников ответственны за образование и/или разрушение O_3 с подветренной стороны источников (обзор в НТАР, 2010). Наблюдения в Арктике и субарктических районах выявили образование O_3 в загрязнении и шлейфах горения биомассы во время переноса (e.g. Oltmans et al., 2010; Jaffe and Wigder, 2012; Thomas et al., 2013). Разрушение озона также было зафиксировано в

некоторых шлейфах от горения биомассы или антропогенном загрязнении (e.g. Verma et al., 2009; Alvarado et al., 2010). Озон теряется в результате фотохимического разрушения, которое следует за фотолизом, и последующей реакции атомарного кислорода в возбужденном состоянии с водяным паром. Галогенное окисление в нижних слоях тропосферы в Арктике (Gilman et al., 2010; Sommar et al., 2010) также может привести к значительному разрушению О₃, но это, как правило, относится к пограничному слою Арктики в весеннее время. Другим важным стоком О₃ является сухое осаждение в листьях посредством устьичного обмена, что наносит вред растительности.

Примеры исследовательских вопросов - парниковые газы

Каковы основные антропогенные источники CO₂, аэрозольных частиц и их предвестников в Евразии? Как они распределены по территории, как они изменяются во времени?

Какие климатические параметры влияют на сезонные и межгодовые изменения региональных концентраций CO₂ в атмосфере?

Атмосферные аэрозоли

Для климата наиболее важным типом природного аэрозоля над большей частью Евразии является вторичный органический аэрозоль (SOA), получаемый в ходе атмосферного окисления биогенных летучих органических соединений (BVOC), эмитируемых бореальными лесами и, возможно, другими экосистемами. Исследования, проведенные в Скандинавской части бореальной зоны, указывают, что образование новых частиц, связанное с эмиссиями биогенных летучих органических соединений – это основной источник аэрозольных частиц и облачных ядер конденсации в летний период (Mäkelä et al., 1997, Kulmala et al., 2001, Tunved et al., 2006, Dal Maso et al., 2008). Ожидается, что вторичные органические аэрозоли, связанные с биогенными летучими органическими соединениями, окажут значительное косвенное радиационное воздействие на зону бореальных лесов (Spracklen et al., 2008; Tunved et al., 2008; Lihavainen et al., 2009) при условии, что результаты исследований, полученные для Скандинавии, применимы и для больших пространственных масштабов. Продолжительные измерения аэрозолей, проведенные в последние годы на двух станциях в Западной Сибири, выявили частоту и сезонную зависимость образования новых частиц (Arshinov et al., 2012). Образование новых частиц в Сибири происходит примерно в четверти всех дней, чаще всего весной (с марта по май) и ранней осенью (вторичный пик в сентябре). Наблюдаемый сезонный характер частоты события сходен с наблюдаемым на скандинавских станциях (Dal Maso et al., 2008).

Другие важные виды природного аэрозоля в регионе исследования РЕЕХ - это морские брызги, минеральная пыль и первичные биогенные аэрозольные частицы. Морские брызги составляют важную часть атмосферных аэрозолей над Северным Ледовитым океаном и его прибрежными районами, а также влияют на свойства облаков над этим регионом. Ожидается, что климатическое воздействие морских брызг изменится в будущем в результате изменений морского ледового покрова и температуры океана (Struthers et al., 2011). Частицы минеральной пыли влияют на климат и качество воздуха в крупных регионах Азии, особенно в периоды сильных ветров и незначительных осадков. Минеральная пыль и первичные биогенные аэрозольные частицы (PВАР) также являются эффективными ледяными ядрами (Hoose and Möhler, 2012), они имеют возможность

влиять на радиационные и другие свойства смешанных холодных облаков в регионе исследования РЕЕХ.

За последние десятилетия изменения эмиссий антропогенных аэрозолей и их предвестников в регионе исследования РЕЕХ были весьма значительными (Granier *et al.*, 2011), и это почти наверняка повлияло на очень разные региональные режимы потепления в этих областях (*e.g.* Shindell and Faluvegi, 2009). Основные аэрозольные компоненты в данном контексте – это первичные углеродсодержащие частицы, состоящие из органического углерода и сажи, а также вторичные сульфатные частицы, полученные в ходе атмосферного переноса диоксида серы. Антропогенные аэрозоли вызывают большие возмущения в региональном радиационном балансе с подветренной стороны от основных районов с источниками эмиссий в регионе исследования РЕЕХ, а последующие изменения свойств облаков и режимов атмосферной циркуляции могут проявляться даже вдали от этих источников (Koch and Del Genio, 2010; Persad *et al.*, 2012). В заснеженных районах Евразии аэрозоли, перенесенные из отдаленных областей, содержащие сажу и осевшие на снегу (рис.21), как правило, усиливают весеннее и летнее таяние снега с сопутствующим потеплением в этом регионе (Flanner *et al.*, 2009; Goldenson *et al.*, 2012).

Аэрозоли, эмитируемые в ходе лесных пожаров, являются особым случаем в рамках исследований РЕЕХ, так как сила этого типа источника зависит и от изменения климата, и от поведения человека (Pechony and Shindell, 2010), а также потому, что частицы, эмитируемые в ходе этих пожаров, имеют потенциально большое радиационное воздействие на весь регион (Randersson *et al.*, 2006).

Атмосферный перенос загрязняющих веществ

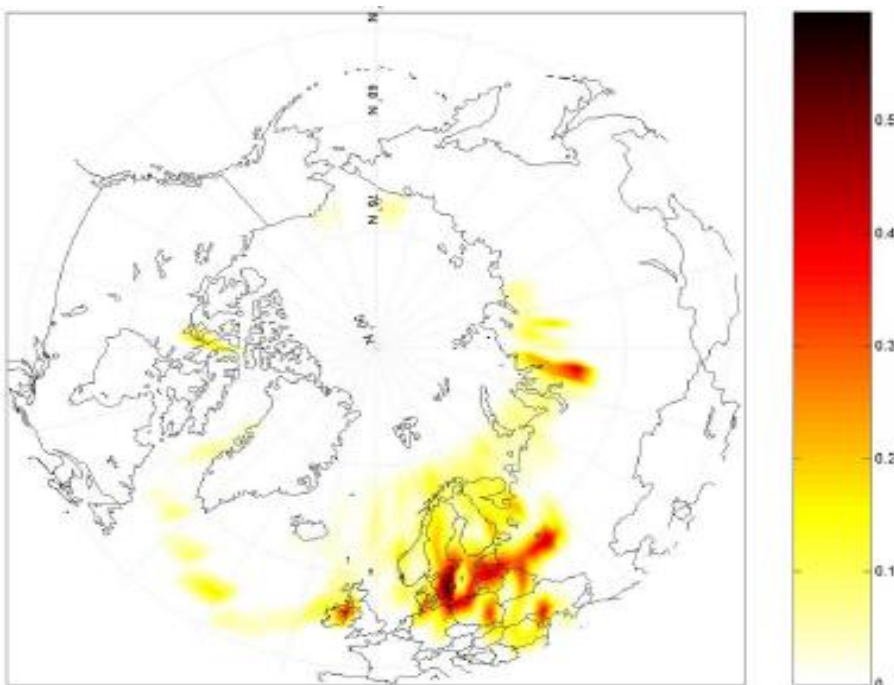


Рисунок 21 Относительная вероятность вклада в загрязнение Арктики сажей, наблюдения на станции Zeppelin. Регионы с источниками эмиссий сажи определены с помощью модели PSCF (функция вклада потенциального источника) и измерений сажи на станции Zeppelin в летний период (с мая по октябрь), 2001-2007 гг. Изображение предоставлено Kostas Eleftheriadis.

Атмосферные загрязняющие вещества, выбрасываемые в результате деятельности человека в промышленных регионах средних широт Северного полушария быстро перемещаются на большие расстояния в результате действия механизмов атмосферного переноса. Особый интерес представляет перенос этих загрязняющих веществ в арктические районы (рис.21), где они могут влиять на радиационный бюджет и климат различными способами (Warneke *et al.*, 2009). Межконтинентальный перенос загрязняющих веществ вызывает все большую озабоченность из-за его потенциального воздействия на качество воздуха на региональном уровне. Влияние Китая и его загрязненных мегаполисов на арктические и бореальные районы является одним из ключевых вопросов. Чтобы понять атмосферный перенос, необходима сеть станций в сочетании с региональными и химическими моделями переноса, а также дистанционным зондированием.

Основные маршруты переноса загрязнения качественно отличаются между Северной Азией (включая Сибирь), Западной Европой и Северной Америкой. Результаты моделирования показывают, что загрязняющие вещества, имеющие европейское происхождение, преимущественно рассеиваются к востоку над Сибирью летом или к северо-востоку по направлению к Сибири и Арктике зимой (Stohl and Eckhardt, 2004, Wild *et al.*, 2004; Duncan and Bey, 2004). Эмиссии из Европы остаются в основном на высоте ниже 3000 м во время переноса на восток. Модельные исследования, проведенные в рамках Оперативной рабочей группы по переносу атмосферных загрязняющих веществ в полушарии (TF-НТАР), под эгидой «Конвенции по переносу на большие расстояния атмосферных загрязняющих веществ» (CLRTAP) показали, что загрязнение, происходящее с территории Европы, является основным источником фоновых уровней загрязняющих веществ в Азии (e.g. Fiore *et al.*, 2009).

В то время как экспорт загрязняющих веществ из Северной Америки и Азии изучался в ходе интенсивных полевых кампаний (Fehsenfeld *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2006), экспорт и перенос загрязняющих веществ на большие расстояния из Европы через Сибирь остался практически без внимания. Спутники предоставляют информацию о пространственном распределении, но часто восстановления имеют низкую чувствительность в нижней тропосфере (Pommier *et al.*, 2010), что делает валидацию наблюдениями *in-situ* обязательной. Кроме того, эмиссии от лесных пожаров (van der Werf *et al.*, 2006) и от контролируемых сельскохозяйственных выжиганий в Южной Сибири, Казахстане и Украине (Korontzi *et al.* 2006) в весенне-летний период являются крупными источниками малых газовых компонент, таких как СО (Nédélec *et al.*, 2005) и аэрозолей, которые могут оказать существенное влияние на химический состав атмосферы над Сибирью, и в более общем плане на бюджет СО Северного полушария (Wotawa *et al.*, 2001).

3.4.2 КАЧЕСТВО ВОЗДУХА В ГОРОДАХ, МЕГАПОЛИСЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

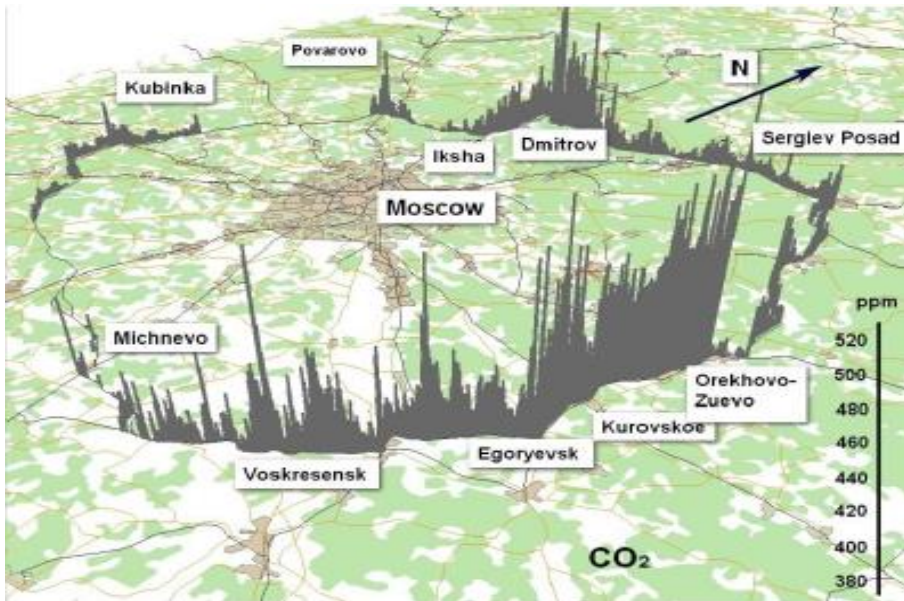


Рисунок 22 Пример концентраций CO_2 в окрестностях мегополиса (Москва). Изображение Nikolay Elansky.

СИНОПСИС Урбанизированные среды в проекте РЕЕХ в основном представлены городами в России и Китае с сильными антропогенными выбросами местной промышленности, транспорта и жилого фонда, а также мегалополисами, такими как Москва и Пекин с вызывающими обеспокоенность уровнями загрязнения воздуха (рис.22). Плохое качество воздуха оказывает серьезное воздействие на здоровье населения и наносит вред экосистемам. Кроме того, атмосферные загрязняющие вещества и оксиданты (SO_2 , O_3 , NO_x , сажа, сульфаты, вторичные органические аэрозоли) играют центральную роль в динамике изменения климата посредством прямого и косвенного воздействия на глобальное альbedo и лучистый перенос.

Q-5 Каковы ключевые обратные связи между качеством воздуха и климатом в высоких широтах и в Китае?

Основные источники эмиссий, оказывающие влияние на климат, в различных регионах Евразии являются важными объектами для исследования. Особый акцент делается на источники загрязнения Арктики, такие как дизельные станции, газовые факелы и судоходство.

Россия

Среди российских и европейских городов качество воздуха в некоторых сибирских городах (например, Норильск, Барнаул, Новокузнецк) вызывает особую тревогу. В сибирских городах качество воздуха сильно связано с климатическими условиями типичными для Сибири. Устойчивая стратификация атмосферы и температурные инверсии являются преобладающими погодными условиями на протяжении более полугода. Это способствует накоплению различных загрязняющих веществ в нижних слоях атмосферы, таким образом, усиливается их воздействие на экосистемы и людей. Кроме суровых климатических условий, антропогенное воздействие на окружающую среду в промышленных областях и больших городах продолжает увеличиваться.

Основные источники загрязнения атмосферы в Сибири подразделяются на антропогенные (промышленность, транспорт, сжигание и т.п.) и природные источники эмиссий (биогенные

выбросы, природные пожары, пыльные бури, морские аэрозоли, извержения вулканов, пыление растений и т.п.). Они могут быть различных типов, иметь различные характеристики и динамику, включать локальные, региональные и внешние источники, аварийные выбросы и т.п. Основные загрязняющие вещества можно подразделить на токсичные, воздействующие на климат и повреждающие экосистемы газы и аэрозоли. Основными кислотообразующими веществами в атмосфере являются SO_2 , сульфат (SO_4^{2-}) и NO_x . Эмиссии диоксида серы в основном связаны с точечными источниками, такими как электростанции, целлюлозно-бумажная промышленность, выплавка цветных металлов, переработка нефти и газа. С добычей нефти и газа связаны эмиссии отработанного газа, содержащего CO_2 , NO_x , SO_x и летучие органические соединения (ЛОС). Все эти загрязняющие вещества взаимосвязаны и вся система является очень нелинейной.

Китай

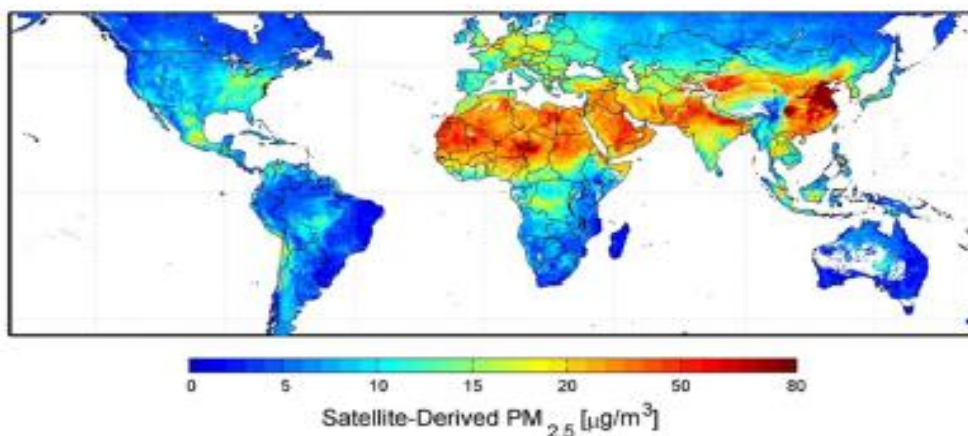


Рисунок 23 Глобальное распределение $\text{PM}_{2.5}$ (твердые примеси) (van Donkelaar et al., 2010)

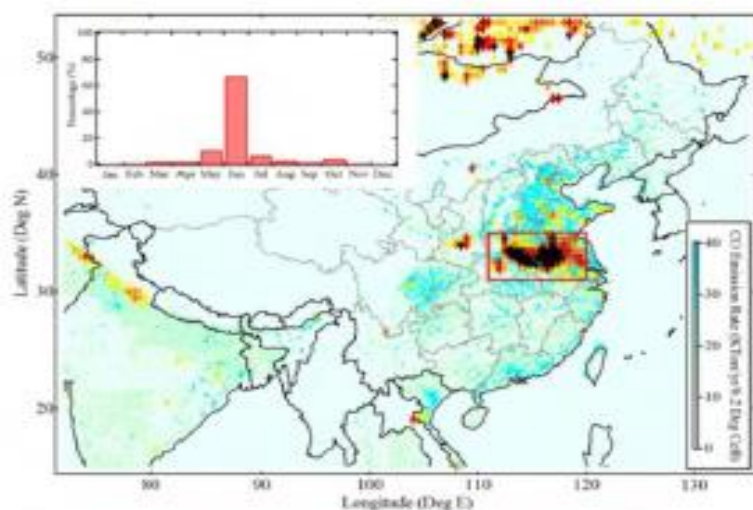


Рисунок 24 Карта, демонстрирующая антропогенные выбросы CO (Zhang et al., 2010) и усредненные данные по открытым пожарам за 2002-2012 в Азии на основе продукта Modis Коллекция 5 открытые пожары. В верхнем левом углу показаны сезонные изменения месячной процентной величины открытых пожаров за 11-летний период. Примечание: цвет (от желтого до черного) и размер ромбов представляют интенсивность пожаров (Ding et al., 2013b).

В настоящее время Азия является одним из регионов с наиболее сильным загрязнением воздуха (рис.23). Загрязнение воздуха в странах Азии с муссонным климатом имеет две главные характеристики. Во-первых, очень большой уровень эмиссий от сжигания ископаемого топлива, отсюда, высокие концентрации первичных и вторичных загрязняющих веществ в Азии, особенно в

восточном Китае и северной Индии. Наблюдения показывают, что Азия является единственным регионом, где эмиссии основных загрязняющих веществ, таких как NO_x (Ritcher *et al.*, 2005) и O₃ (Ding *et al.*, 2008) продолжают расти. Во-вторых, кроме антропогенных загрязнителей от сжигания топлива, страны Азии с муссонным климатом также подвергаются загрязнению от горения биомассы и пыльных бурь. Например, весной в южной Азии и летом в Сибири часто возникают сильные лесные пожары, а в июне на севере и востоке равнинного Китая имеет место интенсивная деятельность по сжиганию соломы (рис.24). В пустынях Такла-Макан и Гоби на северо-востоке Китая часто возникают пыльные бури, пыль от них зачастую переносится на восток и юг Китая, в Тихий океан и даже по всему земному шару (Nie *et al.*, 2014). Было выявлено, что горение биомассы или аэрозоли, состоящие из минеральной пыли, создают комплексные взаимодействия в климатической системе после их смешивания с антропогенными загрязняющими веществами (Ding *et al.*, 2013a,b,c; Nie *et al.*, 2014).

По данным министерства охраны окружающей среды загрязнение воздуха в Китае в 2013 году было самым сильным за последние 52 года, в 13 провинциях зафиксированы рекордные уровни загрязнения воздуха. Почти половина Китая пострадала от смога, наиболее тяжелая ситуация сложилась в юго-восточных регионах. В настоящее время все больше городов осуществляют мониторинг качества воздуха в реальном времени с помощью метеорологических вышек и спутникового дистанционного зондирования для отслеживания загрязняющих веществ. В Пекине концентрации микрочастиц в атмосфере более чем в десять раз превышали безопасный уровень, рекомендованный ВОЗ. Это побудило власти принять меры, такие как ограничение промышленных выбросов и сокращения автомобильного трафика по всей стране. Также в этих городах дымка бывает настолько плотная, что зимой она застигает солнце, значительно уменьшая естественное освещение и тепло. В результате, падает температура, домохозяйства используют больше энергии для отопления; загрязнение ухудшается, вызывая заболевания органов дыхания и приводя к госпитализации все большего количества людей. Пятилетний план действий содержит положения по совершенствованию технологий, планирования и регулирования окружающей среды. План направлен на снижение сильного загрязнения и улучшение качества воздуха в провинции Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй, дельтах рек Янцзы и Чжуцзян.

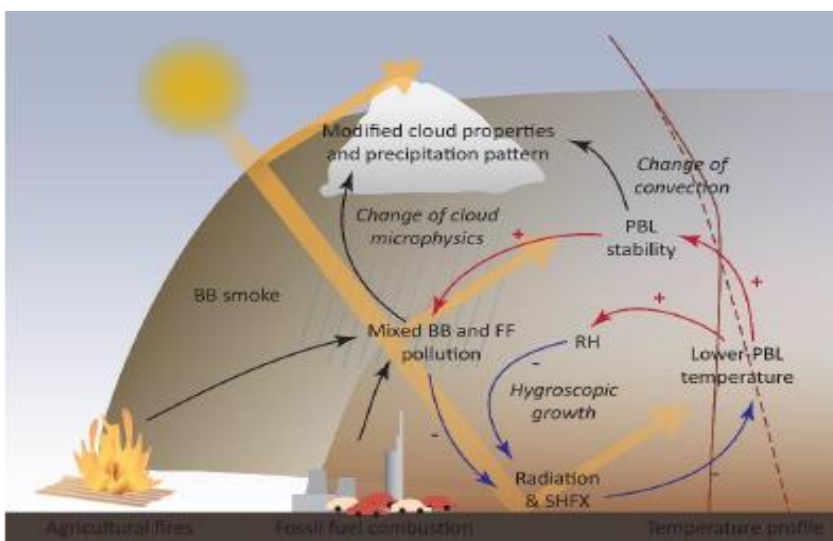


Рисунок 25 Схематическое изображение взаимодействия загрязнения воздуха, динамики планетарного пограничного слоя, аэрозолей, излучения и свойств облаков под действием загрязняющих веществ от сжигания сельскохозяйственных отходов и ископаемого топлива (Ding *et al.*, 2013b).

Худшие эпизоды загрязнения воздуха в основном связаны с застойными погодными условиями и низким планетарным пограничным слоем (PBL), что способствует накоплению интенсивно выбрасываемых вредных веществ на поверхности земли. Однако исследования (*e.g.* Ding *et al.*, 2013b) показывают, что более низкий планетарный пограничный слой также является результатом сильного загрязнения посредством прямого или косвенного воздействия на солнечное излучение и, следовательно, на поверхностный поток контактного тепла. Обратная связь пограничного слоя и загрязнения воздуха будет и в дальнейшем уменьшать высоту PBL и приводить к более загрязненному PBL (Ding *et al.*, 2013b; Wang *et al.*, 2015). Поэтому, для прогнозирования чрезвычайных эпизодов загрязнения воздуха (рис.25) очень важно учитывать сложные типы земной поверхности (городские кластеры, окруженные сельскохозяйственными областями) и источники загрязнения (ископаемое топливо, горение биомассы, пыль и т.д.) в Китае, и улучшать наше понимание этой обратной связи. Это также важно для выстраивания долгосрочной политики. Чтобы понять эту тему, необходимо больше вертикальных измерений с использованием воздушных судов, аэростатов и методов дистанционного зондирования, а также передовых численных моделей, включающих все соответствующие процессы и их связи.

3.4.3 ПОГОДА И АТМОСФЕРНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ



Рисунок 26 Динамика атмосферы в арктическо-бореальном регионе претерпевает значительные изменения. Фотография Ella-Maria Kyrö.

СИНОПСИС Изменения динамики атмосферы в Арктическо-бореальном регионе (рис.26) оказывают серьезное воздействие (i) на краткосрочный прогноз физических свойств в данной области и за ее пределами из-за нелинейных многомасштабных изменений в атмосфере и тесно связанных подсистем и (ii) на более долгосрочный прогноз и перспективны относительно биогеохимических систем в данной области и по всему миру.

Q-6 Как атмосферная динамика (погода синоптического масштаба, пограничный слой) изменится в арктическо-бореальных регионах?

Погода планетарного и синоптического масштаба

Более точное прогнозирование и понимание погоды необходимо для снижения экономических и человеческих потерь при стихийных бедствиях, связанных с погодой. Ключевыми вопросами здесь

являются надежность прогноза погоды и увеличение прогнозируемого периода. В настоящее время этот период в Европе составляет в среднем около 8-9 дней, это обеспечивает надежное раннее предупреждение в случае стихийных бедствий, связанных с погодой, таких как ураганный ветер и выпадение экстремальных осадков, приводящих к внезапному быстроразвивающемуся паводку. Период полезных прогнозов, как правило, увеличивался на один день в десятилетие за последние три десятилетия (Uppala et al. 2005). Цель РЕЕХ по этой теме заключается в усилении научно-технической базы для сохранения и развития этих возможностей в области исследования. Трудности связаны с продолжающимся изменением окружающей среды и его влиянием на возникновение определенной погоды и её предсказуемость.

Практический навык прогнозирования стихийных бедствий, связанных с погодой, может быть отнесен ко всем компонентам численных систем прогнозирования: построению модели прогнозирования, использованию наблюдений и вероятностным аспектам прогнозирования. Для улучшения навыка прогнозирования требуется сбалансированная программа исследований, охватывающая все эти аспекты. Усовершенствование построения модели прогнозирования подразумевает более точные численные методы для решения основного набора термодинамических уравнений и улучшенную параметризацию процессов в масштабе меньше шага сетки. РЕЕХ предоставляет уникальную возможность лучше понять и количественно оценить приповерхностные физические и биогеохимические процессы и, следовательно, улучшить научную базу для разработки моделей.

Прогнозирование погоды является преимущественно начальной задачей, и начальное состояние для модели прогнозирования генерируется внедрением данных наблюдений. Объемы данных наблюдений, используемые ежедневно в оперативных центрах численного прогнозирования погоды поражают: 50-100 миллионов отдельных измерений от всех возможных инструментов in-situ и инструментов дистанционного зондирования по всему миру передаются и используются во времени близком к реальному. Моделирование наблюдения ("виртуальный инструментарий") является краеугольным камнем в использовании всех этих измерений во внедрении данных. Это является особой задачей для РЕЕХ. Важно, чтобы данные наблюдений, полученные в регионе, передавались без задержки в глобальную телекоммуникационную систему для использования в операционной деятельности. Это должно быть поддержано деятельностью, направленной на лучшее понимание измерений моделирования наблюдения.

Вероятностные аспекты прогнозирования учитывают, что правильная оценка рисков опасных событий, не может основываться на единственном прогнозе. Он должен сопровождаться некоторой вероятностью события так, чтобы пользователи могли решить, на какой риск они готовы пойти в зависимости от того, насколько вероятно они будут испытывать воздействие события, и могли действовать соответственно (Palmer and Slingo 2011). Разработка более точных инструментов прогнозирования поддерживает более точное усвоение данных и вероятностное прогнозирование. Это в свою очередь обеспечивает лучшую характеристику неопределенностей для целей пользователей прогнозов, а также ускоряет разработку моделей, так как неопределенности становятся известны лучше.

Происходящее изменение окружающей среды и его распространение в регионе исследования РЕЕХ ставит особые задачи прогнозирования стихийных бедствий связанных с погодой и долгосрочных

воздействий. Такое мнение может быть проиллюстрировано на примере последних изменений морского льда в Арктике. Во-первых, они были гораздо более быстрыми, чем прогнозировали ученые и результаты моделирования десять лет назад. Во-вторых, на изменения морского льда сильно влияют погодные условия в североευропейском регионе. Например, усилившиеся снегопады в зимнее время в Скандинавии в 2010-2013 гг. можно частично приписать к тепловому воздействию увеличившейся площади открытой морской поверхности в Северном Ледовитом океане и его влиянию на атмосферную циркуляцию в Атлантике. Этот механизм изменяет режимы погоды и подрывает готовность к стихийным бедствиям, основанную на прошлом опыте. Поэтому, крайне необходимо расширить и углубить регулярные наблюдения, методы усвоения данных и модели прогнозирования для того, чтобы должным образом осуществлять мониторинг физического состояния окружающей среды. Долгосрочные последствия уменьшения ледяного покрова в основном неизвестны, так как у научного сообщества не было достаточно времени для выработки новых решений по основным климатическим переменным в исследуемом регионе. Таким образом, для повышения уровня готовности необходимы новые данные наблюдений для снижения неопределенности в динамике системы в краткосрочном и долгосрочном периодах.

Приповерхностная погода

Основные последствия стихийных бедствий, связанных с погодой, ощущаются из-за приповерхностной погоды, которая особенно чувствительна к характеристикам нижней границы, таким как температура и влажность почвы. Продолжающееся глобальное изменение влияет на состояние поверхности в арктическо-бореальном регионе, что в свою очередь связано с изменениями в атмосферной циркуляции.

Для лучшего прогнозирования опасных состояний приповерхностной погоды, важно иметь представление об этих важных связях и знать, как они выстраиваются в моделях прогнозирования. Для развития модели прогнозирования связь поверхность-атмосфера встраивается в физическую параметризацию, которая должна постоянно совершенствоваться и оптимизироваться для моделей с высоким разрешением. Процессы, происходящие в пограничном слое, крайне важны, особенно в стабильных условиях, а представление облаков пограничного слоя и их дальнейшее взаимодействие с конвекцией остается важным предметом исследования. Усовершенствованные модели требуют улучшенных систем освоения данных. Улучшение модели освоения данных об облаках и осадках в значительной степени остается открытым вопросом, который требует дальнейшего исследования. При моделировании с более высоким разрешением, условия поверхности (тип землепользования, фракция воды, состояние растительности, снежный покров и т.д.) становятся очень важными. Исследования того, как согласованно связать освоение данных по поверхности и слоя над ней и моделирование остаются среди высокоприоритетных научных вопросов. Таким образом, РЕЕХ может предложить уникальное новое знание о приповерхностных условиях в своей исследовательской области. Перед научным сообществом ставится задача путем опытно-конструкторских работ улучшить возможность прогнозирования параметров околоповерхностной погоды от ежедневного и еженедельного масштаба до сезонного и годового, и далее.

Большинство процессов взаимодействия суша-атмосфера-океан происходит в нижней части тропосферы, в планетарном пограничном слое (ППС). Количественное описание поведения ППС над регионом Евразии требуется для анализа пространственного и временного распределения поверхностных потоков, по которым производится прогноз микроклимата и экстремальных природных явлений и для моделирования облачности и качества воздуха. Мелкие, устойчиво стратифицированные ППС типичны для северной Скандинавии и Сибири, особенно в зимний период, и крайне чувствительны даже к слабым воздействиям.

Атмосферные планетарные пограничные слои (ППС) являются сильно турбулентными, находящимися в непосредственном динамическом, тепловом и других взаимодействиях с поверхностью Земли. ППС подвергаются суточным вариациям, поглощают эмиссии поверхности, регулируют микроклимат, загрязнение воздуха, периоды экстремального холода и аномальной жары, а также чувствительны к антропогенным воздействиям. Очень устойчивая стратификация атмосферы выше ППС препятствует эффективному проникновению из них в свободную атмосферу частиц от потоков с поверхности или эмиссий. Таким образом, высота ППС и проходящие через верхнюю границу ППС турбулентные потоки обуславливают местные особенности климата и экстремальные погодные явления (например, периоды аномальной жары, связанные с конвекцией; или события, связанные с сильной устойчивой стратификацией, вызывающие загрязнение воздуха). Такая концепция (также связанная с гидросферой) ставит проблему моделирования и мониторинга высоты ППС.

Высота пограничного слоя составляет от десятков до тысяч метров. ППС регулирует дисперсию и перенос атмосферных примесей, а также периоды экстремального холода и жары (Zilitinkevich 1991, Zilitinkevich et al. 2007, Zilitinkevich and Esau, 2009). В рамках РЕЕХ будет выполнен комплексный расчет высоты планетарного пограничного слоя (ППС) над Евразией, так как это слой, где будут проводиться основные наблюдения. В ППС происходят погодные явления, которым подвержено население планеты.

ППС небольшой высоты, с устойчивой стратификацией, типичные для зимнего времени в северной Скандинавии и Сибири, особенно чувствительны даже к слабому воздействию, и, следовательно, заслуживают пристального внимания, особенно в условиях изменения окружающей среды и климата (Zilitinkevich and Esau, 2009). ППС с неустойчивой стратификацией взаимодействуют со свободной атмосферой в основном путем турбулентной вентиляции на верхней границе ППС (Zilitinkevich, 2012). Этот механизм, хотя и слабо изученный и плохо смоделированный, регулирует развитие конвективных облаков, дисперсию и осаждение аэрозолей и газов, которые являются основными признаками аномальной жары и других экстремальных погодных явлений.

Традиционный взгляд на взаимодействие атмосфера-Земля как полностью характеризуемый поверхностными потоками более не соотносится с современной концепцией многомасштабной климатической системы, где ППС взаимодействуют с геосферами и регулируют локальные особенности климата. В этом контексте важную роль играют высота ППС и турбулентные потоки на верхней границе ППС. Для глубокого осмысления глобального взаимодействия атмосферы и Земли требуются исследование, наблюдение и мониторинг всех этих параметров.

Развитие методов диагностики и моделирования аэроэлектрических структур важно для изучения конвективных и электрических процессов в нижней тропосфере (Shatalina et al., 2005, 2007). Конвекция в ППС приводит к формированию аэроэлектрических структур, проявляющихся в данных наземных измерений в виде короткопериодных пульсаций электрического поля с периодами от нескольких секунд до нескольких сот секунд (Anisimov et al., 1999; 2002). Размеры таких структур определяются характеристическими масштабами вариаций аэродинамических и электродинамических параметров атмосферы, включая ППС и высоту поверхностного слоя, а также неоднородности поверхности суши (воды). Формируемые в результате конвективных процессов и захвата положительных и отрицательных заряженных частиц (как ионов, так и аэрозолей) конвективными элементами (ячейками) аэроэлектрические структуры двигаются в потоке воздуха вдоль поверхности Земли. Дальнейшая эволюция конвективных ячеек приводит, в частности, к образованию облаков.

Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) является важным фактором, связывающим солнечную активность и процессы в верхних слоях атмосферы с окружающей средой Земли, включая биосферу и климат. Грозовая активность поддерживает эту цепь, чье возникновение зависит от изменения электропроводности атмосферы в широком высотном диапазоне. Антропогенное воздействие на ГЭЦ через авиацию, лесные пожары и электромагнитное загрязнение вызывает озабоченность. Была признана важность молниевой активности для климатических процессов. Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) формируется вследствие постоянного действия источников ионизации, дающих экспоненциальный рост электропроводности в нижней атмосфере, с одной стороны, и постоянного действия грозных импульсов, обеспечивающих высокую скорость генерации электрической энергии и рассеяния в тропосфере. Таким образом, ГЭЦ находится под воздействием и геофизического, и метеорологического факторов, и может служить удобными рамками для анализа возможных взаимосвязей между явлениями атмосферного электричества и климатическими процессами. Дальнейшее исследование ГЭЦ как диагностического инструмента для исследований климата требует точного моделирования стационарного состояния ГЭЦ и ее динамики. Особое внимание должно быть уделено наблюдению и моделированию источников энергии (грозы, заряженные ливневые облака, мезомасштабные конвективные системы) в глобальной цепи.

3.5 АРКТИЧЕСКО-БОРЕАЛЬНАЯ ВОДНАЯ СИСТЕМА – КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ



3.5.1 СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН В СИСТЕМЕ КЛИМАТА



Рисунок 27 Рекордно малая площадь морского льда в Арктике в сентябре 2012 г. (Студия визуализации научных данных NASA/Центра космических полётов им. Годдарда. Данные The Blue Marble предоставлены Reto Stockli (NASA/GSFC)).

СИНОПСИС Северный Ледовитый океан играет важную роль в системе климата. Основные процессы, связанные с взаимодействием между океаном и другими компонентами системы Земли, включают в себя обмен импульсом, теплом и веществом (напр., влага, CO₂ и CH₄) между атмосферой и морем, а также динамику и термодинамику морского льда. Необходимо рассмотреть следующие важные вопросы: (i) роль океана в арктическом усилении изменения климата, (ii) причины уменьшения площади арктического льда, (iii) обмен парниковых газов между океаном и атмосферой, (iv) последствия уменьшения площади морского льда для океана, окружающих его континентов и бюджетов аэрозолей

Q-7 Как изменится площадь и толщина морского льда в Арктике и снежный покров на суше?

Северный Ледовитый океан имеет почти круглый бассейн и занимает площадь около 14 056 000 км². Океанографические изменения в арктических морях - площадь морского льда, потоки и массы арктической воды - коррелируют с динамикой глобального климата и погоды. Северный Ледовитый океан может воздействовать на погоду и климат в средних широтах. Более теплую и влажную атмосферу свободной ото льда Арктики в осенний период связывают с увеличением снежного покрова в Азии (Park et al. 2013).

Многие рассматриваемые процессы, влияющие на потепление климата, связаны с океаном. Наибольшее внимание среди них получила обратная связь альbedo снега/льда (e.g. Flanner et al., 2011). Обратная связь наибольшая, когда морской лед заменяется открытой водой, но эта связь начинает играть значительную роль уже весной, когда начинается таяние снега поверх морского льда. Это происходит вследствие большой разницы альbedo между сухим снегом (альbedo около

0.85) и влажным, тающим непокрытым льдом (альbedo около 0.40). Требуется провести большую работу по количественной оценке уменьшения альbedo снега/льда во время сезона таяния, включая эффекты талых озер и загрязняющих веществ в снеге. Другие механизмы усиления, связанные с океаном, включают повышенную потерю энергии от океана в период осень-зима (Screen and Simmonds, 2012). Далее, таяние морского льда оказывает сильное воздействие на (i) испарение и, следовательно, на радиационный теплообмен водяного пара и облаков (Sedlar et al., 2011) и (ii) толщину планетарного пограничного слоя (PBL), которая регулирует чувствительность температуры воздуха к поступлению тепла в PBL (Esau and Zilitinkevich, 2010). Роль механизмов, воздействующих на арктическую амплификацию потепления климата, до сих пор недостаточно изучена, но будет исследована в РЕЕХ.

Быстрое уменьшение ледового покрытия Арктики (рис.27) оказывает огромное воздействие на навигацию и добычу природных ресурсов. Для прогнозирования будущего изменения ледового покрытия в приоритете стоит понимание причин прошлых и текущих изменений. Некоторые процессы повлияли на уменьшение ледового покрытия в Арктике, но требуется лучшая количественная оценка роли этих процессов. В ходе РЕЕХ будет проведено дальнейшее изучение воздействий изменений облачного покрова и радиационного прогрева (см. Kay et al., 2008), переноса атмосферного тепла (Ogi et al., 2010), и переноса океанического тепла (Woodgate et al., 2010). Кроме того, при уменьшении толщины льда морской ледовый покров становится более чувствительным к обратной связи альbedo льда (Perovich et al., 2008). Другие вопросы, требующие большего внимания, включают в себя причины более раннего таяния весной (Maksimovich and Vihma, 2012), изменения фазы осадков (Screen and Simmonds, 2010), а также крупномасштабное взаимодействие площади морского льда, распределения температур морской поверхности и атмосферной динамики (циклогенез, циклолиз и траектории циклонов).

Кроме термодинамических процессов на ледовое покрытие в Арктике оказывает влияние дрейф морского льда. (Kulakov and Makshatas, 2013). Поток импульса от атмосферы ко льду является основным фактором дрейфа морского льда, который плохо представлен в климатических моделях (Rampal et al., 2011). Это сильно затрудняет реалистичное представление дрейфа морского льда в крупномасштабных климатических моделях. Постепенно утончающийся паковый лед становится более чувствительным к ветровому воздействию (Vihma et al., 2012). В рамках РЕЕХ будут рассмотрены основные процессы, определяющие передачу импульса от атмосферы к морскому льду, включая эффекты атмосферной стратификации и шероховатости морского льда.

Для лучшего понимания связей Северного Ледовитого океана и суши Евразии особенно важно исследовать воздействие разрушения арктического льда на погоду и климат Евразии в рамках РЕЕХ. В результате нескольких недавно проведенных исследований сделаны предположения о том, что сильная убыль морского льда в Арктике привела к холодным и снежным зимам в Евразии (Honda et al., 2009; Petoukhov and Semenov, 2010). В результате некоторых исследований высказаны также предположения о связи между разрушением морского льда и увеличением числа снегопадов осенью в Сибири, что также способствует суровым зимам (Cohen et al., 2012).

Другим плохо изученным вопросом, относящимся к Северному Ледовитому океану, является роль морского льда в качестве источника предвестников аэрозолей и в газообмене между океаном и атмосферой. Предварительные результаты полевых исследований дрейфующей станции “North

Pole” (Makshtas et al, 2011) показывают, что сокращение покрова морского льда может быть причиной повышения поглощения CO₂ из атмосферы в годичном цикле и рост сезонной амплитуды концентраций CO₂ в Арктике.

Климатические модели прогнозируют, что увеличение температуры воздуха и осадков над Северным Ледовитым океаном может также оказывать значительное воздействие на структуру морского льда. Повышенная снеговая нагрузка на более тонкий лед приводит к затоплениям, в результате чего формируется снежный лёд. Усиленное таяние снега и дождь, с другой стороны, приводят к повышению просачивания воды на границе снег-лед, где она повторно замерзает, формируя наложенный лед (Cheng et al., 2006). Снежный лед и наложенный лед имеют зернистую структуру и термодинамически и механически отличаются от морского льда, который превалирует в Арктике в настоящее время.

Изменения в Северном Ледовитом океане открыли также некоторые, хотя и ограниченные, возможности сезонного прогнозирования. Это, в основном, связано с большой теплоемкостью океана: если в конце лета и начале осени льда мало, это приведет к большим потокам тепла и влаги в атмосфере, что благоприятствует теплой, облачной погоде в конце осени – начале зимы (Stroeve et al., 2012). С другой стороны, уменьшение толщины морского льда может снизить возможности сезонного прогнозирования ледовой обстановки в наиболее благоприятный навигационный сезон в конце лета - начале осени. Это происходит из-за того, что тонкий лед весьма чувствителен к непредсказуемым аномалиям атмосферных воздействий. Например, в августе 2012 г. одиночный шторм вызвал уменьшение площади морского льда примерно на 1 млн. км².

3.5.2 МОРСКИЕ ЭКОСИСТЕМЫ АРКТИКИ



Рисунок 28 Морской лед в Арктике к северу от Шпицбергена. Фотография Ella-Maria Kyrö.

СИНОПСИС Ледовый покров Северного Ледовитого океана (рис.28) претерпевает быстрые изменения, включая уменьшение площади льда и его толщины в летний период. Это приводит к значительному увеличению поверхности моря, свободной ото льда, в вегетационный период и увеличению продолжительности этого периода. Это может вызвать рост годовой общей первичной продукции (GPP) и биомассы фитопланктона. В свою очередь, более высокая GPP может вызвать

(i) увеличение потоков CO₂ из атмосферы в океан и (ii) увеличение общей биологической продукции, включая продукцию организмов с высоким трофическим уровнем и популяцию рыб. Увеличение температуры поверхности воды может открыть «двери Арктики» для новых видов и изменить пищевые сети, потоки энергии и биологическое разнообразие Арктики. Климатические и антропогенные факторы, действующие в зонах речных бассейнов, могут привести к увеличению количества пресной воды и аллохтонных материалов, ежегодно приносимых на Арктический шельф и далее в Арктический бассейн. Все описанные процессы могут повлиять на арктические морские экосистемы, их продуктивность и основные биогеохимические циклы в регионе. Одни из наиболее значимых возможных изменений связаны с увеличением антропогенного воздействия в результате добычи и транспортировки нефти и природного газа в шельфовых зонах.

Q-8. Каково совместное воздействие арктического потепления, опреснения океана, загрязняющей нагрузки и закисления на арктические морские экосистемы, первичную продуктивность и цикл углерода?

Ледовый покров Северного Ледовитого океана претерпевает быстрые изменения, включая уменьшение площади льда и его толщины в летний период. С конца 1970-х - начала 1980-х годов летний ледовый покров Северного Ледовитого океана потерял приблизительно 3-3,5 млн. км² (Национальный центр данных по снегу и льду, США). В сентябре 2012 года 40% Центрального Арктического бассейна составляла открытая вода. В августе 2007 и 2012 (самые теплые годы последнего десятилетия в Арктике) в одном из ключевых арктических районов – в Карском море - было обнаружено смещение южной границы зоны нетающего льда примерно на 700-750 км к северу относительно средних значений его положения за период 1970-2000. Это соответствует расстоянию от Москвы до Санкт-Петербурга. Теоретически появление новых свободных ото льда зон должно привести к резко выраженному росту годовой общей первичной продуктивности (GPP) и биомассы фитопланктона. Также беспокойство вызывает потеря сообществ водорослей, связанная с низкой поверхностью ледникового покрова (Bluhm et al. 2011). Их роль в GPP, первичном производстве биомассы, потреблении и потоках CO₂, а также оседании биомассы может быть сопоставима (или превосходить) роль планктонных водорослей, цветение которых ожидается в зонах, свободных ото льда.

Следующая проблема связана с увеличением (от 1 до 2 месяцев) длительности безледного периода в районах, которые обычно были свободны ото льда и до заметных изменений климата в Арктике. Эти области являются в основном морями, расположенными по краям Северного Ледовитого океана. Маловероятно, что они будут демонстрировать высокие объемы дополнительной GPP из-за сильного лимитирования питательных веществ с конца весеннего цветения и низкой активности бактериопланктона (медленная регенерация питательных веществ) в связи с низкими температурами (Makkaveev et al., 2010; Sazhin et al., 2010). Высокая GPP во второй половине вегетационного периода может быть обнаружена только в областях (довольно ограниченных), испытывающих воздействие речного притока в Арктике или районах активного вертикального переноса воды (Sergeeva, 2013). Некоторые из них известны (Hill and Cota, 2005; Sergeeva, 2013), но большинство – нет. Таким образом, оценка потоков CO₂ и роль Арктики в качестве возможного накопителя CO₂ в контексте климатических изменений остается во многом неопределенной.

Третий важный вопрос - как рост GPP и биомассы фитопланктона, произошедший под влиянием климата, влияет на продуктивность более высоких трофических уровней экосистемы Арктики, включая популяции, представляющие интерес для человека. При рассмотрении типичных

арктических экосистем (за исключением Баренцева моря, испытывающим на себе влияние Атлантики) обнаружится, что наиболее важными первичными потребителями являются крупные растительноядные веслоногие ракообразные, чьи жизненные циклы синхронизированы с сезонным цветением водорослей (Kosobokova, 2012). Популяции этих рачков покидают верхние продуктивные слои водной толщи в середине вегетационного периода или немного позже и спускаются глубже. В настоящий момент непонятен механизм из-за которого небольшое увеличение доступной пищи во второй половине вегетационного периода может существенно влиять на этот ключевой компонент океанической экосистемы. Еще одним важным компонентом сообщества консументов являются растительноядные рачки небольших размеров, чья роль особенно велика в шельфовых экосистемах. Теоретически, увеличение имеющейся продукции фитопланктона осенью в сочетании с повышением температуры моря может повлиять на популяцию рачков небольших размеров и повысить их роль в экосистемах. К сожалению, на настоящий момент не хватает понимания о роли малых рачков в арктических экосистемах (Arashkevich et al. 2010).

Существует вероятность, что после повышения температуры моря в Арктике некоторые чужеродные популяции из соседних зон могут проникать в экосистемы Арктики, формировать здесь обширные популяции и изменять структуру и функционирование естественной экосистемы. Недавний пример - аляскинский минтай в западной Арктике. Режимный сдвиг и повышение температуры воды на 1.5°C , произошедший в Беринговом море в середине 1970-х годов, позволил минтаю проникнуть в экосистему Арктики и занять за несколько лет место основного вида, что обеспечивает один из крупнейших в мире региональный улов (Shuntov et al., 2007). Экосистема Берингова моря очень богата в противоположность арктическим экосистемам. В данный момент нам не известно о достаточных источниках пищи, которые могут поддержать массовое вторжение даже в случае изменений в экосистеме, спровоцированных климатом. Но даже появление агрессивных чужеродных видов в небольшом количестве может сильно повлиять на чувствительную экосистему Арктики. Так или иначе, проблема является очень важной, она также относится к вопросам международного регулирования рыболовства в Арктике в проекции будущих изменений экосистем.

Потепление климата в Арктике и прилегающих бореальных районах изменит речной сток в арктический шельф, что увеличит воздействие на арктические морские экосистемы. Разрушение многолетней мерзлоты, эрозия почвы, изменения снежного покрова и летних осадков могут привести к изменению сроков паводков, а также к увеличению количества пресной воды и аллохтонных материалов, включая органические вещества, ежегодно приносимых на Арктический шельф и в Арктический бассейн. Увеличение антропогенной деятельности в бассейнах водосбора и непредвиденные антропогенные катастрофы приведут к быстрому переносу загрязняющих веществ реками в Арктику и другим негативным последствиям. Мы только начали понимать процессы, которые регулируют взаимодействия пресноводных и морских экосистем в устьях рек (Flint, 2010). Недостаточно хорошо известны механизмы, определяющие воздействие речных вод на Арктический шельф и Центральный бассейн и их зависимость от определенных климатических факторов. Устья крупных сибирских рек являются ключевыми площадками для расположения флагманских станций или постоянных наблюдательных пунктов в рамках программы РЕЕХ.

Одно из наиболее серьезных опасений по поводу морских экосистем Арктики сегодня и в будущем связано с постоянным увеличением антропогенного воздействия в результате добычи и

транспортировки нефти и природного газа в шельфовых зонах. Эта проблема является одновременно и экономической, и экологической. Чем теплее и свободнее ото льда будет арктический шельф - тем активнее там будут добывать нефть и газ. Антропогенное воздействие, связанное с нефтегазовой промышленностью, будет иметь долгосрочные последствия из-за высокой чувствительности экосистем Арктики. По крайней мере одна флагманская станция или наблюдательный пункт должен располагаться в районе наиболее активной добычи нефти и газа в Арктике.

Перечисленные проблемы и процессы крайне важны для понимания грядущей эволюции природной системы Арктики, последствий изменения климата и увеличивающейся антропогенной деятельности в морских экосистемах Арктики. Существует риск необратимых изменений продуктивности морской среды Арктики, ключевых биогеохимических циклов и возможности для поглощения CO_2 морской экосистемой. Процессы, происходящие в Арктике, могут оказать воздействие и на соседние бореальные регионы.

Климатические обратные связи водной и атмосферной систем

Слоистая структура водной толщи является ключевой характеристикой всех типов водных экосистем: морских, солоноватых и пресноводных. Эта структура возникает в результате зависимости плотности воды от температуры и от ионов, находящихся в воде. Таким образом, водная толща становится слоистой в зависимости от температуры и концентрацией различных химических соединений. В целом, концентрации ионов высоки в океанах и низки в пресных водах. Кислотность (рН) в морских средах, как правило, выше, чем, например, в озерах, которые в бореальной зоне являются кислыми от природы. Значения рН важны для системы неорганического углерода, так как рН определяет относительные концентрации растворенных CO_2 , бикарбонатов и карбонатов. Кислород, возникающий в результате либо газообмена поверхности воды и атмосферы, либо фотосинтеза, используется в дыхании. Разделение на слои важно не только для биологических процессов, оно также сильно влияет на теплообмен и, следовательно, на энергетические бюджеты водных экосистем.

Цианобактерии и водоросли синтезируют сахара путем фотосинтеза, используя солнечную энергию и неорганический углерод, растворенный в воде. Все фотосинтезирующие организмы могут использовать CO_2 в качестве источника углерода, но некоторые из них приспособлены и для использования растворенных бикарбонатов. Бикарбонаты могут поглощаться и преобразовываться в CO_2 ферментом карбоангидразой. Низкие концентрации CO_2 в воде могут ограничивать фотосинтез так же, как нехватка света и питательных веществ. Таким образом, рост фитопланктона и так называемый биологический насос, важные для водной секвестрации углерода в слоистых водных экосистемах, испытывают отрицательное воздействие низких уровней CO_2 . Из-за сильной зависимости от источника растворенного углерода, фотосинтез генерирует четкий временной и пространственный, особенно по вертикали, разброс концентраций CO_2 в воде. Вся водная флора и фауна, в том числе крупные хищники, такие как акулы и косатки, гигантские планктоноядные киты в океанах и тюлени в пресноводных озерах, основана на фотосинтезе прокариотических цианобактерий или эукариотических водорослей, обеспечивающих первичный источник материалов и энергии для экосистем.

В результате фотосинтеза, водоросли синтезируют большой комплекс органических соединений, в том числе важные для атмосферы летучие органические соединения. Водоросли производят большое количество DMSP (диметилсульфониопропионат), предвестника DMS (диметилсульфида) - важного серосодержащего соединения для формирования атмосферных аэрозолей. Поскольку внутриклеточные концентрации DMSP в водорослях различаются, то очевидно, что DMSP контролируется физиологически и экологически, хотя конечная цель его синтеза до сих пор неизвестна.

Растворение и испарение CO₂ и DMS зависят от температуры - высокие температуры способствуют испарению и замедляют растворение. Концентрация CO₂ в атмосфере определяет скорость испарения и растворения CO₂, так как концентрация CO₂ в воздухе находится в равновесии с концентрацией CO₂ в воде. Молекулы летучих органических соединений и DMS испаряются из морской воды, находясь в зависимости от температуры и своих концентраций в воде. Фотосинтез и синтез летучих органических соединений и DMS создают сильное временное и пространственное варьирование в поверхностных концентрациях соединений, находящихся в океанах и влияющих на климат. Эти концентрации являются движущей силой для потоков соединений между водой и атмосферой.

Примеры исследовательских вопросов - морские экосистемы

Как будут изменяться площадь морского льда Арктики, снежный покров и многолетняя мерзлота в изменяющемся климате? Каковы их связи с системой климата?

Как изменение климата повлияет на пресную воду и перенос аллохтонных материалов реками в Арктику? Каковы будут соответствующие воздействия на морские экосистемы Арктики?

Какое воздействие потепление Арктики и сокращение сезонных льдов оказывает на арктические морские экосистемы, в первую очередь, на первичную продукцию (увеличение продолжительности вегетационного периода фитопланктона и соответствующий сток углерода) и производительность популяций верхних трофических уровней, включая ключевые виды?

Каков совместный эффект потепления в Арктике, загрязняющей нагрузки и закисления на арктические морские экосистемы, в первую очередь, на первичную продукцию (цветение воды и последующее накопление углерода посредством осаждения)?

3.5.3 ОЗЕРА И КРУПНЫЕ РЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ

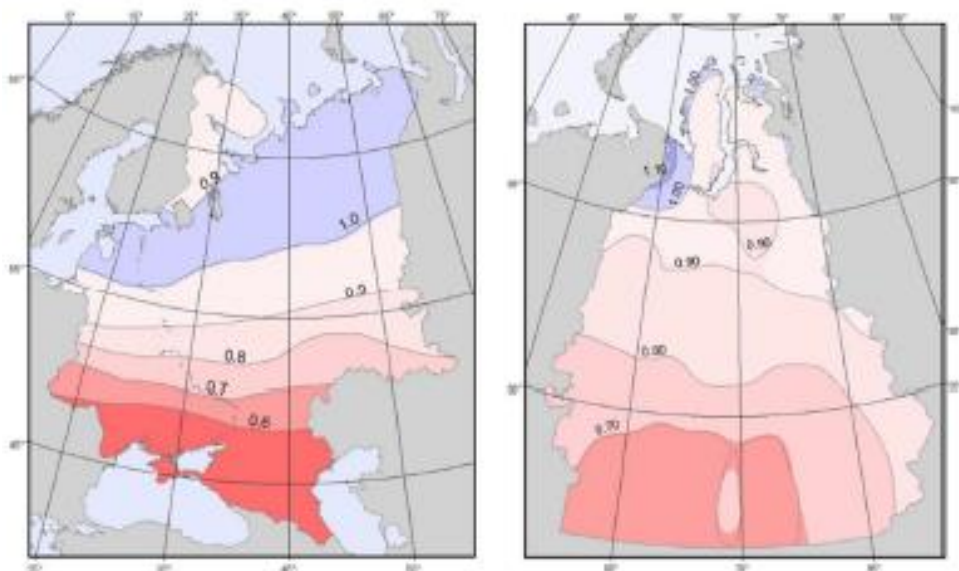


Рисунок 29 Относительные изменения годового стока рек (на территории Восточно-Европейской равнины (слева) и Западной Сибири (справа)) на середину 21-го века (референтный объем - это значения для климата в настоящий момент). Изображения из Kasimov and Kislov, 2011

СИНОПСИС Градиент химического состава воды от тундры до степей поможет представить потенциальные воздействия изменения климата на гидрохимию. В последнее столетие трансграничный перенос загрязняющих веществ в атмосфере на дальние расстояния привел к изменениям геохимических циклов S, N, металлов и других соединений. Кроме того, метан в северной Евразии выходит в различных местах в виде пузырей. Таяние многолетней мерзлоты может ускорить эмиссии метана в озерах. Более того, увеличивается вероятность токсичного цветения. Загрязнение и дефицит водных ресурсов в Китае усугубились за последние десятилетия. Сохранение водных ресурсов становится решающим фактором для общества.

Q-9 Какова будущая роль арктическо-бореальных озер, заболоченных земель и крупных речных систем (включая термокарстовые озера и проточные воды разных масштабов) в биогеохимических циклах и как скажутся эти воздействия на деятельность человека (жизнедеятельность, сельское хозяйство, лесное хозяйство, промышленность)?

Водные системы и парниковые газы

Усиленное разложение органического вещества почвы может значительно воздействовать на перенос наземного углерода в реки, затопляемые устья рек и прибрежную зону океана. Вклад этого процесса в глобальный и региональный углеродные бюджеты неизвестен. Роль водных систем как чистого стока или источника атмосферного CO₂ в настоящее время обсуждается. Когда вследствие осадков и других процессов большие объемы органической материи переносятся с суши в близлежащие озера и потоки, этот углерод исчезает из углеродного бюджета наземной экосистемы. Таким образом, биологические процессы, происходящие в наземных экосистемах (например, фотосинтез, дыхание и разложение) и в водных экосистемах, взаимосвязаны. Реакция водных экосистем в виде более высокой температуры по сравнению с наземными экосистемами показывает, что значительная часть углерода, вдыхаемого или выделяемого водными экосистемами, имеет наземное происхождение (Yvon-Durocher et al. 2012).

Северная часть евразийского региона характеризуется наличием талых озер. Они составляют 90% всех озер в зоне многолетней мерзлоты на территории России (Romanovskii et al. 2002). Давно известно, что сибирские озера, сформировавшиеся в тающей многолетней мерзлоте при повышении температуры, выделяют метан. Последние наблюдения озер в зоне многолетней мерзлоты на севере Сибири показывают, что они выбрасывают в атмосферу гораздо больше метана, чем считалось ранее. Но метан не выделяется постоянным потоком, более 95% его выходит в виде пузырей в различных точках. В наступающие десятилетия это может стать более значительным фактором в глобальном изменении климата (Walter et al., 2006).

Водные системы и их загрязнение

Сибирские озера, расположенные в тундре и лесотундре, в основном, слабо изучены. В своем естественном состоянии их продуктивность мала, но их экосистемы чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям. Обильное цветение цианобактерий обычно ассоциируется с промышленными выбросами и стоком нутриентов. Необходимо провести оценку воздействия изменения климата в северных регионах Евразии на возрастание трофичности воды, сопровождаемой цветением цианобактерий.

Гидрохимия малых озер по трансекте от бореальных до аридных экорегионов в Европейской части России определяется комбинацией физических, химических и биологических процессов, проходящих как в самих озерах, так и в их водосборных бассейнах. В последнее столетие трансграничный перенос загрязняющих веществ в атмосфере на дальние расстояния привел к изменениям геохимических циклов S, N, металлов и других соединений во многих частях Земного шара (Schlesinger, 1997; Vitousek et al., 1997a,b; Kvaeven et al., 2001; Skjelkvåle et al., 2001). В последнее десятилетие объединенный эффект загрязнения воздуха и потепления климата привлек к себе повышенное внимание (Skjelkvåle and Wright, 1998; Schindler et al., 2001; Alcamo et al., 2002; Sanderson et al., 2006; Feuchtmayr et al., 2009; Sereda et al., 2011). Можно ожидать, что гидрохимия малых озер при отсутствии в их водосборных бассейнах источников загрязнения отразит региональные характеристики химического состава воды, а также глобальные антропогенные процессы, такие как изменение климата и перенос загрязнений в атмосфере на большие расстояния (Müller et al., 1998; Moiseenko et al., 2001; Battarbee et al., 2005).

Проблема загрязнения окружающей среды включает в себя, в качестве основного компонента, распространение по воде биогенных веществ и пестицидов из сельскохозяйственных районов, тяжелых металлов из районов горнодобычи и других элементов и химических веществ, таких как стойкие органические соединения из городских и промышленных районов. Из-за сдвига нагрузки ниже по течению происходит изменение динамики реки и дельты. Существующая наземная сеть наблюдений за речным стоком не обеспечивает адекватного пространственного покрытия для научного применения и водопользования, включая верификацию вклада поверхностного стока во внутриконтинентальный сток. Для понимания распространения химических индикаторов и загрязняющих веществ в контексте глобальных экологических потоков необходимы специальные полевые лаборатории с возможностью проведения наблюдений и моделирования в гидрометеорологии, седиментологии и геохимии.

Одним из примеров является бассейн р. Селенга, который расположен в центре Евразии и простирается от северной Монголии до южной Сибири и впадает в Байкал. Бассейн р. Селенга и

озеро Байкал расположены в верхней части речной системы Енисея, которая впадает в Северный Ледовитый океан. Озеро Байкал имеет самый большой объем в мире, около 23000 км³ (что составляет 20 % всей незамерзшей пресной воды по всему миру), обладает уникальной экосистемой (Granina 1997) и является важным региональным водным ресурсом (Garmaev and Khristoforov, 2010; Brunello et al. 2006). В бассейне р. Селенга расположены многочисленные промышленные и сельскохозяйственные объекты, которые воздействуют на качество воды озера и его притоков. В регионе сильно развита горнодобыча (e.g. Korytnjy et.al, 2003; Karpoff and Roscoe 2005; Byambaa and Todo 2011), поэтому тяжелые металлы накапливаются в биоте и отложениях в дельте р.Селенга и озера Байкал (Boyle et al., 1998; Rudneva et al., 2005).

Водные системы Китая

Речные системы в Китае находятся под влиянием рек, текущих из Тибетского плато до Тихого океана. Янцзы является самой длинной рекой в Китае, она течет из Тибетского плато в Шанхай. Желтая река является второй по длине в Китае, она характеризуется сезонными наводнениями, которые вызывают большой экономический и социальный ущерб. Амур формирует северную границу с Россией. Река Хайхэ протекает через Пекин в Тяньцзинь, она испытывает тяжелое воздействие густонаселенного промышленного столичного региона. Только одна река Китая течет в Северный Ледовитый океан: река Эрцис (Иртыш), которая течет на север через Казахстан, Сибирь, впадает в реку Обь, которая течет в Северный Ледовитый океан.

Изменения климата и окружающей среды в последние десятилетия привели к изменениям в распределении водных ресурсов в Китае. Доступные водные ресурсы из речной системы северного Китая сократились, и, как ожидается, эта тенденция сохранится, в то же время на юге Китая доступные водные ресурсы незначительно выросли (Mo, 2008). Ожидается увеличение региональных наводнений и засух. Не намного лучше ситуация и в прибрежных районах, где подъем уровня моря вызывает вторжение морской воды, засоление почвы и прибрежную эрозию. Эти изменения нарушают биоразнообразие в прибрежных зонах от севера до юга; по прогнозам, изменения продолжатся и станут еще более неблагоприятными в будущем.

В Китае все больше внимания уделяется охране и рациональному использованию водных ресурсов, в особенности перемещению водных ресурсов, водохранилищам и ирригации в связи с нехваткой воды в центральных и западных районах Китая. В последнее время было начато много новых проектов. Эти проекты должны улучшить использование воды и безопасность водоснабжения, особенно в сельском хозяйстве, а также обеспечить достаточные водные ресурсы для местных сообществ (Mu et al., 2007).

Прямые последствия климатических изменений и токсичное цветение воды

Прямое последствие климатических изменений - это лавинообразное размножение токсикогенных цианобактерий (*Nodularia*, *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Planktonthrix*) и диатомов (*Pseudo-nitzschia*) в прудах, озерах, водохранилищах и морских бухтах. В ходе разложения цианобактерий (*Nodularia*, *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Planktonthrix*) и диатомов (*Pseudo-nitzschia*) в воду выделяются особенно опасные канцерогены и нейротоксины. Токсичность некоторых цианотоксинов превосходит токсичность боевых отравляющих веществ. Противоядие от этих токсинов не найдено.

3.6 СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА – КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ



3.6.1 ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ И АНТРОПОГЕННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

СИНОПСИС. Сибирь – это российская сокровищница природных ресурсов, в Сибири находится 85% разведанных запасов газа, 75% запасов угля, 65% запасов нефти. В Сибири находится 75% бурого угля, 95% свинца, около 90% молибдена, платины и платиноидов; 80% алмазов; 75% золота, 70% никеля и меди (Korytnyi, 2009). Промышленное развитие Сибири следует рассматривать как один из важнейших факторов будущих изменений землепользования и почвенно-растительного покрова на территории России. До сих пор антропогенная деятельность в Китае была сосредоточена в восточной урбанизированной части страны, ее природные ресурсы интенсивно использовались. Теперь правительство Китая смещает фокус развития на западные регионы, где еще существует нетронутая природа. Рациональное использование природных ресурсов на западе страны является важным аспектом для будущего развития Китая.

Q-10. Как деятельность человека (изменение землепользования, производство энергии, использование природных ресурсов, изменения энергоэффективности, использование возобновляемых источников энергии) будет влиять на дальнейшие изменения окружающей среды в регионе?

Изменения землепользования и почвенно-растительного покрова

В 20 веке в результате различных промышленных, социально-экономических и демографических процессов, направленных на индустриальное развитие нетронутых ранее территорий, произошла значительная трансформация ландшафтов зон тундры и тайги в северной Евразии (Bergen et al. 2013). Это привело к снижению численности сельского населения и, главным образом после 1990-х годов, к ослаблению сельскохозяйственной деятельности. Произошло значительное снижение сельскохозяйственного землепользования (в некоторых областях мелкомасштабного или нетоварного традиционного земледелия до 70 %) и его частичная замена зональными лесными экосистемами (Lyuri et al. 2010), в результате чего эти области стали активными накопителями атмосферного CO₂ (Kalinina et al, 2009). Эти новые леса («замещающие ресурсы») могли бы стать базисом для устойчивого развития в этих регионах в случае реализации соответствующих программ управления вновь образовавшимися лесами на покинутых землях.

Лесной кадастр

Динамика основных классов почвенно-растительного покрова, в частности, лесов, регистрируется с 1961 г., когда были опубликованы результаты первой полной кадастровой оценки российских лесов. В соответствии с официальной статистикой, площадь лесов в азиатской части России возросла на ~80 млн. га за период 1961-2009 (по большей части до середины 1990-х годов). Это большое увеличение объясняется (i) повышением качества кадастровой оценки лесов в отдаленных территориях; (ii) естественным возобновлением леса (в основном в советский период в результате

борьбы с лесными пожарами); (iii) вторжение лесной растительности в ранее незалесенные территории. По официальной статистике площадь пахотных земель в 1990-2009 гг. в регионе сократилась на ~ 10 млн. га. После 2000г. площадь лесных массивов в Сибири сократилась, в основном из-за лесных пожаров и промышленной трансформации высокоширотных регионов (Shvidenko and Schepaschenko, 2014). Значительное снижение лесных площадей также наблюдается в наиболее населенных территориях с интенсивной лесозаготовкой (в особенности, в южной части Сибири и на Дальнем Востоке). Например, в Красноярском крае общая площадь лесов снизилась на 5%, а площадь зрелых хвойных лесов – на 25%. В основном для этих регионов характерны следующие процессы (Shvidenko et al., 2013a,b):

- резкое падение качества лесов (сокращение площади хвойных лесов; значительное уменьшение площадей лесов с высокой продуктивностью; неэкологические технологии и оборудование валки леса, приводящие к разрушению расчищенных территории; неэффективное использование поваленного леса, и т.п.)
- нерациональное использование лесных ресурсов в северных регионах с неразвитой инфраструктурой
- неэффективное управление и лесопользование в регионе – широкое распространение незаконных рубок, естественные и антропогенные возмущения и т.п.

Будущие изменения землепользования и почвенно-растительного покрова будут сильно зависеть от того, насколько успешно будет разработана и внедрена стратегия устойчивого развития северных территорий. В регионе должна быть разработана и внедрена эффективная система адаптации бореальных лесов к глобальному изменению климата. «Экологизация» текущей практики промышленного развития ранее нетронутых территорий позволила бы значительно снизить физическое разрушение ландшафтов и упадка окружающих экосистем вследствие загрязнения воздуха, воды и почвы.

Ожидаемые изменения климата и окружающей среды окажут множественное и комплексное воздействие на экосистемы с последующим изменением почвенно-растительного покрова. Изменение режимов пожаров и таяние многолетней мерзлоты усилит процесс «зеленого опустынивания» на обширных территориях. Потепление климата окажет множественное воздействие на взаимодействия почвы, растительности и снежного покрова. Например, в более теплом климате мох и другая растительность растет быстрее, вследствие чего обеспечивается лучшая теплоизоляция многолетней мерзлоты в летний период и наилучшие условия питания северных оленей; однако снег может накапливаться на более толстом слое растительности, что защищает грунт от глубокого промерзания зимой (Tishkov, 2012).

Север и восток России очень богаты минеральными ресурсами (Korytnyi, 2009). Сырьевое ориентирование экономики северных и восточных областей России, которое не изменялось веками, в постсоветский период только возросло под влиянием рыночных условий. Ожидается, что сектор экономики, занимающийся освоением природных ресурсов (добыча полезных ископаемых и лесное хозяйство), будет превалировать на большинстве этих территорий и в следующие десятилетия. Но остаются серьезные социальные и экологические проблемы, включая противоречия между промышленной разработкой природных ресурсов и традиционными формами природопользования,

такими как разведение северных оленей. Снижение негативных последствий использования ресурсов является сложной задачей.

Примеры исследовательских вопросов - изменение землепользования и почвенно-растительного покрова

Как изменение климата подействует на землепользование в высоких широтах? Насколько сильно изменение климата повлияет на климатическую систему Земли?

Как должны быть усовершенствованы интеграционные модели, чтобы отразить специфику регионов, расположенных в высоких широтах?

Какова связь между землепользованием, почвенно-растительным покровом и горением биомассы в Евразии?

Каково воздействие горения биомассы в Сибири на региональный и глобальный климат и качество воздуха?

Каково настоящее и будущее воздействие горения биомассы/ лесных пожаров/ эмиссий кораблей на радиационный прогрев и состав атмосферы в Арктике и Сибири?

Урбанизация в Китае

За последние несколько десятилетий Китай прошел процесс быстрой урбанизации. Из-за быстрого роста населения, а также доли городского населения, резко возросло количество и общая площадь городов в Китае. Это развитие было особенно быстрым в восточных и южных прибрежных областях, таких как регион Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй, дельты рек Янцзы и Чжуцзян. Урбанизация оказывает существенное влияние на перенос излучения посредством изменения альbedo поверхности (рис. 30). Таким образом, быстрая урбанизация помимо проблем загрязнения воздуха создает и другие проблемы, такие как эффект тепловых островов над городами. Согласно исследованиям, эти эффекты очень значительны в китайских городах, другие исследования показывают, что урбанизация может оказать существенное влияние на осадки (*e.g. Wang et al., 2015*). Летом более высокая температура воздуха в городах может привести к увеличению потребления электроэнергии кондиционерами, в результате чего в воздух может попасть больше загрязняющих веществ и эмиссий углерода. Кроме того, тепловые острова над городами увеличивают вероятность аномальной жары в летнее время, что может оказать негативное воздействие на здоровье человека.

Поскольку в ближайшие 1-2 десятилетия Китай все еще будет находиться в процессе быстрого развития больших и малых городов, урбанизация и ее воздействие на региональный климат и устойчивое развитие станут одними из самых важных вопросов для китайского региона в рамках проекта РЕЕХ. Важно также использовать нынешний опыт восточных областей для устойчивого развития запада Китая.

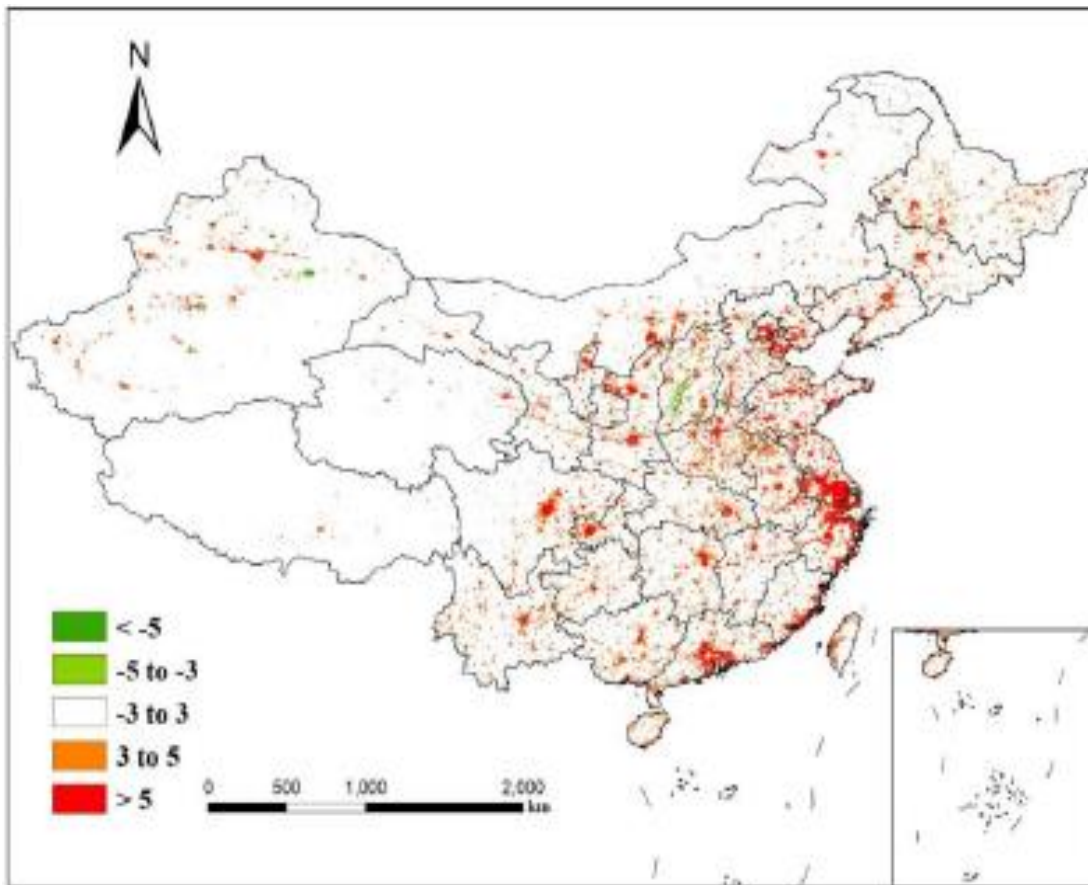


Рисунок 30 Изменение яркости между 1992-1996 и 2008-2012 гг. Примечание: красный цвет указывает на развитие городских районов в Китае. Рисунок из Han et al., 2014

Производство энергии



Рисунок 31 Топливный баланс производства электроэнергии в России. Рисунок из Vitukova et al., 2010

Специфика топливного баланса России привела к повышению уровня загрязнения. В северных и восточных городах, где для производства энергии в основном используется уголь, эмиссии в среднем в три раза выше, чем в городах, где энергию получают от использования газа или нефти. Географическое положение, неразвитая инфраструктура, суровый климат и сжигание угля являются основными факторами повышения уровня антропогенного загрязнения в этих областях.

Важным фактором для динамики эмиссий парниковых газов является топливный баланс. В маленьких городах основным источником эмиссий являются низкопроизводительные бойлерные. Обычно недостаток финансирования приводит к использованию в бойлерных низкокачественного угля и устаревших котлов. В степных зонах азиатской части России, Монголии, Казахстана и Бурятии основным источником эмиссий является сжигание сельскохозяйственных отходов.

Динамика эмиссий парниковых газов в России в основном определяется экономическим состоянием производства. В результате кризисных явлений 1990-1998 гг. ухудшение экологической ситуации в стране замедлилось: эмиссии сократились на 40%. Однако экологическая проблема не только осталась нерешенной, но значительно углубилась и превратилась в системную проблему. Спад производства мало повлиял на наиболее загрязняющие окружающую среду отрасли промышленности. Имела место технологическая деградация, очистные системы были уничтожены, производство работало с неполной нагрузкой, следовательно, производственные мощности стали использоваться неэффективно. Значительные количества загрязняющих веществ продолжали поступать из внутреннего сектора экономики. Эмиссии снизились в большинстве регионов страны и в 83% городов, но гораздо медленнее, чем производство. В результате, удельные эмиссии (в пересчете на стоимость продукта при сопоставимых ценах) возросли к концу 1990 гг. во всех типах городов, кроме миллионников (Vityukova et al., 2010). Это может иметь негативные последствия для экосистем. Например, вокруг Норильска существует около 2 млн га техногенных пустынь. Норильск, вероятно, является крупнейшим центром металлургической промышленности в мире, здесь выбрасывается более 2 миллионов тонн загрязняющих веществ в год (Groisman et al., 2013).

Таким образом, объем, структура и динамика эмиссий в основном определяются факторами, унаследованными от периода быстрой индустриализации и проектов, которые выполнялись 50 лет назад. Это служит большим источником выбросов в региональном масштабе. Общий фон загрязнения создает топливный баланс энергии и электроэнергетических предприятий. Также играют роль специализация производства, возраст и качество основных средств. Институциональная среда и политика региональных властей определяют степень модернизации основных средств, которая идет с различной скоростью и иногда в различных направлениях. Промышленность является наиболее динамичным фактором влияния на состояние окружающей среды в регионах. Но экологические проблемы часто являются системными, так как повышенные уровни антропогенных эмиссий типичны для регионов, где природные условия усиливают загрязнение. Это ведет к высокой вероятности загрязнения атмосферы.

Производство энергии в Китае

Китай по-прежнему сильно зависит от своих запасов угля для внутреннего производства энергии. Было подсчитано, что на уголь приходится около 85% энергетических резервов Китая. Ежегодный общий объем потребления энергии в Китае составляет около 3070 МТНЭ (миллионы тонн

нефтяного эквивалента), из которых 2050 МТНЭ производится с использованием угля (IEA, 2014). Потребление нефти неуклонно растет, но все еще приблизительно равно 480 МТНЭ. Биотопливо и генерация ТБО являются третьим по величине источником энергии (215 МТНЭ). Другие источники энергии, такие как газ, гидроэнергия, атомная энергия по-прежнему составляют малую часть. Поскольку Китай имеет ограниченные нефтяные резервы, были осуществлены инвестиции в технологии производства жидкого топлива из других источников, особенно в технологии перегонки угля в жидкое топливо. Эта зависимость от угля является основной причиной распространенной проблемы смога в восточной части Китая, так как многие угольные электростанции и промышленные печи до сих пор используют старые технологии с ненадлежащими методами фильтрации. Увеличение автомобильного движения в мегаполисах Китая также снижает качество воздуха, поэтому требуется модернизация местного транспорта. Современные чистые технологии срочно необходимы в производстве энергии и в транспорте для снижения воздействия загрязнения на общество.

3.6.2 ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

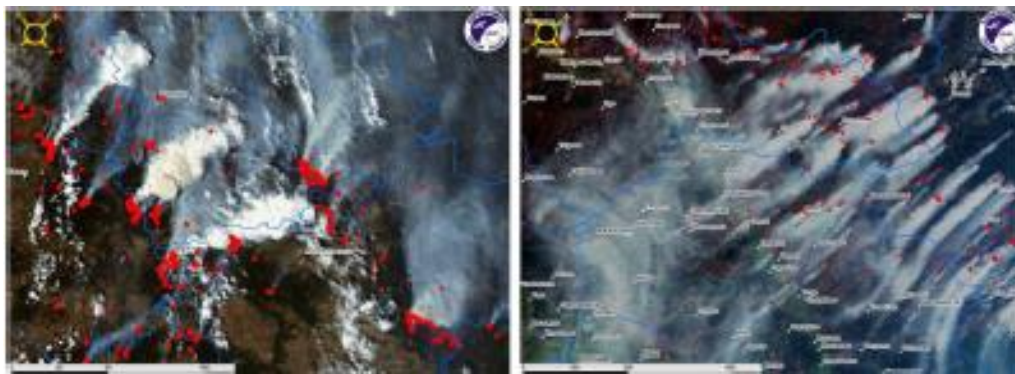


Рисунок 32 Пожары в Центральной России (слева), в Сибири и на Урале (справа). Спутниковые изображения предоставлены Valery Bondur, AEROCOSMOS

СИНОПСИС. Частота и интенсивность экстремальных погодных факторов значительно увеличилась за последние десятилетия в Европе, России и Китае, при этом ожидается дальнейший рост. Растущие риски и затраты вследствие влияния экстремальных факторов, а также их воздействие на население, окружающую среду, транспорт и промышленность недостаточно хорошо изучены в северных широтах Евразии. Важные исследовательские темы включают: анализ и совершенствование прогнозирования экстремальных погодных условий или событий; оценка воздействия природных пожаров (рис.32) на радиационный прогрев и атмосферный состав в регионе; воздействие экстремальных факторов на основные биогеохимические циклы; влияние возмущающих воздействий в лесах на эмиссии биогенных летучих органических компонентов и летучего органического азота.

Q-11. Как изменения физического, химического и биологического состояния различных экосистем, внутренних вод, прибрежных зон влияют на экономику и сообщества в регионе и наоборот?

Территория северной Евразии подвержена стихийным бедствиям. В будущем частота этих опасных природных явлений, скорее всего, будет возрастать при изменении климата и соответствующих изменениях почвенно-растительного покрова (IPCC, 2007). Число крупных гидрометеорологических событий, причиняющих значительный экономический и социальный ущерб, выросло в России примерно в 2 раза за период с 2001 по 2011 (Государственный доклад, 2011).

Опасные природные явления связаны с атмосферными процессами различных временных и пространственных масштабов, например, с сильными ветрами, наводнениями и оползнями, вызванными сильными осадками, пожарами, вызванными засухой и экстремальными температурами. Высокая температура и долгие засухи значительно снижают продуктивность и вызывают отмирание верхушек темнохвойных лесов. Ураганы достаточно частое явление в лесных зонах, например, ураган, произошедший в июле 2004, уничтожил лес на площади 78 тыс Га в Иркутской области (Vaschuk and Shvidenko, 2006). По другим типам опасных природных явлений не существует достоверной статистики.

Чтобы разработать сценарии будущей частоты и свойств опасных природных явлений, связанных с погодой, нужно проанализировать атмосферные механизмы циркуляционных структур, ответственных за большинство этих явлений - циклонов (вызывают относительно быстро проходящие опасные явления, такие как ветры и сильные осадки) и антициклонов (медленные крупномасштабные опасные явления, такие как засухи и пожары). Исследование траекторий циклонов/антициклонов, их частоты и интенсивности может представить статистическое основание для осмысления географического распределения и свойств основных опасных атмосферных явлений и экстремальных событий (*e.g.* Shmakin and Popova, 2006). Для будущих климатических прогнозов нужно интерпретировать опасные природные явления и экстремальные события с точки зрения статистики циклонов/антициклонов и проанализировать возможные изменения их географии и частоты.

Пожары – одни из главных природных воздействий на бореальные леса, четко определяющее структуру, состав и функционирование леса. Ежегодно горит около 0.5-1.5 % бореальных лесов, это значительная площадь, так как бореальные леса покрывают 15% суши на Земле (Kasischke, 2000; Conard et al., 2002). Изменение климата уже значительно воздействует на режимы пожаров в Северной Евразии. Более частые и сильные катастрофические (мега-) пожары становятся типичными для данного региона. Такие пожары охватывают площади в сотни тысяч гектаров в крупных географических регионах; приводят к разрушению лесных экосистем; снижают биоразнообразие; могут распространяться на заболоченные земли, которые обычно не выгорали; ведут к крупным экономическим потерям; разрушают здоровье и условия жизни местного населения; приводят к «зеленому опустыниванию» - необратимой трансформации лесного покрова на долгий период времени (Shvidenko and Schepaschenko, 2013). Мегапожары создают на пораженных территориях специфические погодные условия, которые сопоставимы с крупномасштабными системами с избыточным давлением (~30 млн. га и более). Общая площадь выгорания на российской территории за период 1998-2010 гг. оценивается в $8.2 \pm 0.8 \times 10^6$ га; около двух третей этой территории – бореальные леса. В этот период углеродный баланс в связи с пожарами (общее количество углерода в сожженном топливе) оценивался в 121 ± 28 Тг С год⁻¹ (Shvidenko et al. 2011). Современные модельные прогнозы предполагают удвоение числа пожаров на конец века. Также прогнозируется укрупнение масштабов катастрофических пожаров, выходящих из-под контроля, и усиление их интенсивности. По предварительным оценкам, вследствие горения глубоких слоев почвы, в 2-4 раза увеличатся эмиссии углерода (Gromtsev, 2002; Malevsky-Malevich et al., 2008; Flannigan et al., 2009; Shvidenko et al., 2011). Во время и после пожара в лесной экосистеме, включая почву, происходят следующие значительные изменения:

- сгорает значительное количество биомассы и большие количества углерода и азота выбрасываются в атмосферу в виде диоксида углерода, других газов или частиц (Harden et al., 2000)
- пожар изменяет структуру микробного населения почвы и структуру растительности (Dooley and Treseder, 2012)
- пожары определяют структуру растительности, динамику сукцессии и фрагментацию лесного покрова, состав видов деревьев и продуктивность бореальных лесов
- пожар является важным фактором, определяющим динамику стока углерода в бореальных лесах (Jonsson and Wardle, 2010).

Возмущающее воздействие от пожаров, нашествий вредителей и вспышек болезней значительно влияют на эмиссии биогенных летучих органических соединений и летучего органического азота (Isidorov, 2001) и, следовательно, на формирование атмосферных аэрозолей. Усиление режимов пожаров также будет оказывать влияние на количество сажи в атмосфере, и таким образом влиять на альбедо криосферы.

Важность экстремальных погодных факторов для функционирования и выживания северных экосистем и их воздействие на окружающую среду и население этих регионов обуславливают большое число исследовательских вопросов в рамках научной повестки РЕЕХ, в том числе (i) анализ и совершенствование прогнозирования экстремальных погодных условий или событий; (ii) оценка воздействия природных пожаров на радиационный прогрев и атмосферный состав в регионе; (iii) воздействие экстремальных факторов на основные биогеохимические циклы; (iv) способы включения экстремальных воздействий в модели системы Земли; (v) влияние возмущающих воздействий в лесах на эмиссии биогенных летучих органических соединений и летучего органического азота.

Здоровье населения

В России около 60% общих выбросов в атмосферу поступает от стационарных источников, т.е. промышленности и отопительных систем коммунального хозяйства. Эту оценочную цифру следует брать в расчет как наиболее достоверную по выбросам в 1100 российских городах с общим населением более 95.4 млн. человек. Анализ динамики эмиссий в российских городах, где находятся главные источники выбросов, крайне важен для определения факторов загрязнения (Bityukova and Kasimov, 2012).

Одной из тематик научных исследований РЕЕХ являются количественное описание антропогенного воздействия на качество воздуха и долгосрочное воздействие на климат. В Сибири расположены крупные центры добычи меди, никеля и некоторых других цветных металлов (Красноярск, Мурманск, Оренбург и Братск). Здесь экологическая ситуация вызывает особую озабоченность. В Сибири также находятся крупные центры, где электроэнергия вырабатывается угольными электростанциями, например, Троицк Челябинской области, центры нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности (Омск, Ангарск, Уфа) и области где нефтедобыча только начинается (Томская область).

Климатические изменения должны рассматриваться среди других факторов риска для здоровья населения, таких как загрязнение окружающей среды, проблема продовольственной безопасности,

и ухудшение качества питьевой воды. Анализ публикаций показывает, что влияние изменения климата на здоровье человека проявляется прямо и косвенно. В частности, изменение климата ведет к изменению границ растительности (Malkhazova et al., 2012). В свою очередь это может привести к изменению зон инфекционных заболеваний и изменению общей эпидемиологической ситуации. Такковы наиболее важные непрямые последствия изменения климата (Malkhazova et al., 2013).

Здоровье и качество воздуха в Китае

В 2011 году доля городского населения материкового Китая впервые превысила 50%. Общая площадь урбанизированных регионов также превысила половину от общей площади территории Китая (IEAS, 2012). Крупномасштабные и ускоренные урбанизация и индустриализация являются уникальным явлением в истории, решения для борьбы с негативными последствиями которого пока не существует. В настоящее время очень сильное загрязнение воздуха наблюдается примерно в 20% китайских городов, особенно очевидно загрязнение воздуха PM_{2.5}. По оценкам, загрязнение воздуха в Китае ведет к преждевременной смерти до 2 млн человек в год (ИНМЕ, 2013), а также сокращает продолжительность жизни в среднем на 5,5 лет. Перенос загрязняющих веществ в закрытые помещения значительно сказывается на смертности, связанной с качеством воздуха, так как люди проводят более 90% своего времени в помещении (Monn and Becker, 1999; Smith *et al.*, 2000; Ding *et al.*, 2012; Anenberg *et al.*, 2013; Guan *et al.*, 2014).

Крупнейшим источником загрязнения воздуха в Китае являются процессы сжигания и другие промышленные процессы (Schindell *et al.*, 2012). Эмиссии бытового сектора в густонаселенных районах происходят в основном при сжигании угля, а в сельской местности - от сжигания сельскохозяйственных отходов. Промышленные эмиссии в основном связаны с производством кирпича, цемента, кокса и чугуна. Для определения общей аэрозольной массы и численной концентрации, помимо первичной эмиссии аэрозолей также важно образование вторичного аэрозоля. Таким образом, эмиссии летучих органических соединений и тропосферного озона играют важную роль в качестве воздуха на региональном уровне. В восточной части Китая природные источники аэрозоля, такие как пыль из пустынь также играют важную роль.

Разрушение многолетней мерзлоты и повреждение инфраструктуры

Разрушение многолетней мерзлоты (рис.33) вызовет серьезные повреждения инфраструктуры, экосистем и водных систем в Арктике и бореальных регионах, например:

- Повреждение трубопроводов и строений
- Деформацию дорог и железнодорожных путей в России, Монголии и Китае
- Изменения в распределении ионов в почвенной воде в молодых и древних оползнях.
- Криогенные оползни, которые приводят к пространственным и временным изменениям травы и ивняка
- Формирование очень соленых скоплений грунтовых вод («соляных ловушек») в локальных депрессиях на верхней границе многолетней мерзлоты

Вследствие того, что большие площади на севере Евразии покрыты многолетней мерзлотой (также см раздел 3.3.3: Территории с риском таяния многолетней мерзлоты), имеются многочисленные инфраструктурные проблемы, связанные с возможными изменениями толщины и температуры замороженного грунта, и, следовательно, его механических свойств. Изменения криосферы в

результате изменения климата являются одним из самых серьезных вопросов для инфраструктуры Северной Евразии, так как эта инфраструктура буквально стоит на многолетней мерзлоте. Более того, наблюдается интересная взаимосвязь уменьшения ледового покрытия Северного Ледовитого океана, приводящего к повышению влажности и количества осадков на континенте, и дальнейшего утолщения и более длительного годового снежного покрова. Снег является хорошим теплоизолятором и воздействует на среднюю температуру поверхности, играя, таким образом, потенциально важную роль в ускорении таяния многолетней мерзлоты.

Повышенный риск крупного ущерба локальной инфраструктуре может вызвать значительные социальные проблемы и давление на местную экономику. Таяние многолетней мерзлоты подвергает риску множество объектов инфраструктуры, например, здания, дороги, трубопроводы, железные дороги, и т.п. Разрушение инфраструктуры может иметь серьезные экологические последствия, как, например, авария на трубопроводе к Возейскому нефтяному месторождению на севере России в 1994 г., в результате которой разлилось 160 000 тон нефти, что явилось крупнейшим в мире разливом нефти на суше (UNEP Year Book, 2013). Затраты на обслуживание и ремонт инфраструктуры, связанные с таянием и разрушением многолетней мерзлоты, в последнее время возросли и, вероятно, будут расти в будущем. Эта проблема особенно актуальна в районах многолетней мерзлоты с островами талых грунтов, где даже небольшие изменения ее температуры могут вызывать значительные повреждения инфраструктуры. Большинство населенных пунктов в зоне многолетней мерзлоты расположены на побережье, где для строений и дорог велик риск эрозии. После повреждения инфраструктуры местные жители и коренные сообщества часто вынуждены переселяться, это может вызывать изменения или даже исчезновение местных сообществ, культур и традиций (UNEP Year Book, 2013).

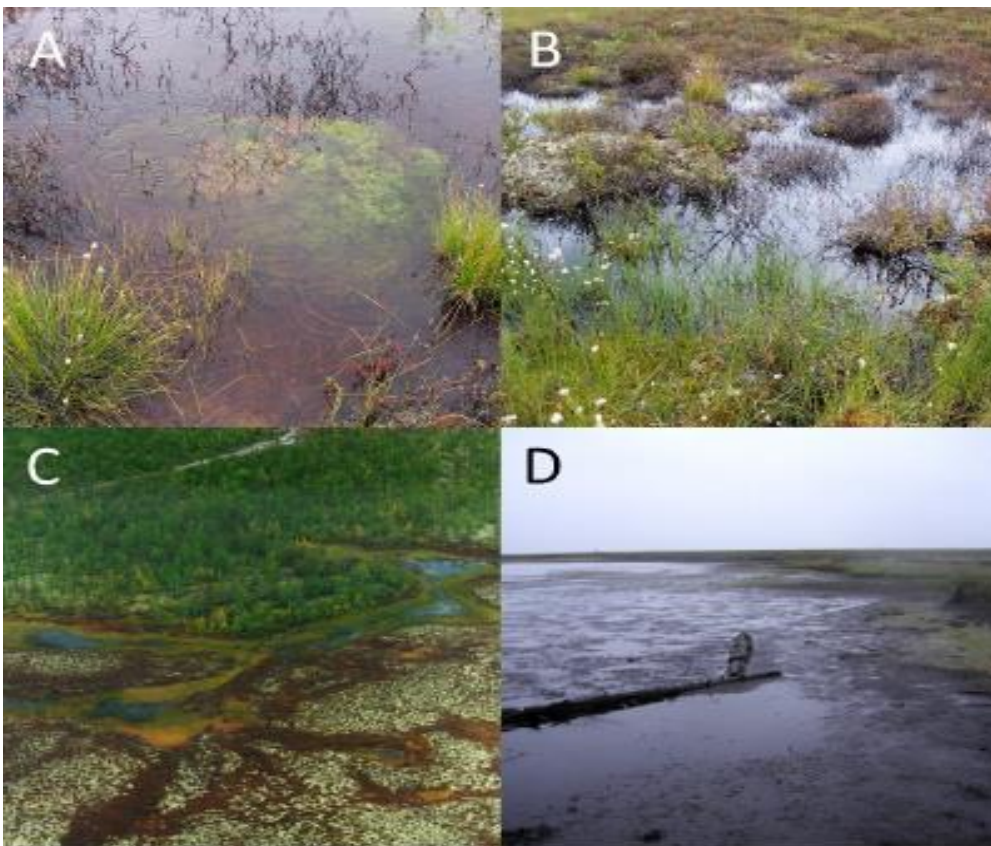


Рисунок 33 Деградация многолетней мерзлоты. (А-В) Оседание свежего термокарста - карликовые кустарники ушли под воду. (С) таяние многолетней мерзлоты, болотистые почвы на северо-западе Сибири. (D) Берега озер в тундровой зоне активно тают, большое озеро исчезает. Фотографии Sergej Kirpotin / TSU

В северной Евразии от восточной части Баренцева моря до Берингова моря многолетняя мерзлота располагается непосредственно на берегу моря. На многих таких прибрежных территориях уровень моря поднимается, и постоянное разрушение многолетней мерзлоты приводит к значительной эрозии берега и к возможности обрушения береговых сооружений, таких как маяки, порты, дома и т.п. В этом регионе подъем уровня моря неразрывно связан с разрушением многолетней мерзлоты, и этот вопрос требует рассмотрения в будущих исследованиях.

Осмысление и измерение искусственных радионуклидов в компонентах морских экосистем необходимо для повышения готовности к чрезвычайным ситуациям и оценки риска возможных чрезвычайных происшествий, связанных с утечкой радиоактивных веществ. Это нужно также для повышения осведомленности и знаний среди общественности и заинтересованных лиц в регионе о проблемах и рисках, связанных с ядерными технологиями, радиоактивности окружающей среды, а также для готовности к чрезвычайным ситуациям.

Современное состояние радиоактивного загрязнения наземных и морских экосистем арктических районов Европы будет исследоваться по результатам экологических проб, отобранных в финской Лапландии, Финнмарке и Тромсе в Норвегии, на Кольском полуострове и в Баренцевом море. Результаты дадут последнюю информацию о существующих уровнях, возникновении и поведении радиоактивных веществ в арктической среде и пищевых цепях. Также, станет возможным определить происхождение радиоактивных веществ и оценить риски, которые они могут вызывать в случае чрезвычайного происшествия.

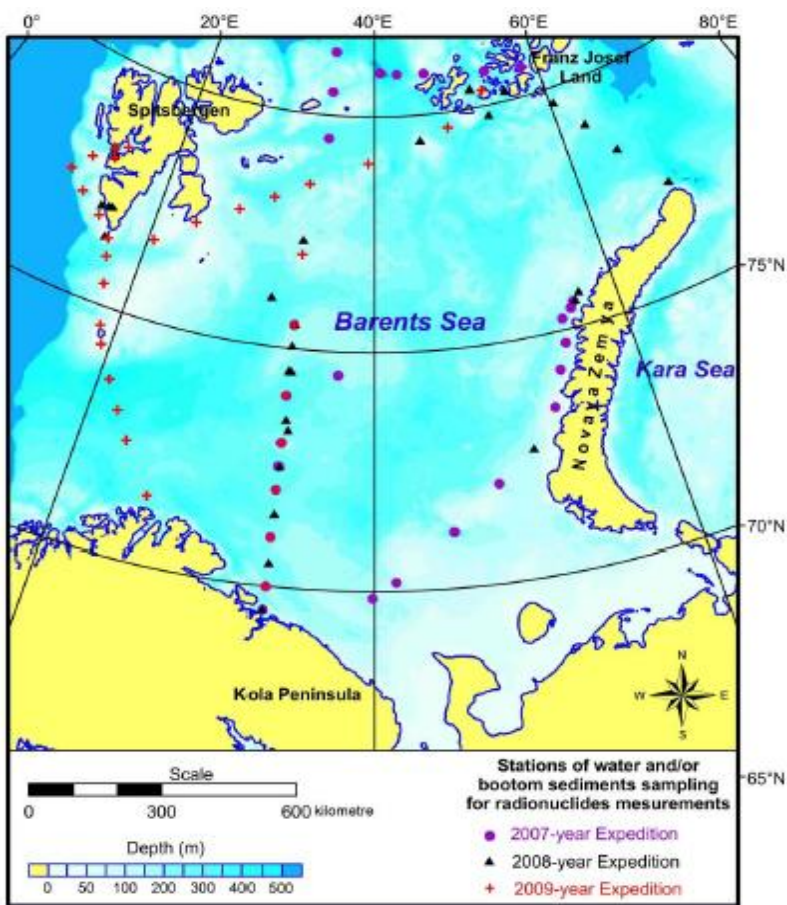


Рисунок 34 Станции для отбора радиоэкологических проб в ходе экспедиций. Рисунок Gennady Matishov

Необходимо организовать ежегодные экспедиции для отбора проб (рис.34) с целью разработки моделей прогнозирования распространения радионуклидов в северной морской среде и оценки текущего состояния радиоактивного загрязнения морских экосистем в арктических районах Европы. Ввиду возросшего интереса к добыче нефти и газа в этом регионе, особое внимание нужно уделить анализу NORM (радиоактивных материалов природного происхождения) с целью понимания существующих уровней загрязнения. Работа будет сосредоточена на атмосферном моделировании и оценке распространения радионуклидов в случае аварий в арктических районах Европы с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, включая сценарии ядерных аварий для моделирования распространения.

3.6.3 СОЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА



Рисунок 35 Загрязнение озоном в Нанкине в летний период. Фотография Xie Yuning (Университет Нанкина)

СИНОПСИС Климат и погода сильно влияют на условия жизни сообществ, здоровье людей, уровень заболеваемости и способность к адаптации. Степень уязвимости сообществ, в том числе их способность к адаптации, сильно варьируется в зависимости от физической среды, демографической структуры и экономической деятельности. РЕЕХ оценивает сферы, наиболее уязвимые к последствиям изменения климата. РЕЕХ будет помогать разрабатывать стратегии смягчения последствий изменения климата. В целом, РЕЕХ анализирует научную основу и стратегии по адаптации и смягчению последствий изменения климата (AMS) для сообществ региона с особым вниманием на лесной сектор и сельское хозяйство.

Q-12 В каких направлениях населенные территории уязвимы перед изменением климата? Как может быть уменьшена их уязвимость, а их способность к адаптации увеличена? Какие реакции могут быть выявлены для адаптации к изменениям климата и смягчения их последствий?

Короткоживущие климатические факторы (SLCF), такие как сажа и озон, являются одними из наиболее важных, но недостаточно количественно описанных факторов в изменении климата Арктики и влиянии на качество воздуха. Климатическое воздействие SLCF тесно связано с изменениями криосферы и соответствующей деятельностью человека. Саже отводится особая роль в будущих стратегиях контроля эмиссий, так как это единственный аэрозольный компонент, уменьшение количества которого, скорее всего, будет благоприятно и для климата, и для здоровья человека. Вопросы здоровья важны для мультидисциплинарных исследований Северной Евразии, так как комфортные условия жизни человека и условия для животноводства резко меняются. Такие изменения можно выразить с помощью комплексных параметров, объединяющих прямые воздействия, например, температуру и скорость ветра, и косвенные воздействия некоторых климатических и неклиматических факторов, таких как изменения атмосферного давления и частота неблагоприятных погодных условий (аномальная жара или сильный ветер). В течение последних десятилетий условия для человека в северной Евразии стали в основном более комфортными, но это сильно зависит от региона и сезона (Zolotokrylin et al., 2012).

И север, и восток России мало населены, в основном, по причине оттока населения в 1990-х из-за суровых и неблагоприятных условий жизни и неблагоприятной экономической ситуации. Тренд на сокращение населения сменил предшествующий долголетний приток. Сочетание оттока и естественного уменьшения (с некоторыми региональными исключениями в этнических республиках и автономных округах с нефтегазодобывающей промышленностью) привели к стабильному снижению численности населения в большинстве северных и восточных регионах России с 1990 г. В постсоветский период численность населения восточной части России снизилась на 2.7 млн. чел., а население арктической зоны России уменьшилось почти на треть (500 тыс.), что не соответствует общемировой динамике в арктических территориях (Glezer, 2007a, b). Особенно заметно изменение численности населения на северо-востоке России: население Чукотского автономного округа уменьшилось на 68 %, Магаданской области – на 59 %, Камчатского края – на 33%.

Географические и этнические факторы воздействуют на демографию и вид поселения в регионе. К географическим факторам относятся экологические условия и сочетание городских и сельских территорий. Этнический состав северной и восточной России характеризуется двумя различными типами местных сообществ - кочевыми северными народами и вновь прибывшими переселенцами, в основном это русские, украинцы и татары. Эти сообщества формируются из весьма различных людей со специфическими психологическими типами и путями адаптации к природным условиям и интеграции в окружающую среду. Таким образом, воздействие климата и других природных изменений на эти два типа сообществ следует изучать отдельно.

Относительно меньшим постсоветским трансформациям в 1990-х и 2000-х подверглись области с большой долей коренного населения, занятого традиционным природопользованием, и бóльшим – области с большей долей россиян и развитой добывающей промышленностью. Различия в трансформации между поселениями с преобладающим коренным и российским населением очевидны: например, в Чукотском автономном округе - в первых численность населения остается постоянной лишь с небольшим снижением, а последние исчезли полностью или численность населения в них сильно упала (Litvinenko 2012, 2013).

При оценке влияния климатических и других природных изменений на общество необходимо учитывать, что окружающая среда во многих городах России и Китая, расположенных в экономически отсталых регионах, неудовлетворительна и вряд ли может справиться с неблагоприятным воздействием. Должны быть изучены различные параметры климата, такие как температура (включая сезонные, недельные и дневные градиенты; экстремальные воздействия), сильные ветры, снегопады, снежные штормы и осадки; должны рассматриваться частота появления и длительность событий. Эти климатические параметры влияют на здоровье людей, частоту заболеваний, адаптационный потенциал и экономическое развитие в целом.

Интегрированные оценки ослабления негативных последствий для окружающей среды и адаптации к ним, и другие исследования

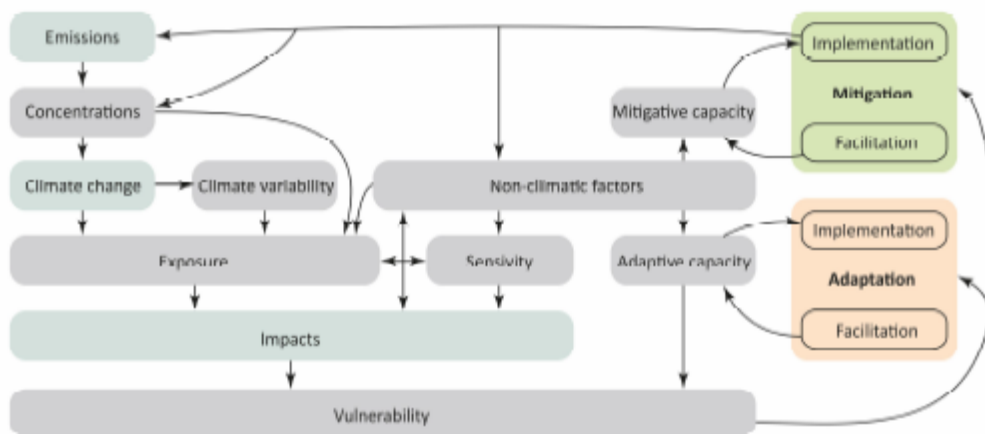


Рисунок 36 Рамочная основа для оценки воздействия изменения климата, уязвимости и адаптации. Рисунок адаптирован из Füssler and Klein, 2006 и Klein and Juhola, 2014.

Разработка стратегий по адаптации к изменению климата и смягчению последствий (AMS) является сложной задачей. РЕЕХ будет решать эту проблему с помощью новых методик прикладного системного анализа. Адаптация и смягчение последствий будут рассматриваться одновременно, с учетом крупных неопределенностей как физических, так и социальных систем, а также различных характеристик и потребностей неоднородных регионов, рассматриваемых в рамках РЕЕХ. Схематически процесс развития AMS представлен на рис.36.

Несмотря на важную роль городских территорий, они недостаточно изучены в контексте глобальных изменений окружающей среды (The Urbanization and Global Environmental Change (UGEC), 2012). Большинство исследований было направлено на воздействие городских территорий на глобальное изменение климата (Rosenzweig et al., 2010), тогда как влияние изменения климата на городские территории изучено меньше. Последнее особенно важно, так как внимание к климатическим исследованиям в области адаптации к изменениям климата растет, и требуется информация, связанная с городским проектированием и планированием, чувствительным к климату. Будущее территориальное и городское планирование в России должно быть основано на исследованиях и сценариях природных изменений и угроз. Значительное количество соответствующих географических данных уже существуют; они должны быть включены в междисциплинарные исследования. Программа РЕЕХ должна стать источником достоверных данных для целей зонирования и городского планирования в арктических и бореальных регионах Евразии на основе прогнозов на следующие 40 лет. Городские территории имеют свои особенности,

такие как местоположение, структура и плотность населения, что делает их жителей и имущество уязвимыми для изменений климата. Сейчас, некоторые города начали подготовку стратегий адаптации к изменению климата (Ribeiro et al. 2009, Hunt, Watkiss 2011). Эти стратегии имеют различные формы, большинство из них фокусируется на определении локальной чувствительности и разработке мер по снижению такой чувствительности (Sanchez-Rodriguez, 2009). Исследование, проведенное среди российских регионов, показывает, что лишь немногие из них начали формулировать стратегии адаптации, в то время как планы по смягчению последствий пока полностью отсутствуют (Skryzhevskaya et al., 2015).

Крупные научные вопросы РЕЕХ нацелены на поддержку разработки региональных стратегий адаптации и снижения негативных последствий изменения климата. Учитывая резкий характер ожидаемых изменений климата и их воздействий на окружающую среду, эксплуатацию экосистем, уровень жизни, здоровье населения и адаптацию – снижение уязвимости общества и экосистем к изменению климата является одним из наиболее важных социально-экономических аспектов в регионе РЕЕХ. Адаптация включает в себя адаптивную способность экосистем и социально-экономическую готовность к реализации запланированных мероприятий по адаптации. Адаптация и снижение негативных последствий могут быть эффективны, если они являются частью обширной стратегии, куда войдут все соответствующие сектора национальной экономики как в рамках политических решений, так и в рамках институциональной деятельности. В повестке научных исследований РЕЕХ также рассматриваются существующие политические и институциональные механизмы для решения вопросов изменения климата.

Важно исследовать взаимодействия между изменением окружающей среды и постсоветскими трансформациями использования природных ресурсов в северной части Евразии для того, чтобы оценить сложность их социально-экологических последствий на региональном и местном уровнях (Litvinenko, 2012; Tynkkynen, 2007; 2009; 2010; 2013). Необходимо прояснить динамику численности населения северных регионов России в 1990-2012, а также связь между внутрирегиональными различиями в динамике населения, пространственными трансформациями использования природных ресурсов и этническим составом населения. Было бы желательно разработать систему раннего предупреждения для своевременного смягчения негативных социально-экологических последствий изменений окружающей среды и изменений в доступности природных ресурсов. Такие системы были бы полезны для федеральных, региональных и местных органов власти, а также местного населения.

Окружающая среда и этническое разнообразие

Этническое разнообразие определяется как вариативность человечества с точки зрения сочетания биологических, культурных и лингвистических особенностей, называемых этническими маркерами. Этнические маркеры делят человечество на ограниченное число этнических групп, каждая из которых представляет собой уникальное сочетание этнических маркеров. По разным причинам, на практике этнические группы легче всего определить по лингвистическим особенностям. В большинстве случаев, группа людей, разделяющая уникальный язык, также формирует уникальную этническую группу.

В условиях глобального процесса изменения климата и ухудшения состояния окружающей среды, этническое разнообразие находится в наибольшей опасности среди других аспектов человеческого наследия. В настоящее время в мире существует около 6000-7000 различных языков и культур, но это число уменьшается на 1-2 каждую неделю. В зависимости от метода расчета от 40 до 80% мирового этнического разнообразия уже находится под угрозой, и если ничего не будет сделано для его поддержания, то только 10% из существующих в настоящее время этнических групп переживет XXI век.

Степень угрозы исчезновения этнических групп может быть даже больше, чем угрозы для биосферы. Воздействие обоих типов угроз аналогично. В краткосрочной перспективе, потеря этнической группы, казалось бы, значит, так же мало, как потеря отдельных биологических видов, но в долгосрочной перспективе каждая потеря невосполнима и незаменима. С каждой новой потерей языка и сопутствующей системы культурного наследия, мы теряем неизвестный потенциал, который, как может оказаться, имеет важнейшее значение для выживания человечества.

За потерей этнического разнообразия лежат те же факторы, что и за ухудшением состояния окружающей среды и изменением климата. Важнейшим влияющим фактором, и наиболее трудно управляемым, является существенная перенаселенность земного шара. Для того, чтобы сохранить и биоразнообразие, и этническое разнообразие необходимо одновременно сократить общее потребление и сосредоточиться на возобновляемых источниках энергии и продовольствия.

Так как большинство этнических групп в мире малы, а их средства к существованию специализированы согласно их культуре, то любое изменение в их непосредственной среде может сделать их традиционный образ жизни неустойчивым. Эти изменения могут быть связаны с повышением уровня моря, потеплением морской воды, таянием ледяного покрова, таянием многолетней мерзлоты, наводнениями на реках, изменением характера дождей или смещением растительных зон. Таковы прямые последствия изменения климата и ухудшения состояния окружающей среды для этнического разнообразия.

Еще большую угрозу представляют косвенные последствия. Так как перенаселенная планета зависит от ограниченного количества природных ресурсов, непосредственная среда малых этнических групп уязвима для негативного воздействия доминирующих крупных групп населения и народов. Последствия изменения климата могут привести к быстрому и массовому переселению в районы, которые ранее были населены только малыми этническими группами. Шахты, трубопроводы, дороги и новые городские центры в основном оказывают негативное воздействие на этническое разнообразие, но эти процессы могут также способствовать новым социально-экономическим решениям, поскольку местные сообщества должны выработать новые подходы, чтобы справляться с изменениями (e.g. Tynkkynen, 2007).

Эти проблемы являются глобальными, они наблюдаются на всех континентах, кроме Антарктиды. Тем не менее, они в некоторых отношениях особенно остро стоят в исследуемой в рамках РЕЕХ транс-евразийской географической зоне, которая включает морские побережья Ледовитого и Тихого океанов, многолетнюю мерзлоту Евразии, а также несколько крупных рек в Сибири и Китае. Поэтому этническое разнообразие должно быть среди параметров постоянно контролируемых РЕЕХ.

Примеры исследовательских вопросов

Каковы наиболее вероятные траектории смещения биоклиматических зон вследствие изменения климата и окружающей среды? Какое воздействие это окажет на фактическое перераспределение крупных классов почвенно-растительного покрова?

Какова стратегия перехода к устойчивому землепользованию при ожидаемых изменениях?

Какова региональная специфика ожидаемого усиления режимов возмущений (природных пожаров, вспышек болезней и нашествий насекомых)? Как это повлияет на взаимодействие между экосистемами и окружающей средой?

Каковы буферная емкость и адаптационный потенциал бореальных лесов? Как ожидаемые изменения климата и окружающей среды повлияют на функционирование и жизнеспособность бореальных лесов? Как это повлияет на биоразнообразие?

Какова вероятность нелинейных изменений функционирования и жизнеспособности экосистем в высоких широтах (особенно бореальных лесов)?

Какова специфика перехода к устойчивому сельскому хозяйству?

Какова способность сообществ по сокращению эмиссий и адаптации к изменению климата?

Какие будущие пути, ведущие к социальным преобразованиям, можно выявить для сообществ в регионе РЕЕХ?

Как меняется этническое разнообразие?

3.7 ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ, ВЗАИМОСВЯЗИ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ



СИНОПСИС. Обратные связи являются важными компонентами нашей климатической системы, так как они либо увеличивают, либо уменьшают изменения, происходящие в параметрах, связанных с климатом, находясь под внешним воздействием (IPCC, 2013). Одна из первых петель обратной связи, которая будет определена количественно, связана с температурой окружающей среды и общей первичной продукцией (Kulmala *et al.*, 2014a,b). Северо-евразийский арктико-бореальный географический регион охватывает широкий спектр взаимодействий и процессов обратной связи между человеком и природными системами. Причем человек действует и как источник изменений климата и окружающей среды, и как реципиент их воздействия. Последствия изменения климата на биогеохимические циклы еще недостаточно поняты, существует много механизмов обратной связи, которые трудно поддаются количественной оценке. В городских и промышленных регионах неотъемлемой частью биогеохимических циклов являются антропогенные источники, такие как промышленность и удобрения. Измерения изменений гидрологических и биогеохимических циклов необходимы для построения и параметризации следующего поколения моделей системы Земли.

Q-13 Как изменения состояния криосферы и последующие изменения в экосистемах повлияют на климат Арктики и погодные системы, включая риск стихийных бедствий?

Q-14 Каково суммарное воздействие различных механизмов обратной связи на (i) изменения почвенно-растительного покрова, (ii) фотосинтетическую активность, (iii) обмен парниковых газов и эмиссии биогенных летучих органических соединений, (iv) образование аэрозолей и облаков, а также радиационное воздействие? Как они изменяются в зависимости от изменения климата в региональном и глобальном масштабах?

Q-15. Как интенсивные урбанизационные процессы изменяют локальный и региональный климат и окружающую среду?

Обратные связи и взаимосвязи

Исследовательский подход РЕЕХ подчеркивает целостное понимание обратных связей в климате и системе Земли, а также их влияние на биогеохимические циклы в регионе Северной Евразии. Континентальная биосфера, в том числе Северная Евразия, играет важную роль в системе климата посредством процессов с участием углекислого газа и других парниковых газов в системе суша-атмосфера (Heimann and Reichstein, 2008; Ballantyne *et al.*, 2012). Кроме того, бореальные леса действуют в качестве основного источника природных аэрозольных частиц и их прекурсоров (Pöschl, 2005; Guenther *et al.*, 2012). Исследования в рамках РЕЕХ сильно ориентированы на понимание связей между температурой, концентрациями CO₂ и процессами образования аэрозолей, учитывая то, что деятельность человека оказывает сильное влияние на природные процессы в континууме суша-атмосфера (см крупномасштабные научно-исследовательские схемы РЕЕХ в главе 3.1)

Несколько гипотез комплексных петель обратной связи были представлены, например, в предложенных Charlson *et al.* (1987) обратных связях “CLAW” между океаническими экосистемами и климатом Земли. Гипотеза CLAW связывает биохимию океана и климат посредством

отрицательной обратной связи с участием образования облачных ядер конденсации в результате эмиссий серы планктоном (*e.g.* Quinn and Bates, 2011). Следуя этому направлению мыслей, одной из самых интересных гипотез в рамках РЕЕХ является так называемая гипотеза СОВАСС (обратные связи континентальной биосферы, аэрозолей, облаков и климата) (Kulmala *et al.*, 2004; 2014b). Гипотеза СОВАСС подразумевает две частично перекрывающихся петли (Рис. 37), которые связывают концентрацию углекислого газа в атмосфере, температуру окружающей среды, общую первичную продукцию, образование биогенных вторичных органических аэрозолей, облака и перенос излучения.

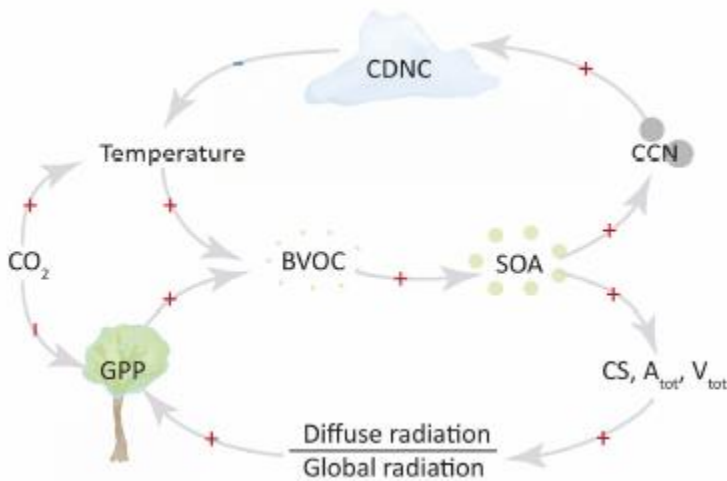


Рисунок 37 Две петли обратной связи гипотезы СОВАСС (континентальные биосфера, аэрозоли, облака и климат). BVOC=биогенные летучие органические соединения, SOA=вторичный органический аэрозоль, CS=сток конденсации, A_{tot}=общая площадь поверхности аэрозоля, V_{tot}=общий объем аэрозоля, CCN=облачные ядра конденсации, CDNC=численная концентрация облачных капелек и GPP=общая первичная продуктивность, которая является параметром измерения фотосинтеза в масштабе экосистемы (Kulmala *et al.* 2014a,b).

Биогеохимические циклы

Воздействие изменения климата на биогеохимические циклы до сих пор изучено недостаточно, существует множество механизмов обратной связи, которые сложно описать количественно (Arneth *et al.*, 2010a; Kulmala *et al.*, 2014a,b). Они связаны, например, с взаимодействием циклов углерода и азота, процессами в многолетней мерзлоте и фитотоксичностью озона (Arneth *et al.*, 2010a,b) или с эмиссиями и атмосферной химией биогенных летучих органических соединений (Grote and Niinemets, 2008; Mauldin *et al.*, 2012), последующим формированием аэрозолей (Tunved *et al.*, 2006; Kulmala *et al.*, 2011a) и взаимодействиями аэрозоля и облачности (McComiskey and Feingold, 2012; Penner *et al.*, 2012). Для правильного понимания динамики этих процессов важно количественно описать диапазон эмиссий и потоков от различных типов экосистем и сред и их связей с продуктивностью экосистем, а также учесть то, что могут существовать неизвестные ранее источники и процессы (Su *et al.*, 2011; Kulmala and Petäjä, 2011; Bäck *et al.*, 2010).

3.7.1 ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

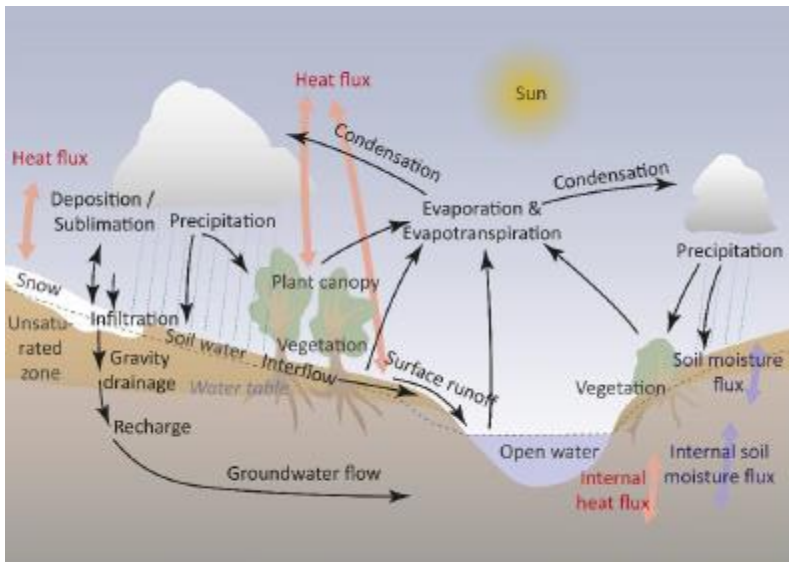


Рисунок 38 Схематическое изображение гидрологического цикла.

СИНОПСИС. Круговорот воды, или гидрологический цикл, (рис.38) представляет собой набор множества различных элементов, таких как испарение воды с поверхности океана и оголенной почвы, процессы испарения и транспирации, происходящие в растительности, перенос паров воды в атмосфере, образование облачных капель и облачная динамика, жидкие и твердые осадки, динамика ледников и снежного покрова, поверхностный и речной сток, а также подземные процессы, например, динамика корневой системы растительности и внутрпочвенный сток. Изменение климата может значительно повлиять на большинство элементов гидрологического цикла, вызывая положительные или отрицательные обратные связи. Изменения в гидрологическом цикле часто происходят в региональном или местном масштабе (например, изменения состава экосистемы или процессов стока), но они могут привести к крупномасштабным или даже глобальным изменениям.

Гидрологический цикл тесно связан с другими биогеохимическими циклами. Изменение климата повлечет за собой изменение гидрологического цикла, воздействуя на все процессы, связанные с переносом воды (например, испарение и транспирация, атмосферный перенос, фазовый переход, образование облаков, осадки и их пространственное распределение, таяние и образование морского льда, океанические течения, общая циркуляция атмосферы, а также таяние и динамика многолетней мерзлоты). Так как гидрология жизненно важна для биогеохимических циклов и поперечных потоков элементов, таких как углерод, азот и фосфор между наземными и водными экосистемами, то изменение гидрологии вследствие изменения климата является крайне важным вопросом. В водных экосистемах воздействия на потоки тепловой энергии в свою очередь могут влиять, например, на эффективность переноса углеродсодержащих газов, таких как CO_2 или CH_4 .

Осадки – это важный компонент гидрологического цикла, обладающий большой пространственной и временной изменчивостью. Недостаточное понимание некоторых процессов, связанных с осадками, в сочетании с недостатком проводимых детальных и точных измерений в глобальном масштабе ограничивают возможность количественного описания осадков. Это особенно верно для регионов высоких широт, где наблюдения и измерения особенно редки, а процессы слабо изучены.

Последние восстановления нескольких спутниковых продуктов для каждого компонента наземного водного цикла дают возможность оценить водный баланс в глобальном масштабе (Sahoo *et al.*,

2011). Глобальные осадки восстанавливаются с очень высоким пространственным и временным разрешением путем комбинирования микроволновых и инфракрасных спутниковых измерений (Huffman *et al.*, 2007; Joyce *et al.*, 2004; Kummerow *et al.*, 2001; Sorooshian *et al.*, 2000). Крупномасштабные оценки глобальных осадков были получены путем применения энергетического баланса, процессных и эмпирических моделей к поверхностному излучению, метеорологии и характеристикам растительности, полученных с помощью спутников (*e.g.* Fisher *et al.*, 2008; Mu *et al.*, 2007; Sheffield *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2007). Компонента изменения водных ресурсов может быть получена с помощью спутниковых данных, а уровень воды в озерах и крупных речных системах может быть оценен на основе спутниковой альтиметрии со специально разработанными алгоритмами для наземных вод (Berry *et al.*, 2005; Troitskaya *et al.*, 2012; 2013; Velicogna *et al.*, 2012).

Примеры исследовательских вопросов - гидрологический цикл

Каковы будущие изменения естественного и возмущенного гидрологических циклов в Евразийском регионе (от полуаридных до арктических зон)?

Ускорит ли изменение климата гидрологический цикл в Евразийском регионе и как это повлияет на характер осадков?

Как изменение климата влияет на гидрологию заболоченных местностей?

Как изменяется продуктивность экосистем при изменении гидрологического цикла?

Как изменяются крупные речные системы вследствие временных и пространственных изменений характера осадков?

До какой степени увеличение осадков в зимний период (которые частично выпадают в виде снега) повлияет на поток углерода?

Как таяние многолетней мерзлоты в регионе исследования РЕЕХ повлияет на гидрологический цикл (сток)?

Как изменение площади морского льда Арктики повлияет на гидрологический цикл?

Какова будущая роль арктическо-бореальных озер и крупных речных систем, включая термокарстовые озера и текущие воды всех размеров, в биогеохимических циклах? Как эти изменения повлияют на сообщества (средства к существованию, сельское хозяйство, лесное хозяйство, промышленность и процессы в экосистемах арктического шельфа)?

3.7.2 УГЛЕРОДНЫЙ ЦИКЛ

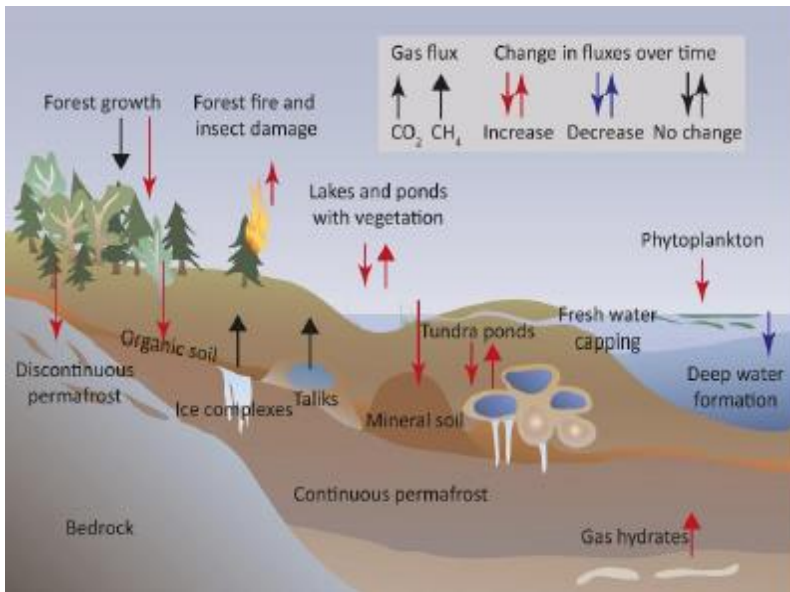


Рисунок 39 Углеродный цикл в Арктике будет меняться по мере потепления климата. Рисунок АСИА, 2004. (Обзорный отчет «Влияние потепления в Арктике: оценка воздействия на климат Арктики (АСИА)»).

СИНОПСИС. Изменение климата может изменить углеродный цикл в Арктике (рис.39). Бореальные леса могут поглощать больше углекислого газа из атмосферы, однако знаний о критическом уровне объема вторичных биогенных веществ недостаточно. Также динамика углерода может изменяться при увеличении числа лесных пожаров и ущерба от насекомых, что приводит к выделению в атмосферу большего количества углерода. Роль бореальных и арктических озер и водосборных бассейнов в хранении углерода неясна.

Земная биосфера является ключевым регулятором химического состава атмосферы и климата посредством способности поглощать углерод (Arneeth et al., 2010b; Heimann and Reichstein, 2008). Евразия содержит большой пул органического углерода в наземной и подземной живой биоте, в почве и в замёрзшем грунте, накопленный в течение голоцена и последнего ледникового периода. В регионе также содержатся огромные запасы ископаемого углерода. Оценки потоков и хранилищ углерода в России, сделанные в рамках полного учета выбросов углекислого газа (Land-Ecosystem Full Carbon Account) (Shvidenko et al., 2010; Schepaschenko et al., 2011; Dolman et al., 2012) показали, что наземные экосистемы России в последнее десятилетие служат чистым стоком углерода в количестве 0.5-0.7 ПгС в год. Леса составляют около 90 % этого стока. Пространственное распределение бюджета углерода имеет значительные отличия; обширные зоны, особенно в районах многолетней мерзлоте и в нарушенных экосистемах леса, являются как стоком, так и источником углерода. Теперь уже четко наблюдаемое «позеленение» Арктики будет иметь большие последствия для стока углерода в ближайшие десятилетия (Myneni et al., 1997; Zhou et al., 2001). Чистая продуктивность биома – это обычно сложный баланс между поглощением углерода, происходящем при росте лесов и гетеротрофном дыхании экосистем, и высвобождением углерода вследствие возмущений, таких как пожары и насекомые, или погодных явлений, таких как крайне теплая осень (Piao et al., 2008; Vesala et al., 2010). Этот баланс весьма хрупкий и, например, в канадских бореальных лесах оцениваемый чистый углеродный баланс близок к углеродно-нейтральному, так как пожары, насекомые и рубка нейтрализуют поглощение углерода, вызванное чистой первичной продуктивностью лесов (Kurz and Apps, 1995; Kurz et al. 2008).

Хотя внутренние воды особенно важны в поперечном переносе углерода, их прямой углеродный обмен с атмосферой, так называемая дегазация, также признана значительным компонентом глобального углеродного бюджета (Bastviken et al., 2011). В бореальных нетронутых лесах водосборные озера могут выбрасывать около 10 % от наземного чистого экосистемного обмена (NEE) и таким образом ослаблять наземное накопление углерода (Huotari et al. 2011). Существует обратная зависимость между размером озера и газонасыщенностью, так малые озера являются относительно крупным источником CO₂ и CH₄ (e.g. Kortelainen et al., 2006; Vesala 2012). Однако на ландшафтном уровне крупные озера могут преобладать в потоках парниковых газов. В донных отложениях малых озер накапливаются относительно большие количества углерода, чем в крупных. Роль озер как долгосрочных стоков углерода и одновременно чистых источников углеродсодержащих газов находится под сильным влиянием физики водной толщи. В случае озер с очень устойчивой водной толщей и отложениями бескислородного гипополимниона хранение углерода является эффективным, но в то же время такой тип озер выделяет CH₄. В общем, замыкание углеродных балансов на ландшафтном уровне практически невозможно без изучения процессов горизонтального переноса углерода и роли озерных экосистем как источников/накопителей парниковых газов. Кроме озер исследоваться должны реки и потоки, которые могут быть более важны, чем озера, как маршруты переноса наземного углерода и как источники парниковых газов. Также должна быть количественно определена роль эмиссий летучих органических соединений как части углеродного бюджета.

Рост растений и распределение углерода в экосистемах бореального леса в большой степени зависит от поступления рециркулирующих биогенных элементов внутри лесной экосистемы. В бедных азотом бореальных и арктических экосистемах запас биологически доступного азота (NH₄ и NO₃) недостаточен, хотя поток поглощенного углерода под землей может активизировать разложение азотсодержащего органического вещества почвы (ОВП) и поглощение азота деревьями (Drake et al. 2011; Phillips et al., 2011). Изменение состояния легко разлагаемого углерода может усилить разложение старого ОВП (Kuzyakov, 2010; Karhu et al., 2014) и, соответственно, ускорить обмен азота в ризосфере с возможным ростом обратных связей с растительностью (Phillips et al., 2011).

Исследовательские вопросы - углеродный цикл

Каковы основные источники и стоки углерода в регионах многолетней мерзлоты и регионах, где она отсутствует?

Как эмиссии летучего органического углерода, количество вторичных органических аэрозолей и структура экосистем изменяются при изменении климатических условий?

Как различные возмущения (пожары, насекомые, рубки леса) различаются по своему воздействию на баланс парниковых газов, ЛОС и загрязняющих веществ в регионе исследования РЕЕХ?

Как повышенные концентрации атмосферного озона воздействуют на растительность и углеродный цикл в бореальных и арктических регионах?

3.7.3 АЗОТНЫЙ ЦИКЛ

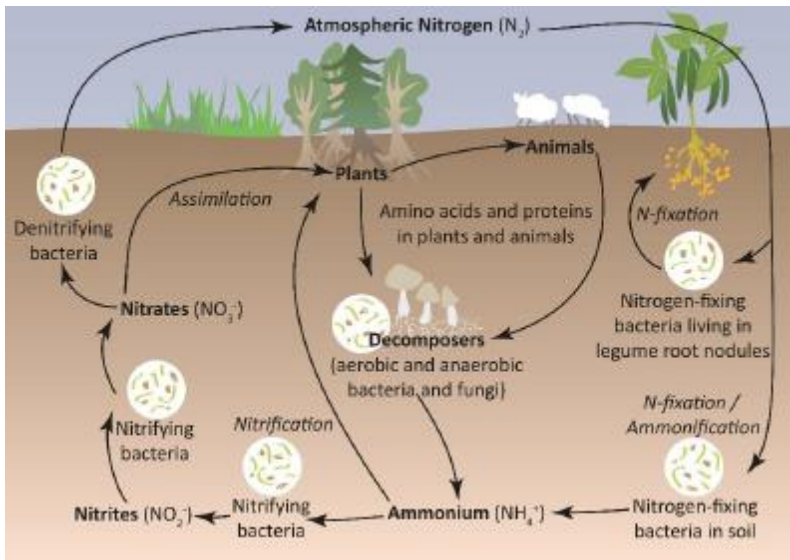


Рисунок 40 Схематическое изображение азотного цикла

СИНОПСИС. Эмиссии химически активного азота (NO , NO_2 , $HONO$, аммиак, амины) из почв, в результате сжигания ископаемого топлива и от других источников связывают цикл азота с атмосферной химией и образованием вторичных аэрозолей в атмосфере. Есть признаки того, что эмиссии N_2O в результате таяния многолетней мерзлоты в Арктике могут существенно повлиять на глобальный бюджет N_2O и способствовать положительному радиационному воздействию парниковых газов.

Азот является наиболее распространенным элементом в атмосфере, однако большая часть атмосферного азота находится в форме инертного N_2 и недоступна для растений и микроорганизмов, азот может усваиваться наземными экосистемами только посредством биологического связывания N_2 (Canfield *et al.*, 2010) (Рис 40). Такой процесс происходит только в некоторых организмах, живущих в симбиозе с растениями, что делает азот главным биогенным элементом, ограничивающим рост наземных экосистем. Однако вмешательство человека в естественный азотный цикл значительно увеличило присутствие азота в окружающей среде. Такое вмешательство, в основном, заключается в использовании удобрений с целью повышения урожайности для удовлетворения нужд растущего населения (European Nitrogen Assessment, 2010), хотя осаждение атмосферного азота может играть значительную роль в некоторых регионах. Увеличение использования азотных удобрений с последующими возмущениями азотного цикла также вызывает серьезные экологические проблемы, такие как эвтрофикация наземных и водных экосистем, загрязнение атмосферы и грунтовых вод (European Nitrogen Assessment, 2010).

В природных наземных экосистемах наличие азота ограничивает продуктивность экосистемы, тесно связывая между собой углеродный и азотный циклы (Gruber and Galloway, 2008). Происходящее изменение климата ведет к повышению температур и, следовательно, ускоряет минерализацию азота в почве, что приводит к повышению его количества и переносу от наземных экосистем к водным, и, возможно, к большому чистому увеличению способности усвоения углерода экосистемами. Большая площадь бореальных и арктических экосистем обуславливает то, что даже небольшие изменения в циркуляции азота и его обратных связях с циркуляцией углерода могут быть значительны в глобальном масштабе (Erisman *et al.*, 2011). Например, повышенное осаждение атмосферного азота привело к большей секвестрации углерода в бореальных лесах

(Magnani et al., 2007), что, однако, может быть компенсировано одновременным повышением эмиссий N_2O почвы (Zaehle et al., 2011). В Арктике есть признаки того, что высокие эмиссии N_2O в результате таяния многолетней мерзлоты (Repo et al., 2009; Elberling et al., 2010) могут существенно повлиять на глобальный бюджет N_2O .

Эмиссии химически активного азота (NO , NO_2 , $HONO$, аммиак, амины) из почв (Su et al., 2011; Korhonen et al., 2013), в результате сжигания ископаемого топлива и от других источников связывают цикл азота с атмосферной химией и образованием вторичных аэрозолей в атмосфере. Понимание процессов внутри азотного цикла, взаимодействий химически активного азота с циклами углерода и фосфора, атмосферной химией и аэрозолями, а также механизмов взаимосвязей и обратных связей является важным для полного понимания того, как биосфера воздействует на атмосферу и глобальный климат (Kulmala and Petäjä, 2011).

Исследовательские вопросы - азотный цикл:

Насколько бореальные и арктические экосистемы чувствительны к ускоренной минерализации азота?

Как изменения климата повлияют на циркуляцию азота и эмиссии химически активного азота в атмосферу?

Как эмиссии N_2O из Арктики будут реагировать на изменение климата?

3.7.4 ФОСФОРНЫЙ ЦИКЛ

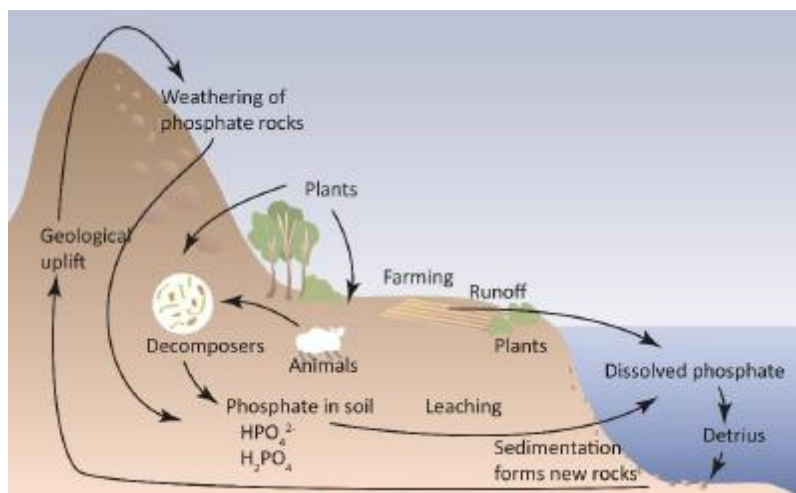


Рисунок 41 Схематическое изображение фосфорного цикла.

СИНОПСИС. В последнее время сообщалось, что почвы юго-запада Сибири содержат высокие концентрации доступного для растений фосфора (P) (Achant et al., 2013), что может усилить секвестрацию углерода в экосистемах при условии, что они не очень ограничены в азоте. В экосистемах с пресной и солоноватой водой избыток фосфора приводит к эвтрофикации, что имеет такие экологические последствия, как, например, снижение биоразнообразия (Conley et al., 2009). Вследствие недостатка исследований циркуляции фосфора в экосистемах воздействие изменения

климата на физико-химические свойства почв и доступность фосфора, а также взаимодействия цикла фосфора с циклами углерода и азота в основном неизвестно.

Фосфор (P) и азот (N) – одни из биогенных элементов, ограничивающих продуктивность и рост наземных экосистем, а в морских экосистемах фосфор является основным биогенным элементом, ограничивающим продуктивность (Whitehead and Crossmann, 2012). Роль фосфора в лимитировании естественных наземных экосистем питательными веществами не так широко признана, как в случае N (Vitousek et al., 2010).

В глобальном биогеохимическом цикле фосфора (рис. 41) основные резервуары находятся в континентальных почвах, где фосфор в минеральной форме связан с коренной породой почвы, и в океанических отложениях. Источником осадочного фосфора является переносимый реками материал, который был вымыт из континентальных почв. Атмосфера играет незначительную роль в цикле фосфора, и он не имеет значительного атмосферного резервуара. Атмосферный фосфор в основном происходит из эоловой пыли, брызг морской воды и горения (Wang *et al.*, 2015). Газообразные формы фосфора редки, их роль в атмосферных процессах слабо изучена (Glindemann et al., 2005).

В почвах минеральная форма фосфора связана с коренной породой грунтов, таких как апатит. Количество фосфора в коренной породе является определяющим фактором ограничения фосфора, а скорость выветривания обуславливает количество фосфора, имеющегося в экосистемах, где он находится, в основном, в органической форме (Achat et al., 2013; Vitousek et al., 2010). В экосистемах, произрастающих на почвах, бедных фосфором, продуктивность, вероятнее всего, будет ограничена по азоту на ранних стадиях сукцессии, и с течением времени она будет постепенно сдвигаться в сторону ограничения фосфора (Vitousek et al., 2010). В последнее время сообщалось, что почвы юго-запада Сибири содержат высокие концентрации доступного для растений фосфора (Achat et al., 2013), что может усилить секвестрацию углерода в экосистемах при условии, что они не очень ограничены в азоте. В экосистемах с пресной водой избыток фосфора приводит к эвтрофикации, что имеет такие экологические последствия, как снижение биоразнообразия вследствие изменений физико-химических свойств и состава видов (Conley et al., 2009). Вследствие недостатка исследований циркуляции фосфора в экосистемах воздействие изменения климата на физико-химические свойства почв и доступность фосфора, а также взаимодействия цикла фосфора с циклами углерода и азота в основном неизвестно.

Примеры исследовательских вопросов - фосфорный цикл

Каковы связи между фосфором в атмосфере, биосфере и гидросфере?

Как меняются потоки фосфора по мере изменения климата?

3.7.5 ЦИКЛ СЕРЫ

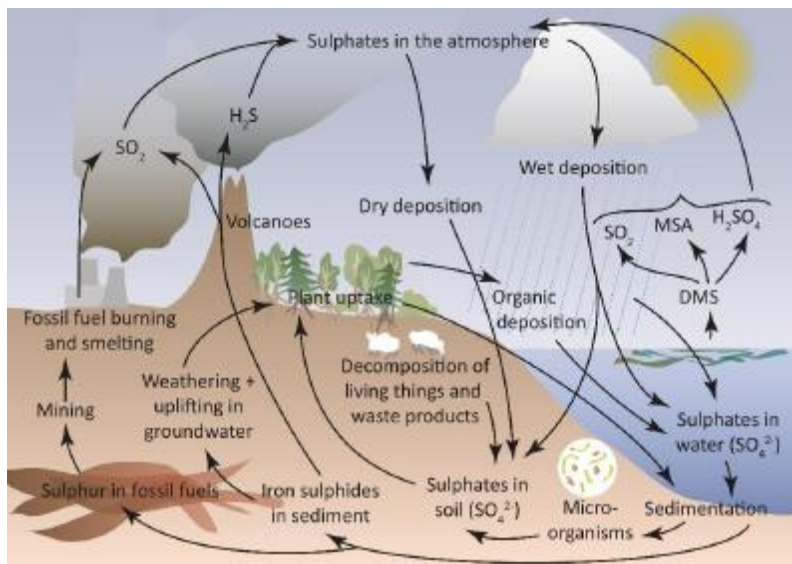


Рисунок 42 Схематическое изображение цикла серы.

СИНОПСИС. Сера высвобождается естественным путем в результате вулканической активности, а также в результате выветривания земной коры (рис.42). Крупнейшим природным источником атмосферной серы является океанический фитопланктон, эмитирующий диметилсульфид (DMS), который преобразуется в диоксид серы (SO₂), серную кислоту (H₂SO₄) и метилсульфо кислоту (MSA) в ходе газофазного окисления. Однако и деятельность человека оказывает существенное влияние на глобальный цикл серы посредством обширных выбросов SO₂ в результате сжигания ископаемых видов топлива и плавки металлов. Главным стоком SO₂ является окисление в серную кислоту в газообразной и жидкой фазах и последующее удаление из атмосферы вместе с осадками или посредством сухого осаждения. SO₂ преобразуется в H₂SO₄ также в результате процессов газофазного окисления. Газовая фаза H₂SO₄ запускает процесс образования новых аэрозольных частиц в атмосфере, что в свою очередь влияет на облачный покров и региональный и глобальный климат.

Прогнозируется, что глобальные антропогенные эмиссии SO₂ значительно снизятся к 2100 году (IPCC, Специальный доклад о сценариях эмиссий, SRES, 2000). Эмиссии в Европе и Северной Америке начали снижаться еще в 1970-х годах, но это снижение в глобальном масштабе перекрывается увеличением выбросов в Восточной Азии и других быстро развивающихся регионах мира (Smith et al., 2011). На сегодняшний день глобальные антропогенные эмиссии SO₂ - это около 120 Tg/yr, при этом эмиссии стран Европы, бывшего Советского Союза и Китая составляют примерно 50% мирового объема (Smith et al., 2011). Глобальные природные эмиссии серы, включая диметилсульфид, значительно меньше, они составляют несколько десятков Tg в год (Smith et al., 2001), в мировом масштабе доминируют антропогенные выбросы. Основным источником SO₂ является сжигание угля и нефти, выплавка металла и судоходство, небольшую долю составляют горение биомассы и другие события.

Эмиссии SO₂ в Евразии характеризуются большой пространственной изменчивостью. Metallургические предприятия в арктических районах России выбрасывают огромное количество SO₂, что в значительной степени влияет на окружающую среду региона. Одни только metallургические комплексы в Норильске, с годовым объемом эмиссий в 2 Tg (Blacksmith Institute, 2007), выбрасывают более 1,5% мирового SO₂. С другой стороны, эмиссии metallургических предприятий Кольского полуострова, все еще оставаясь очень высокими, значительно снизились за

последние десятилетия (Paatero et al., 2008), таким образом, изменяя воздействие деятельности человека на региональный климат и окружающую среду. В общем, существующая антропогенная деятельность постепенно становится более экологически эффективной с точки зрения выбросов серы и меньше загрязняет окружающую среду. Однако появление новых видов деятельности и инфраструктур, выбрасывающих серу, противодействуют этому развитию.

Будущие изменения эмиссий SO_2 в регионе исследования РЕЕХ остаются неопределенными. В северной части Евразии природные ресурсы (ископаемое топливо, металлы, минералы и древесина) обширны и их разработки становятся все более и более привлекательными, что связано с ростом спроса. Это, скорее всего, приведет к увеличению добычи полезных ископаемых, бурения нефтяных скважин, судоходства (e.g. Smith, 2010). Выбросы в Китае постоянно растут, в то время как объем выбросов в Европе значительно снизился за последние десятилетия.

Большинство природного и антропогенного SO_2 удаляется из атмосферы путем жидкофазного окисления в H_2SO_4 вместе с осадками. В районах с высокой нагрузкой серы, кислотные дожди приводит к закислению почв и вод. Главным накопителем серы являются океаны. Некоторое количество SO_2 окисляется до H_2SO_4 в газовой фазе в результате цепочки реакций, инициированной реакцией SO_2 с гидроксильным радикалом OH . Особенно в лесных районах Евразии реакции SO_2 со вторым важным окислителем, стабилизированной интермедиатой Криге, которая происходит от эмиссий биогенных летучих органических соединений, производят значительные объемы H_2SO_4 (Mauldin et al., 2012). Серная кислота в газовой фазе играет ключевую роль в земной атмосфере, запуская образование вторичного аэрозоля и таким образом связывая антропогенные выбросы SO_2 с глобальным климатом через взаимодействия аэрозолей и облаков. Частицы, содержащие серную кислоту или сульфаты, также связаны с проблемами качества воздуха и ухудшения здоровья человека. Понимание пространственной и временной эволюции эмиссий SO_2 в Северной Евразии, а также атмосферной химии серы, имеет решающее значение для понимания и количественной оценки воздействия антропогенной деятельности и эмиссий SO_2 на качество воздуха, закисление, а также на региональный и глобальный климат.

Примеры исследовательских вопросов - цикл серы

Какое воздействие осаждение серы оказывает на устойчивость экосистем в бореальных и арктических условиях?

Как атмосферное осаждение азота и серы воздействует на жизнеспособность и продуктивность экосистем, и каковы их связи с гидрологическими условиями?

Количественная оценка важнейших процессов цикла серы в условиях образования новой частицы (NPF).

4. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РЕЕХ (F2)

4.1 ПРОЕКТНАЯ КОНЦЕПЦИЯ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

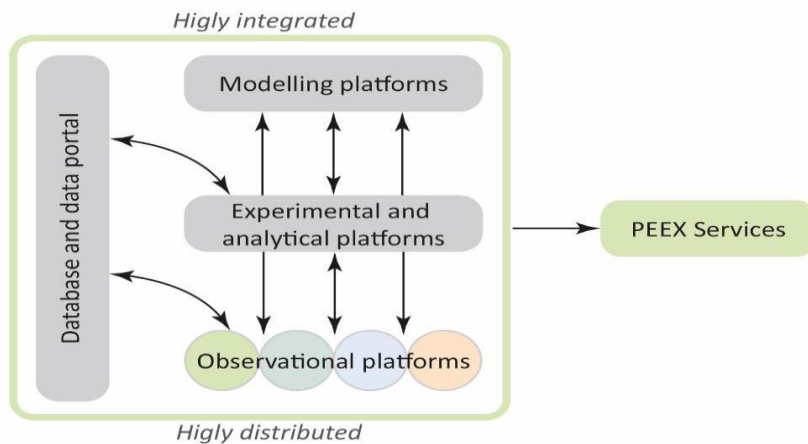


Рисунок 43 Проектная концепция инфраструктуры РЕЕХ основана на сервисно-ориентированном подходе (Lappalainen et al., 2014a,b), связывающим и интегрирующим данные из сильно распределенных сетей наблюдения и моделирования, а также от различных экспериментальных платформ. См. также раздел 5.3.

Решение взаимосвязанных глобальных экологических проблем может быть найдено только путем гармонизированного и целостного подхода к наблюдениям с использованием всех имеющихся средств моделирования, представляющих различные пространственные и временные масштабы. Подход РЕЕХ использует методы исследования, которые включают и эксперименты, и инструменты моделирования и варьируются от наблюдений и изучения процессов в масштабе от нанометров и суб-миллисекунд до масштабов глобальных и десятилетних измерений, наборов данных и модельных экспериментов. Видение инфраструктуры РЕЕХ заключается в предоставлении комплексных, непрерывных и надежных гармонизированных данных для служб прогнозирования, а также для научного сообщества (рис.43).

Фокус-2 РЕЕХ подразумевает создание устойчивой, долгосрочной Пан-Евразийской исследовательской инфраструктуры (RI), которая включала бы аппаратные средства и программное обеспечение для измерений, а также валидированные и гармонизированные продукты данных для реализации в моделях соответствующей пространственной, временной и тематической направленности (Kulmala et al., 2011b). Научно-исследовательские инфраструктуры РЕЕХ включают комплексные полевые наблюдения атмосферы, биосферы, гидрологии, криосферы и океанов, а также целевые лабораторные эксперименты. Подход включает в себя иерархическую сеть станций, а также набор инструментов моделирования (Hari et al., 2016; Lappalainen et al., 2014a,b). На предварительном этапе сеть РЕЕХ будет базироваться на существующей инфраструктуре, которая будет обновляться и гармонизироваться по мере возможности и необходимости. Наиболее продвинутые станции, называемые флагманскими, действуют как тестовые площадки и функционируют в качестве интегрированных исследовательских платформ. Исследовательская инфраструктура РЕЕХ (RI) будет состоять из сети полевых станций на территории, включающей Скандинавию, Финляндию, страны Балтии, Сибирь и Китай, она будет дополнена спутниковыми наблюдениями и соответствующими интегрированными инструментами моделирования. Развитие инфраструктуры наземных компонент выполняется во взаимодействии с действующими в настоящее время европейскими инфраструктурными проектами. Результаты системы мониторинга РЕЕХ будут использоваться для соответствующего моделирования в рамках РЕЕХ, а также распространяться среди заинтересованных сторон и общественности.

Методы РЕЕХ включают в себя иерархическую сеть станций, состоящую из флагманских станций для целостного понимания континуума атмосфера-биосфера-криосфера-антропосфера на уровне процессов, и потоковых станций для целевых региональных наблюдений. Стандартные станции будут давать информацию о пространственной изменчивости выбранных параметров на уровне поверхности земли. Спутники позволят расширить наблюдения до глобального масштаба, а также дадут информацию по вертикальной структуре атмосферы и распределении измеряемых атмосферных параметров, данные о биосфере, землепользовании и гидрологическом цикле.

Методы решения крупномасштабных научных вопросов и исследования сложных обратных связей были приняты в научно-исследовательскую повестку РЕЕХ из «Комплексного проекта по взаимодействиям аэрозолей, облаков, климата и качества воздуха» ЕС-FP6 (EUCAARI), (Kulmala et al., 2009; Kulmala et al., 2011b). Идея мультимасштабного подхода к моделированию основывается на интеграции научного знания от нано- до глобальных масштабов и мультидисциплинарного научного подхода (см. рис.65). Набор моделей охватывает процессы, приводящие, например, к изменениям состава атмосферы, функций биосферы и образования облаков. Моделирование пограничного слоя используется в анализе вертикальных структур и устойчивости атмосферы, в то время как региональные модели переноса химических веществ интегрируют физику и химию атмосферы для решения конкретных задач, таких как трансграничный перенос загрязнений. Результаты моделирования в меньшем масштабе совместно с данными наблюдений полностью используются в глобальных моделях системы Земли, которые позволяют оценить общие воздействия механизмов обратной связи и антропогенное влияние на изменение окружающей среды.

Программа предварительного этапа для сети наблюдений РЕЕХ рассчитана на 2015-2020 годы, она будет включать в себя следующие действия и задачи:

- Идентификация существующих методик измерения наземных станций в рамках предварительного этапа РЕЕХ
- Анализ требований конечных пользователей из сообществ, занимающихся моделированием климата и качества воздуха в глобальном и региональном масштабах в регионе исследования РЕЕХ
- Общее описание стандартов сети РЕЕХ, в том числе измерений, архивирования продукта данных и требований для каждой категории станций
- Выявление основных пробелов наблюдательной сети начального этапа, в том числе долгосрочной наблюдательной деятельности в рамках РЕЕХ, в Европе, Китае и по всему миру
- Начало гармонизации наблюдений в сети РЕЕХ согласно, например, принятым практикам GAW или европейских сетей наблюдений
- Выполнение межплатформенных сравнений между наземными и спутниковыми наблюдениями.
- Создание образовательной программы РЕЕХ по методикам выполнения измерений и анализу данных для молодых ученых и технических специалистов.

4.2 ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ РЕЕХ

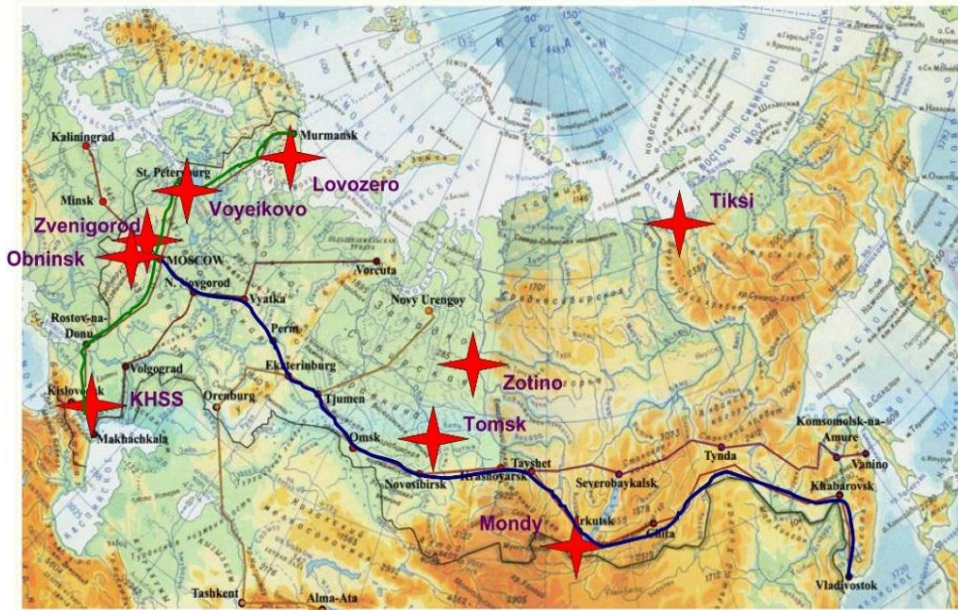


Рисунок 44 Пример существующих исследовательских инфраструктур и деятельности: Институт физики атмосферы им.Обухова (Elansky, 2012).

Предполагаемая иерархическая сеть наблюдений основана на идеях и концепциях, предложенных, разработанных и усовершенствованных в Hari et al., 2009 и Hari et al., 2016.

В арктическо-бореальных регионах в настоящее время не хватает скоординированных и последовательных наблюдений in-situ несмотря на их важнейшую роль в климатической системе. Первым шагом к последовательным измерениям атмосфера-экосистема является создание наблюдательной сети предварительного этапа в рамках уже существующей деятельности. Уже есть несколько передовых полевых станций, осуществляющих пробный подход (рис.44). В финальной версии сети РЕЕХ на каждые 2000-3000 км Сибирского региона будет приходиться одна станция, чтобы представить все основные экосистемы.

Сеть полевых станций РЕЕХ образует иерархическую сеть станций от Скандинавии до Китая, она имеет непрерывную комплексную научную программу (Hari et al., 2009; Lappalainen et al., 2014a,b; Hari et al., 2016). Концепция иерархической сети станций базируется на необходимости комплексных измерений потоков, накоплений и процессов для обеспечения количественного понимания процессов системы Земли (Hari and Kulmala, 2005). Антропогенные эмиссии изменили химический состав атмосферы, а также её структуру, в свою очередь леса, торфяники, тундра и водные системы реагируют на это. Это глобальное изменение недостаточно понято, и будущее развитие климата, биосферы и океанов в настоящее остается довольно неопределенным. Для того, чтобы принимать правильные решения, нам необходимо более глубокое понимание будущего климата и реакции живых компонентов системы Земли.

РЕЕХ охватывает огромные площади: он простирается на тысячи километров с запада на восток и чуть меньше с севера на юг. Соответствующий временной интервал также велик - около 100 лет. С одной стороны, фундаментальные метаболические и физические явления происходят на атомном, молекулярном или клеточном уровнях, и их временные интервалы составляют от пикосекунд до нескольких секунд. С другой стороны, реакция биосферы на измененное антропогенное

воздействие может занять десятилетия и больше. Исследование РЕЕХ фокусируется на обеспечении эффективного потока знаний от микроскопических масштабов времени и пространства до обширных областей и длительных периодов.

Изменение климата и его воздействие на биологические системы предполагает несколько очень разных явлений, таких как перенос излучения в атмосфере, рост лесов, потоки CO_2 между атмосферой и океанами, а также эмиссии химически активных малых газовых компонент из биосферы в атмосферу. Исследовательская система, которая объединила бы информацию, связанную с различными явлениями и полученную в различных пространственных и временных масштабах, необходима, чтобы найти решения глобальных проблем и обеспечить надежные системы раннего предупреждения. Правильное сочетание знаний об изменчивых явлениях в различных масштабах требует согласованных общих концепций и идей, способствуя потоку знаний между различными дисциплинами.

Фундаментальные явления в регионе исследования РЕЕХ происходят на элементарном уровне в пространстве и времени. Метаболические, физические и химические процессы преобразуют вещество и энергию в другие формы. Эти процессы создают разницу концентраций, температур и давления, что, в свою очередь, создает потоки вещества и энергии. При объединении этих потоков происходят метаболические, физические и химические явления, охватывающие большие временные и пространственные масштабы. Общие черты этих биологических, физических и химических явлений позволяют строить последовательные теории для описания вещества и энергии в обширном регионе РЕЕХ и обеспечить теоретическую основу для построения сети измерительных станций.

Исследуемые северные регионы характеризуется комбинацией лесов, торфяников, тундры, пресных вод, океанов и городских районов. Эти типы растительного покрова имеют четкие отличительные черты, действуя в качестве независимых функциональных единиц. Эти функциональные единицы обмениваются веществом и энергией, особенно с атмосферой, а также друг с другом. Эти потоки вещества и энергии выражают взаимодействия в регионе исследования РЕЕХ. Водный обмен между растительностью и атмосферой является крупнейшим потоком. Потоки углерода, азота и некоторых малых газовых компонент достаточно малы по массе, но имеют важное отношение к глобальному изменению.

Инструменты РЕЕХ включают в себя иерархическую сеть станций, состоящую из флагманских станций для целостного понимания континуума атмосфера-биосфера-антропосфера на уровне процессов и потоковых станций для изучения и наблюдения региональных особенностей. Стандартные станции, в свою очередь, дают информацию о пространственной изменчивости выбранных параметров на уровне поверхности земли. Спутники позволяют расширить наблюдения до глобального масштаба, а также дают информацию по вертикальной структуре атмосферы, данные о биосфере, землепользовании и гидрологическом цикле. Сеть включает в себя компоненты, охватывающие как функции атмосферы, так и экосистемы.

4.2.1 АТМОСФЕРНАЯ КОМПОНЕНТА

Общее описание иерархической сети станций для изучения атмосферы представлено в Hari *et al.* (2009) и Hari *et al.* (2016). Система состоит из следующих блоков:

Стандартная станция

Стандартные станции обеспечивают измерения свойств, действующих в качестве ключевых драйверов для самых важных процессов взаимодействия атмосферы и суши. Наблюдения выполняются на уровне земли с плотной географической сеткой для обеспечения хорошего пространственного покрытия. Измерения включают:

- (i) Стандартные метеорологические величины для атмосферы (температура, относительная влажность, направление ветра, скорость ветра, осадки, солнечная радиация)
- (ii) Одно дополнительное измерение по выбору пользователя, как, например:
 - a. Солнечная радиация (глобальная, чистая) в различных режимах длин волн (PAR)
 - b. Измерения свойств почвы и земли: профили температуры, содержание влаги в почве, натяжённость почвенной влаги, глубина снежного покрова и содержание воды
 - c. Концентрации некоторых малых газовых компонент (например, SO₂, O₃, NO_x, CO)
 - d. Численная концентрация аэрозольных частиц

Потоковая станция

Потоковые станции в атмосферной компоненте являются усовершенствованными версиями стандартных станций со следующими возможностями:

- (i) Все измерения, проводимые на стандартных станциях, включая компоненты по выбору пользователя
- (ii) Численные концентрации и распределение по размерам аэрозольных частиц
- (iii) Восходящее и падающее длинноволновое излучение, контактное тепло, потоки скрытого тепла/водного пара
- (iv) Потоковые измерения набора малых газовых компонент по выбору пользователя, таких как CO₂, O₃, SO₂, NO, NO₂, N₂O, CH₄, CO и летучих органических соединений (VOC)

На потоковых станциях проводятся узконаправленные кампании, цель которых заключается в определении связи между потоками и факторами окружающей среды и экосистем.

Флагманская станция

Флагманские станции в атмосферной компоненте РЕЕХ обеспечивают передовые наблюдения атмосферных концентраций, а также потоков вещества и энергии в континууме атмосфера-биосфера.

Общие принципы флагманских станций:

- (i) Основой является наблюдение потоков вещества и энергии.
- (ii) Наблюдения должны выполняться непрерывно днем и ночью, зимой и летом.

- (iii) Временное разрешение зависит от изучаемых процессов и варьируется от 100 Гц до лет/десятилетий.
- (iv) Пределы чувствительности инструментов на всех площадках должны быть достаточно низкими, чтобы захватить изменение во времени измеряемых концентраций газов и аэрозолей.
- (v) Процедуры по качеству данных, передача и формат хранения данных должны быть гармонизированы в рамках сети.

Атмосферные флагманские станции обеспечивают комплексный мониторинг процессов и факторов в высоком пространственном и временном разрешении, таких как:

- (i) Все наблюдения, проводимые на стандартных и потоковых станциях
- (ii) Химический состав аэрозолей
- (iii) Характеризация вертикальных профилей аэрозолей и структура пограничного слоя (лидар)
- (iv) Распределение по размерам атмосферных ионов и кластеров
- (v) Комплексная характеристика химически активных малых газовых компонент (таких как, летучие органические соединения (VOC), крайне низколетучие органические соединения (ELVOC), серная кислота, аммиак, метан) и концентраций атмосферных окислителей

Кроме того, флагманские станции могут предоставить дополнительные данные, такие как:

- (vi) Расширенная характеристика атмосферной турбулентности, а также потоков малых газовых компонент и аэрозолей на разных высотах, в том числе, под пологом леса
- (vii) Характеризация облаков (облачный радиолокатор)
- (viii) Расширенная характеристика солнечной радиации (спектральная зависимость)
- (ix) Отраженное и поглощенное излучение (PRI, флуоресценция хлорофилла)

Флагманские станции участвуют в разработке нового инструментария и обеспечивают анализ на основе эталонных показателей и детальное сравнение новых инструментов с имеющимися данными. На флагманских станциях регулярно проводятся трудоемкие и комплексные полевые исследования и выполняются межплатформенные калибровки и верификации (in-situ, спутниковые, воздушные). Флагманская станция состоит из высокой мачты (> 100 м в высоту) и аппаратуры, которая измеряет профили температуры, трехмерные скорости ветра, распределение аэрозолей по размерам, концентрации и потоки малых газовых компонент, восходящее и падающее спектральное излучение, потоки энергии.

Флагманские станции одновременно измеряют метеорологические факторы и состав атмосферы (в том числе парниковые газы и короткоживущие климатические факторы; газы и аэрозоли), а также некоторые процессы и явления в экосистемах, где они расположены. Это обеспечивает всестороннее понимание обратных связей и взаимосвязей, так как взаимодействие экосистем с окружающей атмосферой, литосферой, гидросферой и криосферой представлено в динамике. Тип флагманских станций SMEAR (станции для измерения взаимодействий экосистема-атмосфера, Hari and Kulmala, 2005) включает (i) потоки углерода и азота (фотосинтез, дыхание, рост), (ii) обмен малых газовых компонент (химически активные соединения углерода, соединения азота, озон) и (iii) гидрологические потоки. Поддерживающие измерительные точки могут быть установлены вокруг главных станций с целью наблюдения, например, характеристик растительности и микробных процессов почвы, или взаимодействий почва-атмосфера (таких как, потоки CO₂ и

других парниковых газов,). Крайне важно иметь передовую станцию во всех основных экосистемных областях (рис.44), на практике это будет означать по одной станции на каждые 2000-3000 км в регионе исследования РЕЕХ.

Во время предварительного этапа РЕЕХ будут проведены несколько полевых экспериментов, направленных на более детальное исследование ключевых процессов и механизмов обратной связи. Полевые эксперименты in-situ будут выполняться на существующих наземных станциях параллельно с наблюдениями с воздушных и морских судов при использовании существующих наборов данных и архивов. На втором этапе реализации РЕЕХ планируется построить несколько новых Пан-Евразийских полевых станций для того, чтобы обеспечить улучшенный пространственный охват. На практике для каждого репрезентативного биома необходима по крайней мере одна передовая станция для проведения комплексных измерений вода-почва-атмосфера-криосфера.

4.2.2 ЭКОСИСТЕМНАЯ КОМПОНЕНТА

Различные типы экосистем должны быть охарактеризованы в рамках сети станции РЕЕХ; мы приводим пример иерархической сети станций для лесной среды.

Стандартная станция для исследования лесных экосистем

Стандартная станция для исследования лесных экосистем измеряет основные характеристики и явления в лесах. Они включают следующие измерения:

- (i) Стандартные измерения лесонасаждений на участках леса (виды деревьев, диаметр, высота и объем)
- (ii) Стандартные измерения почвы (количество органического вещества почвы, распределение минеральных частиц почв по размерам и концентрация основных питательных веществ)

Усовершенствованная станция для исследования лесных экосистем

При расширении измерений стандартных станции до развития и потоков лесонасаждений мы получаем усовершенствованные станции. Они осуществляют следующие измерения:

- (i) Измерения, проводимые на стандартных станциях для исследования леса
- (ii) Измерения потоков CO₂, воды и тепла между экосистемами и атмосферой
- (iii) Ретроспективные измерения развития лесонасаждений

Флагманская станция для исследования лесных экосистем

Когда мы расширяем измерения усовершенствованных станций, чтобы охватить детальную структуру и процессы, происходящие в лесонасаждениях, мы получаем флагманские станции, их измерения включают:

- (i) Измерения, проводимые на усовершенствованных станциях
- (ii) Массы, а также концентрации белка, целлюлозы, лигнина, крахмала и липидов компонентов деревьев и наземной растительности
- (iii) Концентрации белка, целлюлозы, лигнина, крахмала и липидов в слоях почвы
- (iv) Изотопный состав растительности и слоев почвы
- (v) Измерения обмена CO_2 , дыхания и эмиссий летучих органических соединений
- (vi) Объем воды в почве, количество дождевых осадков над и под древесным пологом, водоток и сток растворенного неорганического углерода (DIC) и растворенного органического углерода (DOC)
- (vii) Реестр животных, обитающих в окрестностях (млекопитающие, птицы и насекомые)

4.2.3 КРИОСФЕРНАЯ КОМПОНЕНТА



Рисунок 45 Криосферные наблюдения в рамках сети Скандинавского центра DEFROST (Воздействие меняющейся криосферы – Отображение обратной связи экосистема-климат от вечной мерзлоты, снега и льда).

Криосфера в Арктике стремительно меняется. Измерения текущих и прошлых состояний криосферы осуществляются с помощью глубоких скважин, исследовательских площадок в зонах вечной мерзлоты, буев/дрейфующих станций в Северном Ледовитом океане, исследовательских кораблей, а также с помощью геофизических наблюдений с самолетов. Эта деятельность уже проводится. Хорошим примером является Скандинавский научно-исследовательский центр “DEFROST”, который производит работы на исследовательских площадках в России, Финляндии, Швеции, Исландии и Норвегии (рис.45).

Важнейшими задачами для наземной сети являются разработка инструментария и инфраструктуры для наблюдения основных процессов криосферы, совершенствование методов геокриологического и геоэкологического мониторинга природных и антропогенных сред, а также подготовка специалистов для получения объективной информации о текущем состоянии арктических процессов. Эти задачи представляют собой необходимые предпосылки для разработки методов и инструментов для поддержания стабильного функционирования северной инфраструктуры, что в свою очередь поддерживает уровень жизни местного населения.

Улучшение геокриологического прогнозирования важно, так как имеет далеко идущие последствия как для геополитики, так и для экологической безопасности. Ввиду уязвимости арктических и субарктических регионов к природным и антропогенным воздействиям особенно важно прогнозировать разрушительные и потенциально катастрофические процессы в этих природных системах. Взаимодействия между криосферой и другими геосферами, испытывающими влияние динамики, а также тепловых и геологических процессов, являются наиболее существенными в Арктическом регионе.

Изменения вечной мерзлоты будут контролироваться с использованием существующих в Евразии станций измерения подповерхностной температуры. Помимо поверхностных и метеорологических данных, по предыдущим историческим данным и новым наблюдениям будут скомпилированы данные о температуре в стволах скважин, которые могут быть использованы для прямого и обратного моделирования изменения температуры поверхности суши и подповерхностной температуры. Отобранные мелкие (<100 м) и глубокие (> 1 км) скважины будут оборудованы приборами для долгосрочного наблюдения температур. Будет создана серия “станций-скважин” от Европы до Сибири и Китая. Это потребует организованного международного сотрудничества для эффективного запуска и ведения программы подповерхностного мониторинга как части инфраструктуры РЕЕХ.

С точки зрения ресурсов, относительно низкий геотермальный градиент может позволить характеристикам температура-глубина находиться в пределах поля устойчивости гидратов метана. Одной из основных задач программы РЕЕХ является улучшение понимания потенциальных выбросов метана (и других парниковых газов) из тающей вечной мерзлоты. Прогнозирование и моделирование выбросов метана требует хорошо скоординированных систем наблюдений, в том числе серии мелких и глубоких скважин с температурными приборами, оценки количества газовых гидратов *in-situ* и применения косвенных геофизических прокси для мониторинга время-зависимых изменений в слоях вечной мерзлоты. Одним из самых интересных методов будет использование наземных и воздушных геофизических измерений с применением контраста электропроводности между мерзлой и талой почвой. Объединение результатов таких исследований, проводимых с регулярными интервалами (например, 1-5 лет), с долгосрочными данными скважин и лабораторий позволит охватить большие области, прилегающие к станциям РЕЕХ.

4.2.4 КОМПОНЕНТА ВНУТРЕННИХ ВОД

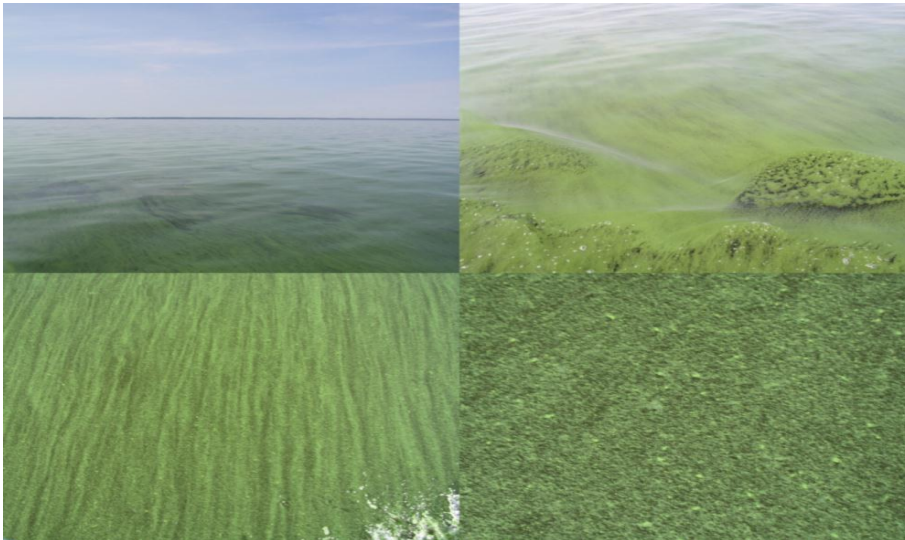


Рисунок 46 Цветение воды в северной части Горьковского водохранилища на Волге 29.07.2009. Фотографии предоставлены Yulia Troitskaya.

Комплексное исследование гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров внутренних вод необходимо для понимания водного цикла в меняющемся регионе РЕЕХ. Крупные речные системы, впадающие в Северный Ледовитый океан, имеют особое значение. Мероприятия включают разработку системы измерения для серии характерных водных объектов, находящихся в различных географических условиях и под влиянием климатических изменений различной интенсивности.

Требуется комплексная система мониторинга физического, химического и биологического состояния внутренних водоемов, основанная на методах дистанционного зондирования и методах in-situ. Необходимыми являются наблюдения параметров, описывающих атмосферу (температура, давление, влажность, ветер) и водоемы (температура, скорость, мутность, химический состав, концентрации ПАВ, 3-мерные спектры поверхностных волн, биомасса), а также соответствующие обменные процессы (суммарное испарение, испарение) и географически представительные параметры (площадь и глубина водных объектов, сток и почвенная влажность). Наблюдения in-situ должны быть дополнены спутниковым дистанционным зондированием.

Инструменты и методы мониторинга токсичного цветения воды в режиме реального времени должны быть разработаны для того, чтобы эффективно предотвращать негативные последствия этого явления. Это поможет улучшить качество воды и нормализовать процессы регуляции природных биологических сообществ цветущих водоемов (рис. 46).

Цели, связанные с мониторингом внутренних водоемов:

- Выбор серии характерных водных объектов в различных географических условиях и под влиянием климатических изменений различной интенсивности;
- Одновременные наземные измерения атмосферных, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров среды для калибровки аэрокосмических методов;
- Оценка влияния изменения климата на масштабы токсичного цветения воды.

4.2.5 МОРСКАЯ КОМПОНЕНТА

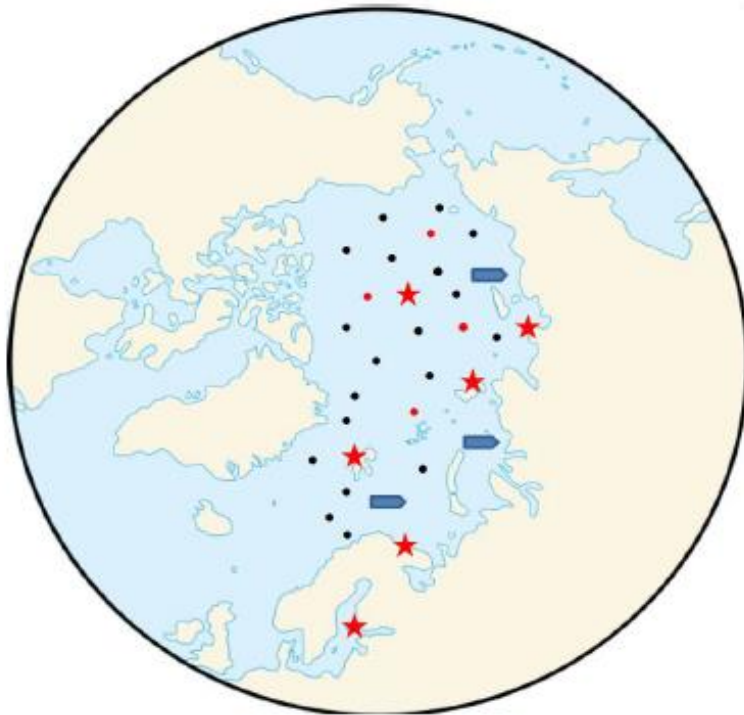


Рисунок 47 Схематическая иллюстрация потенциальной сети станций в Северном Ледовитом океане. В настоящее время присутствует несколько простых (черные точки) и сложных (красные точки) буев, а также (в основном летом) научно-исследовательские суда (синие прямоугольники), но их местоположение постоянно меняется. Каждая станция имеет ограниченное время работы. По флагманским станциям (красные звезды) рисунок дает лишь предположительное их количество и расположение, действующей является только станция в Балтийском море. Изображение из Lappalainen et al., 2014a,b.

Роль океанов в системе климата связана, среди прочего, с (i) переносом тепла от низких широт к полюсам, (ii) обеспечением водой на процессы испарения и выпадения осадков, (iii) гашением суточных, сезонных и межгодовых колебаний температуры воздуха посредством большой теплоемкости. По сравнению с континентальными регионами, об океанах, морском льде и атмосфере над ними имеется гораздо меньше климатологических данных. На рисунке 49 представлен концептуальный план измерительных станций в высоких широтах океана, где, по крайней мере, часть года присутствует морской лед. Стандартные и потоковые станции будут давать необходимую информацию о состоянии и изменении морской климатической системы, а флагманские станции необходимы для лучшего понимания и параметризации мелкомасштабных физических процессов в системе (Vihma et al., 2014).

Стандартные станции

Стандартные станции обеспечивают измерения свойств существенных для взаимодействия океана, морского льда и атмосферы. Под станциями понимаются буи, размещенные на льдинах или в открытом океане. В зависимости от местонахождения и состояния льда, буи могут быть либо дрейфующими, либо заякоренными. Из-за того, что буи дрейфуют, географическая сетка не является постоянной. Средний срок службы дрейфующей станции составляет порядка одного года. Однако, в прибрежных районах заякоренные станции служат гораздо больше. Измерения включают профили атмосферного давления и температуры, начиная от морской воды через лед и снег и до

воздуха, с вертикальным разрешением в 2 см. Измерения профилей также дают информацию о временной эволюции толщины льда и снега. В случае дрейфующих буев, GPS данные о местоположении дают вектор дрейфа льда или океанского течения (для буев в открытом океане необходим плавучий якорь). Данные передаются с помощью спутниковой связи.

Потоковые станции

Потоковая станция, заякоренная или дрейфующая, - это усовершенствованная версия стандартной станции, её возможности включают:

- (i) Измерения, проводимые на стандартных станциях;
- (ii) Профили температуры и ветра в самом нижнем слое атмосферы (ближайшие к земле метры);
- (iii) Профили температуры, солёности и течений в верхних десятках-сотнях метров морской воды;
- (iv) Поверхностный явный поток тепла (измерения вертикальных градиентов в ii-iv имеют важное значение в том случае, когда прямые измерения теплового потока не будут достаточно точными из-за различных проблем в автоматических океанических станциях, таких как волны, брызги и нарастание льда/снега на инструментах);
- (v) Направленные вверх и вниз компоненты солнечного коротковолнового и теплового длинноволнового излучения (в большинстве случаев, данные хорошего качества требуют соответствующей электрической мощности для отопления и вентиляции купола сенсора);
- (vi) Если климат на станции не слишком суровый, и необходимая электрическая мощность может быть обеспечена, то могут быть выполнены и другие измерения, например, потоков паров воды и газовых примесей;
- (vii) Концентрации CO₂ и DMS (диметилсульфида) в воде и воздухе.

Флагманские станции

Флагманские станции обеспечивают передовые наблюдения океана и морского льда, а также их взаимодействий с атмосферой. Станции (i) являются либо заякоренными, либо дрейфующими, они способны работать в течение зимы или даже всего года, другой вариант - это (ii) постоянные прибрежные/архипелаговые станции. Соответственно, обеспечивается электроэнергия, инструменты и поддерживающие структуры контролируются и получают техническое обслуживание. Измерения включают:

- (i) Все измерения, проводимые на потоковых станциях (в том числе v и vi)
- (ii) Свойства снега и льда: в том числе плотность, гранулометрический состав и распределения формы, шероховатость поверхности, заструги, напластование и торшение льда, доли столбчатого и фирнового льда.
- (iii) Профили CO₂, CH₄, летучих органических соединений и DMS в воде и в воздухе
- (iv) Профили температуры, интенсивности света и концентрации ионов
- (v) Профили массы фитопланктона
- (vi) Потоки CO₂, CH₄, летучих органических соединений и DMS
- (vii) Профили ключевых ферментов фотосинтеза

Непрерывные измерения на флагманских станциях могут быть хорошо дополнены частыми миссиями автономных подледных аппаратов, получающих данные, например, по температуре океана, солености и растворенным газам. Кроме того, в рамках авиационных правил, беспилотные авиационные системы могут управляться с флагманских станций. Они будут получать данные об атмосфере, а также о свойствах морского льда и поверхности океана.

Мы подчеркиваем, что будет трудно установить флагманские станции в открытом океане, в то время как это будет сделать легче с прибрежными. Круглогодичная дрейфующая станция, соответствующая нашим представлениям о флагманских станциях, планируется в Северном Ледовитом океане на 2018-2019 (см. <http://www.mosaicobservatory.org>). Для периодов без морских флагманских станций мы должны опираться на данные, собранные с помощью стандартных и потоковых станций, а также во время экспедиций на исследовательских судах, которые иногда позволяют осуществлять измерения, сравнимые с теми, которые запланированы на флагманских станциях, но в течение более короткого срока.

4.2.6 ПРИБРЕЖНАЯ КОМПОНЕНТА

Как было описано выше, измерения стандартных станций РЕЕХ в морских районах ведутся с помощью дрейфующих станций, буев и спутникового дистанционного зондирования. Измерительная деятельность в морских районах дополняется научными экспедициями на научно-исследовательских судах. Наземная измерительная сеть обеспечивает связь между морскими наблюдениями и прибрежной окружающей средой в ключевых областях, таких как Тикси. В Арктике, другой связующей точкой является SIOS (Интегрированная система наблюдения Земли Svalbard). В рамках РЕЕХ, стандартные буи, используемые для исследований океанов, были модифицированы для измерения концентрации CO_2 в воде и воздухе, температуры и фотосинтетически активной радиации.

Utö в Северной части Балтийского моря является примером морской станции. Станция Utö является членом сети мониторинга моря HELCOM (Комиссия по защите морской среды Балтийского моря) и членом-учредителем европейской сети ICOS. Станция обладает записями физических наблюдений за длительный период (измерения солености воды и температуры с 1900 года); в настоящее время она претерпевает дальнейшее усовершенствование для наблюдения парниковых газов (концентрации и потоки воздух-море CO_2 и CH_4) и морской биогеохимии, включая хлорофилл, питательные вещества и флуоресценцию. Другая флагманская станция в прибрежной зоне предполагается на Северной Земле.

4.2.7 ДИСТАНЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наземные наблюдения должны быть дополнены дистанционными наблюдениями систем атмосферы, суши и воды. Одной из ключевых задач РЕЕХ является решение проблем изменения климата в Пан-Евразийском регионе с помощью комбинации трех подходов: данных дистанционного зондирования, полученных с воздушных судов и спутников, наземных данных *in-situ* и дистанционного зондирования, а также моделирования физических аспектов системы Земли (Lappalainen *et al.*, 2014a,b).

Основными преимуществами аэрокосмических наблюдений являются:

- Одни и те же типы приборов и методик используются по всему миру в течение длительного периода времени (несколько десятилетий), что обеспечивает последовательные наборы данных. (Необходимым условием для этого является то, что преемственные приборы обеспечивают последовательные наборы данных для калибровки и взаимного сопоставления. Следует отметить, что могут существовать несоответствия между аналогичными наборами данных, даже полученных с аналогичных инструментов);
- Оперативность информации по составу атмосферы, свойствах поверхности земли и водной среды;
- Возможность получения информации о характеристиках окружающей среды с различным пространственным и временным разрешением, как в горизонтальной плоскости, так и по высоте;
- Большое пространственное разрешение, позволяющее изучать процессы и явления на локальном, региональном и глобальном уровнях;
- Высокая достоверность получаемых данных (особенно в сочетании с наземными измерениями);
- Широкий набор регистрируемых параметров, характеризующих состояние окружающей среды, включая концентрацию загрязняющих веществ и их пространственное распространение.

Данные дистанционного зондирования совместно с наземными измерениями и численным моделированием предоставляют информацию по свойствам водной системы, системам суши и атмосферы, а также по пространственным и временным изменениям их компонент. Дистанционное зондирование позволяет аккумулировать статистические данные для моделирования динамических процессов различных сред. Это помогает разрабатывать четкие руководящие указания для экологических министерств и ведомств, а также для других потребителей (Lappalainen *et al.*, 2014a,b).

Спутниковые наблюдения (рис.48) обеспечивают информацию, дополняющую наблюдения *in-situ*. Спутники могут предоставлять информацию о пространственном распределении ключевых переменных:

- Состав атмосферы (Burrows *et al.*, 2011):
 - Аэрозоли, газовые примеси, парниковые газы, облака
- Свойства поверхности земли:
 - Альbedo поверхности
 - Почвенно-растительный покров: растительность, фенология, граница произрастания древственной растительности, выжженные площади
 - Обнаружение пожаров, влажность почво-грунтов

- Свойства поверхности океана
 - Цветность океана: хлорофилл, цветение водорослей, волны
 - Температура поверхности моря, соленость, отображение морского льда
 - Свойства снега: снежный покров, альbedo, эквивалентный слой воды
- Свойства озер
 - Площадь, биомасса, качество воды.

Соответственно, инфраструктура РЕЕХ играет важную роль в валидации, интеграции и полном использовании спутниковых данных для исследований системы Земли.

Примеры тем, связанные с дистанционным зондированием

«Позеленение» Арктики и граница произрастания древесной растительности: уже наблюдается продвижение границы произрастания древесной растительности на Кольском полуострове.

Токсичное цветение воды: данные спутникового дистанционного зондирования могут быть использованы для оценки масштабов токсичного цветения воды и его изменений в результате изменения климата. Спутниковые данные по циклу воды в трансграничных бассейнах рек в Евразии необходимы для разработки гидрологических моделей, которые могут быть использованы в оценках водных бюджетов для всего региона исследования РЕЕХ.

Гидрологическая система: недавние исследования показывают существенные изменения в наземной гидрологической системе Арктики, включая изменения осадков, суммарного испарения, речного стока и наземной аккумуляции воды. Данные спутниковой миссии GRACE (Эксперимент по изучению климата и гравитационных возмущений) показывают долгосрочные изменения гидрологических бюджетов крупных сибирских водоразделов. Новым применением спутниковой альтиметрии, первоначально разработанной для измерения уровня моря, является мониторинг внутренних вод.

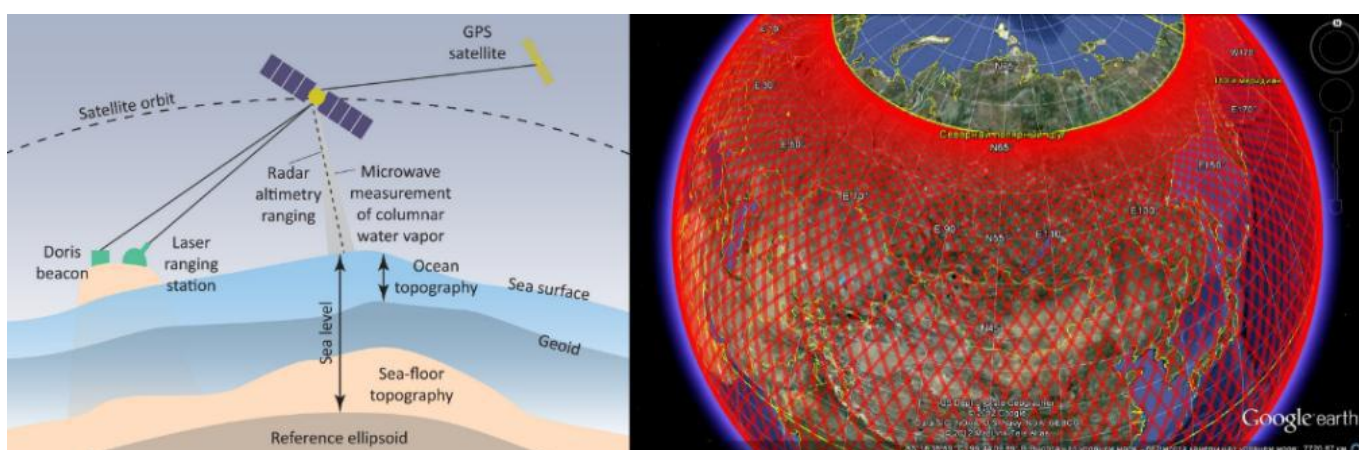


Рисунок 48 Базовые принципы спутниковой альтиметрии (слева, изображение адаптировано из CNES), трассы орбиты спутника Jason-2 (справа, изображение предоставлено Yulia Troitskaya)

4.2.8 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Исследование глобального изменения нуждается в полном и проверенном отчете по парниковым газам для наземных экосистем, центральной частью которого должен стать полный отчет по углероду (FCA). Неопределенности в ранее представленных оценках роли наземных экосистем в глобальной биогеохимии являются весьма крупными (Shvidenko and Nilsson, 2003), препятствуя научному пониманию проблемы (Schulze *et al.* 2002) и затрудняя принятие политических и экономических решений (Janssens *et al.*, 2005). Тем не менее, оценка неопределенностей FCA не является простой и требует новых подходов. FCA, особенно для больших территорий, таких как регион исследования РЕЕХ, являются типичными нечеткими (недостаточно определенными) динамическими системами (также называемые сложной или «злостной» проблемой). Это означает, что все существующие методы оценки цикла углерода в наземных экосистемах (т.е., подход ландшафт-экосистема, процессно-ориентированные модели, турбулентная ковариация и обратное моделирование), когда они применяются отдельно друг от друга, в состоянии произвести лишь значение «неопределенности в рамках подхода», которое может иметь мало общего с «реальной неопределенностью» (Shvidenko *et al.*, 2010). РЕЕХ обеспечит системный анализ и разработку этой проблемы в целом. Одним из возможных подходов является дальнейшее совершенствование методологии FCA, разработанной IIASA. Эта методология основана на системной интеграции различных методов, с последующей гармонизацией, приводящей к взаимным ограничениям для промежуточных и окончательных результатов, полученных независимыми методами (Shvidenko *et al.*, 2010; 2013a,b).

4.3 ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, КОТОРАЯ ЯВЛЯЕТСЯ БАЗИСОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕЕХ



Рисунок 49 Существующие полевые станции и экспедиции в сфере РЕЕХ, представляющие различные типы сред. Начиная слева: Вышка в Зотино (ZOTTO) и экспедиция на поезде ТРОИКА. Фотографии Nikolay Elansky

В сфере РЕЕХ существует большое количество различных тематических инфраструктур (рис.49). Здесь представлено короткое резюме отобранных инфраструктур с целью проиллюстрировать их вклад в научные темы РЕЕХ. Представлены национальные и мульти-национальные инфраструктуры.

4.3.1 СКАНДИНАВИЯ

Пример существующей обширной сети атмосферных и экосистемных станций может быть найден в Финляндии. Сеть SMEAR (Станция измерения взаимодействий экосистемы и атмосферы) является основой сети in-situ в рамках РЕЕХ. Сеть SMEAR состоит из супер-станций, которые охватывают все бореальные леса скандинавской части тайги в северных широтах (рис.14). Измерения, полученные от сети станций SMEAR, характеризуют условия, начиная от отдаленных бореальных сред к северу от полярного круга и заканчивая более умеренными бореальными средами на юге Финляндии. Измерения, проводимые в Хельсинки, предоставляют информацию о воздействии городских эмиссий. Широкий пространственный диапазон сети SMEAR дает возможность, например, исследовать перенос шлейфов дыма от крупных лесных пожаров и горения больших объемов биомассы в России (Рис. 50, Таблица 1).

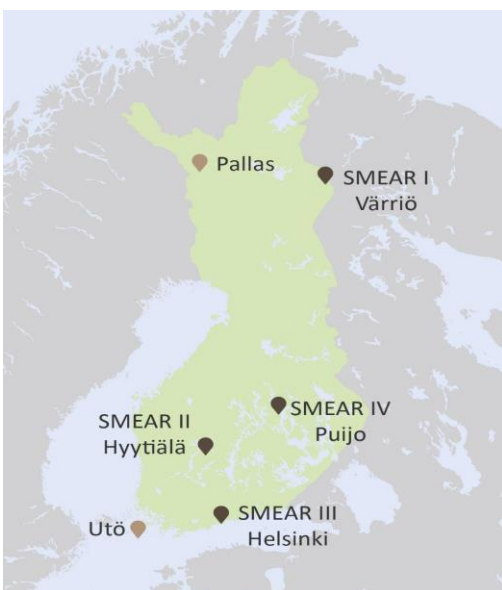




Рисунок 50 Сеть станций атмосферных наблюдений SMEAR (Станция измерения взаимодействий экосистемы и атмосферы). Описание станций представлено в Таблице 1.

Таблица 1 Обзор сети станций SMEAR, а также станций Pallas-Sodankylä GAW и Utö. Данные сети SMEAR могут быть визуализированы и загружены с помощью смарт-портала SMEAR: <http://avaa.tdata.fi/web/smart> (Junninen et al., 2009).

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Обширные мощности для измерения взаимодействий лес-атмосфера ▪ Функционируют с 1996 (Hari and Kulmala, 2005) ▪ Измерения распределения аэрозоля по размерам начиная с субмикронного уровня с января 1996 года. ▪ Станция окружена сосновым лесом, с управляемой площадкой насаждений, созданной в 1962 году после того, как площадь была специально обработана (контролируемое выжигание и подготовка почвы). ▪ Измерения лесных экосистем и физиологических характеристик деревьев ▪ Измерения проводятся на плоту в озере Kuivajärvi (Heiskanen et al., 2014) и в болотистой местности Siikaneva (Riutta et al., 2007). ▪ Ближайшие точки городского загрязнения - Tampere (ок. 50 км к юго-западу) и Jyväskylä (около 100 км к северо-востоку). ▪ Площадка для сетей ICOS, ACTRIS, INGOS, EXPEER, ANAEE и LIFEWATCH; а также для WMO, EMEP, CarboEurope, NitroEurope, EUCAARI и PEGASOS
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Станция расположена в Лапландии, в отдаленной сельской местности. ▪ В непосредственной близости от станции находится сосновый лес (<i>Pinus sylvestris</i> L.), которому более 40 лет. Измерения проводятся на вершине холма (Hari et al., 1994). ▪ Поблизости нет источников загрязнения, но эмиссии от промышленной деятельности (например, металлургических предприятий) из района Кольского полуострова могут переноситься над станцией. (Kyrö et al., 2014). Новая деятельность по добыче полезных ископаемых планируется в районе Sokli. ▪ Измерения распределения субмикронных аэрозолей по размерам начаты с 12/1997 в диапазоне размеров 8-460 nm. В 04/2003 была добавлена система twin-DMPS для измерения диапазона размеров 3-1000 nm. Отбор проб делается на уровне 2 м над землей внутри полога леса. ▪ Диапазон параметров атмосферы включает концентрации малых газовых компонентов наряду с температурой, относительной влажностью, солнечной радиацией и скоростью ветра.



Хельсинки. Станция SMEAR III в Хельсинки (60°12'N, 24°57'E, 26м над уровнем моря) (фотография Antti-Jussi Kieloaho)

- Станция действует в Хельсинки с осени 2004 года.
- Аппаратура регистрирует динамику аэрозолей и химию атмосферы, микрометеорологию, осуществляет мониторинг погоды и исследует экофизиологию деревьев, растущих в городской среде.
- Станция расположена в двух разных точках, Kumpula и Viikki. Kumpula находится примерно в 4 км от Хельсинки.
- Атмосферные наблюдения с помощью 31-метровой вышки, оснащенной метеорологическими приборами на нескольких высотах (Järvi *et al.*, 2009).




Руйо. Станция SMEAR IV в Куорю (62°55'N, 27°40'E, 224м над уровнем моря) (фотография Pekka Ahponen)

- Станция расположена на вершине наблюдательной вышки.
- Непрерывные измерения аэрозолей, облачных капель, параметров погоды и малых газовых компонент (Leskinen *et al.*, 2009, Portin *et al.*, 2009) с 06/2005.
- Станция часто оказывается расположена внутри облака, например, более 40% дней в октябре.
- Два пробоотборника для аэрозолей: внедренный пробоотборник, оснащенный импактором PM1, и воздухозаборник, способный высушивать облачные капельки.
- Распределение аэрозоля по размерам с обоих пробоотборников с теми же DMPS с помощью синхронизированной системы клапанов в двух 6-минутных циклах, временное разрешение 12 минут для всего измеряемого диапазона размеров.
- Разница в распределении частиц по размерам обеспечивает информацию о разбивке частиц между облачными каплями и внедренными частицами в облаке.



Pallas. Станция Sammallunturi Глобальной службы атмосферы (GAW) (67°58'N, 24°07'E, 565м над уровнем моря) (фотография Juha Hatakka)

- Станция управляется Финским Метеорологическим Институтом.
- Расположена на вершине холма в западной Лапландии в субарктическом регионе вблизи северной границы зоны бореального леса
- В непосредственной близости находится смешанный лес, состоящий из сосны, ели и березы.
- Станция расположена выше границы леса, забор проб ведется на высоте 7 м над землей.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Отсутствие существенных местных или региональных источников загрязнения, 20 км до ближайшего города (Muonio, 2500 жителей). ▪ Система DMPS работает с апреля 2000 года, ведется измерение аэрозольных частиц в диапазоне размеров 7-500 nm.
 <p>Utö. Атмосферная и морская исследовательская станция (N 59°46'50, E 21°22'23, 1м над уровнем моря) (фотография Minna Aurela)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Управляется Финским метеорологическим институтом в сотрудничестве с Финским институтом окружающей среды ▪ Метеорологические наблюдения ведутся с 1881 года, соленость и температура моря измеряются с 1900 года, атмосферные малые газовые компоненты и аэрозоли - с 2003 года (Engler <i>et al.</i>, 2007) ▪ Часть сетей ICOS (с 2014), EMEP (с 1980) и HELCOM, занимающихся мониторингом морской среды

Возможности наблюдения Скандинавской сети варьируются от самой Скандинавии до Арктических сред. Связующим звеном может выступить сеть CRAICC (Взаимодействия криосферы и атмосферы в меняющемся климате Арктики), позволяющая получать данные атмосферных и экосистемных наблюдений в различных местностях от высоких широт Арктики до полубореальных сред Дании (рис.51).

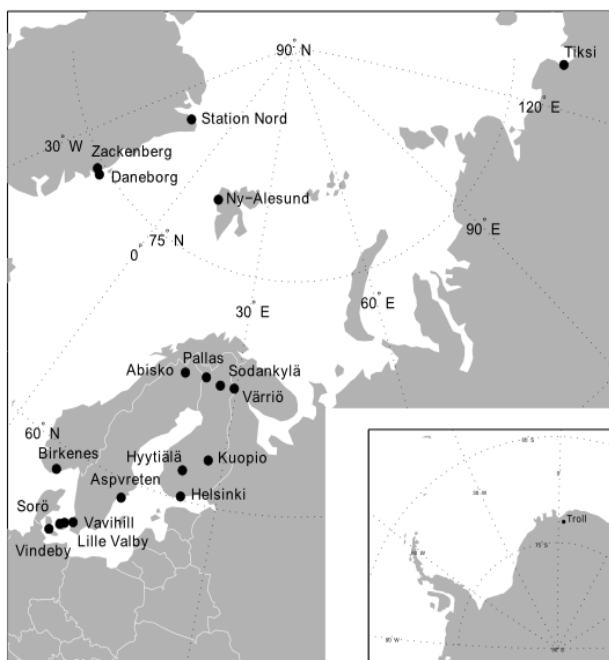


Рисунок 51 Сеть станций in-situ Научного центра по «Взаимодействиям криосферы и атмосферы в меняющемся климате Арктики» (CRAICC), финансируемого Nordforsk.

4.3.2 ЕВРОПА

В Европе существует много исследовательских инфраструктур, занимающихся окружающей средой, которые делают вклад в сферу знаний, относящуюся к РЕЕХ. Уже существуют гармонизированные структуры для изучения парниковых газов (Интегрированная система наблюдения углерода, ICOS, Интегрированная система наблюдения парниковых газов кроме углекислого газа, INGOS) и короткоживущих климатообразующих факторов (Инфраструктурная сеть по изучению аэрозолей, облаков и малых газовых компонент, ACTRIS, рис. 52). Общее видение обеспечивается Международной службой атмосферы, GAW, которая управляется Всемирной метеорологической организацией. Эта инфраструктура предлагает атмосферные наблюдения с глобальной перспективой, но ей не хватает покрытия высоких широт Арктики и России.

Инфраструктурами, занимающимися наблюдением экосистем, являются сети ExpeER («Проведение опытов при изучении экосистем») и ANAEE («Анализ и проведение опытов в экосистемах»). Эти структуры углубляют понимание поведения экосистем наземных и водных биомов в регионе исследования РЕЕХ.

Флагманские станции SMEAR, и в особенности SMEAR-II в Нуутиälä, являются частью всех вышеперечисленных исследовательских инфраструктур. Это подтверждает силу концепции супер-станций и иерархического подхода к сети станций, используемых в РЕЕХ. Адаптивная сеть станций РЕЕХ и в особенности сеть супер-станций РЕЕХ могут внести вклад в решение тематических исследовательских вопросов в рамках РЕЕХ и углубить понимание поведения системы Земли в глобальном масштабе.

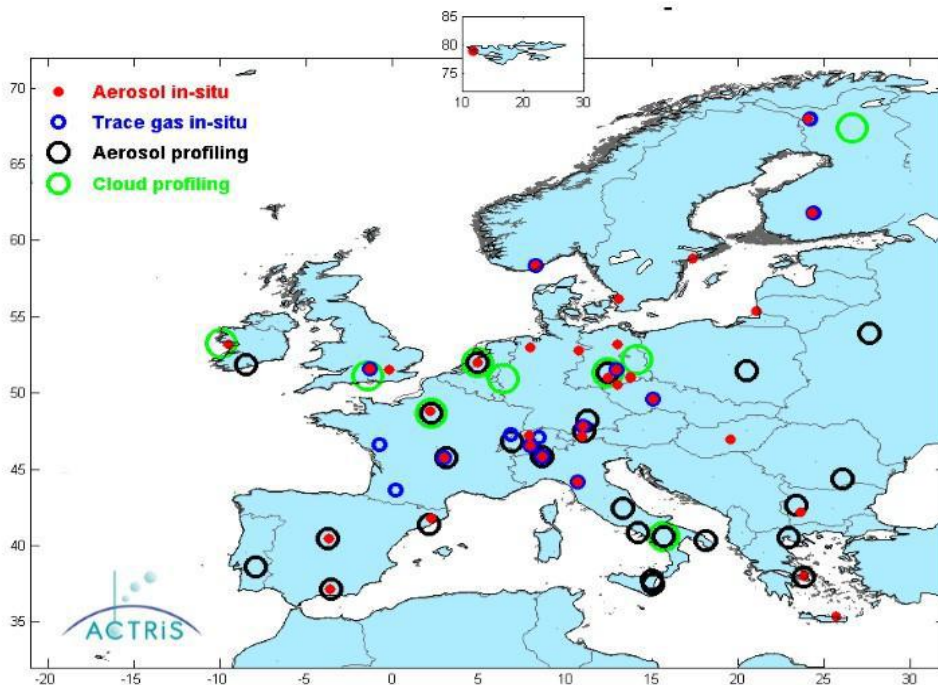


Рисунок 52 Инфраструктурная сеть по изучению аэрозолей, облаков и малых газовых компонент, ACTRIS обеспечивает гармонизированные данные наблюдений in-situ и дистанционного зондирования по аэрозольным частицам, созданию профилей облаков и концентрациям летучих органических соединений и оксидов азота.

4.3.3 РОССИЯ И В ОСОБЕННОСТИ СИБИРЬ

В настоящее время территориальный охват сети станций и другой научно-исследовательской инфраструктуры распределен в евразийском регионе неравномерно. Существует несколько станций долгосрочных измерений, вышки и мачты (рис.53), оборудованные различными инструментами и предоставляющие данные по множеству параметров газов и частиц; в ходе проводимых кампаний проводились интенсивные измерения.

Основными проблемами мониторинга атмосферы в Сибири являются износ аппаратуры, недостаточное развитие возможностей технического обслуживания, позволяющего поддерживать и контролировать качество измерений, недостаток непрерывных измерений для большей части территории, неэффективность оборудования для обработки и передачи данных и несовместимость сибирской измерительной сети с существующими международными сетями наблюдений. В настоящее время проводится реконструкция Российской системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА), заключающаяся в модернизации исследовательского оборудования и более широком использовании методов дистанционного зондирования, причем в перспективе РСМСА войдет в интегрированную глобальную систему наблюдения Земли.

На первой стадии сеть наблюдений РЕЕХ будут составлять существующие станции и их измерительные программы, а также процедуры качественного анализа и распространения данных, разработанные в других проектах. Для обеспечения долгосрочной устойчивости и сопоставимости эти измерения должны быть, при наличии возможности, связаны с международными сетями. Существующие станции должны быть оборудованы недостающими инструментами, чтобы они могли вносить свой эффективный вклад в РЕЕХ. Минимальный набор должен включать инструменты, измеряющие потоки и концентрации аэрозолей и малых газовых компонент, включая парниковые газы, снежный/ледяной покров, компоненты бюджета поверхностного излучения и вспомогательные метеорологические величины. Непрерывные данные, полученные со спутников, должны быть дополнены данными измерений in-situ, полученными со специально построенных исследовательских кораблей и воздушных судов, а также Транссибирской магистрали.

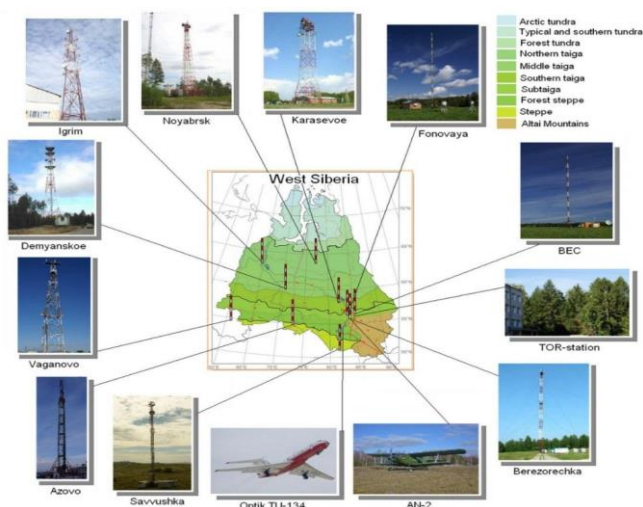


Рисунок 53 Совместная российско-японская наблюдательная сеть вышек в Сибирском регионе по мониторингу парниковых газов (JR-Station, Национальный институт изучения окружающей среды, Япония (NIES, JP) и Институт оптики атмосферы СО РАН)

4.3.4 КИТАЙ

В Китае примером осуществляемой деятельности является измерительная научно-исследовательская станция наблюдения региональных процессов системы Земли (Sorpes-NJU), разработанная Институтом исследования климата и глобальных изменений (ICGCR) и Университетом Нанкина. Эта станция действует с 2009 г. Глобальной целью данной платформы является характеристика временных вариаций ключевых параметров, связанных с изменением климата и осмысление взаимосвязей различных региональных процессов в Восточном Китае, регионе, находящемся под сильным воздействием муссонов и интенсивной деятельности человека (Ding *et al.*, 2013a,b). Представленные на рисунке 54 области рассчитаны на основе 20-дневного анализа обратной траектории для данных станций Sorpes-NJU и Нуутиälä SMEAR-II. Весь исследуемый регион РЕЕХ попадает в указанные области.

Sorpes-NJU находится в процессе переработки в измерительную станцию-платформу типа SMEAR (Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations – Станция измерения взаимодействий экосистем и атмосферы). В основном, она фокусируется на исследовании воздействия деятельности человека на климат и окружающую среду в регионе дельты р.Янцзы, где осуществляется быстрая урбанизация и индустриализация. Учитывая географические, климатические и экологические особенности Восточного Китая, Sorpes-NJU сосредоточена на четырех главных процессах: процессы на поверхности суши, влияние загрязнения воздуха на климат, взаимодействие экосистем и атмосферы, а также гидрология и круговорот воды. Платформа будет развиваться в интегрированную сеть наблюдений с центральной станцией, несколькими «спутниковыми» станциями и мобильными платформами вокруг. Другие возможные станции РЕЕХ в Китае – это исследовательская станция лесных экосистем на плоскогорье Чанбайшань 42°40'-42°36'N, 126°55'-129°80'E и экосистемная станция Weihai, станция сети CERN 37°37'N, 101°19'E (Lappalainen *et al.*, 2014a,b).

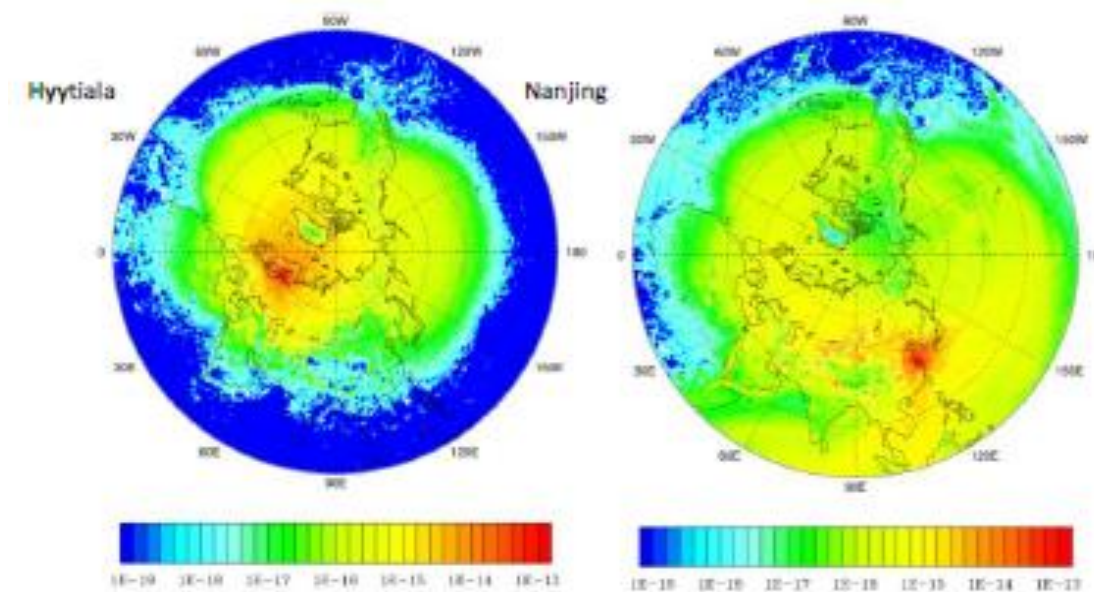


Рисунок 54 Годовые осредненные изображения выбросов для станций Нуутиälä и Sorpes-NJU на основании моделирования обратной дисперсии Лагранжа за 20 дней на 2012 г. с использованием модели траектории Hysplit. Методология представлена в Ding *et al.*, 2013с.

4.3.5 КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ



Рисунок 55 Области приема космической информации наземными станциями НИИ «АЭРОКОСМОС» (слева) и китайскими приемными станциями (справа, изображение RADI CAS).

С помощью дистанционного зондирования (рис. 55) можно получать данные по составу атмосферы, свойствам поверхности суши и моря, снега, льда, растительности и других параметров, описанных в разделе 4.2.7.

Основным измеряемым параметром при дистанционном зондировании является электромагнитное излучение. Излучение, измеряемое на длинах волн в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном спектральных диапазонах, позволяет получать информацию по составу атмосферы:

- (i) Свойства аэрозолей: первичная аэрозольная оптическая толщина на нескольких длинах волн, экспонента Ангстрема, коэффициент аэрозольного поглощения. Информация по физическим и оптическим свойствам аэрозолей используется для восстановления аэрозольной оптической толщины, которая, в принципе, определяет такие свойства аэрозолей, как тонкие фракции, состав аэрозолей, альbedo однократного рассеяния, и т.д. (Kokhanovsky and de Leeuw, 2009; de Leeuw *et al.*, 2011; Holzer-Popp *et al.*, 2013; de Leeuw *et al.*, 2015).
- (ii) Свойства облачности: фракционный состав, оптическая толщина, высота верхней границы облачности, действующий радиус облачных капелек, путь жидкости, и т.д.
- (iii) Концентрации малых газовых компонент (напр., O_3 , NO_2 , CO , NH_3 , H_2O , летучих органические соединения галогены) (Burrows *et al.*, 2011)
- (iv) Концентрации парниковых газов (напр., CO_2 , CH_4) (Buchwitz *et al.*, 2015)
- (v) Экосистемы

Спутники также измеряют свойства поверхности суши, океана и озер, как описано в разделе 4.2.7.

Вся эта информация доступна в глобальном масштабе с частотой и пространственным разрешением, которые зависят от инструмента и платформы (спутника). В некоторых случаях имеются данные за 3 десятилетия. Для случаев аэрозолей и облачности в полярных регионах, восстановление находится в начальной стадии вследствие проблем, возникающих при распознавании снега/льда, отражательная способность которых превосходит отражательную способность аэрозолей или облаков.

Текущая деятельность в области космического мониторинга в России и Китае

Россия:

НИИ«АЭРОКОСМОС»: мониторинг пожаров во времени, близком к реальному; оценка эмиссий СО; глобальные распределения температуры поверхности океана; мониторинг наземных экосистем; мониторинг лесохозяйственной деятельности, лесопатологии, лесных ресурсов; обнаружение и оценка ущерба от лесных пожаров; сертификация лесов; мониторинг лесозаготовок; оценка лесовосстановления, обнаружение областей с интенсивной антропогенной нагрузкой.

Геопортал МГУ (<http://www.geogr.msu.ru:8082/api/index.html>). К Консорциуму университетских геопорталов (УНИГЕО) в настоящее время присоединились более 20 российских центров.

Институт космических исследований РАН (<http://smiswww.iki.rssi.ru/>): прием открытых данных дистанционного зондирования, таких как TERRA/AQUA MODIS, тематическая обработка этих и других изображений, собственная приемная станция для MODIS.

Китай:

RADI: Сравнительное исследование дистанционного зондирования глобального изменения окружающей среды, проводимое в четырех странах (Австралия, Бразилия, Канада и Китай) и охватывающее большую часть площади суши на четырех континентах.

RADI: Мониторинг и оценка засух, пожаров, наводнений в Азиатском регионе (Восточная Азия, Средняя Азия, Южная Азия, Западная Азия, Юго-восточная Азия) в рамках проектов CAS-TWAS

RADI: Восстановление спутниковой информации об аэрозолях в Евразии и Арктике, динамика аэрозолей; восстановление спутниковой информации о снеге, льде и многолетней мерзлоте в Евразии, их динамика.

RADI: Процессы аэрозоль-облако и атмосфера-гидросфера в системе Земли и характеристики экстремального выпадения осадков. Моделирование в пространственном и временном масштабах (поддержано Китайской академией наук).

RADI: Обнаружение пространственного и временного изменения землепользования, почвенно-растительного покрова и фенологии в Евразии на основе данных со многих спутников.

RADI: Динамика углерода в лесах, травянистых участках местности, водно-болотных угодьях в Евразии в условиях экстремальных климатических событий на основе интегрированных данных дистанционного зондирования и экологического моделирования.

RADI: Спутниковые измерения водных циклов трансграничных речных бассейнов в Евразии.

Спутники обеспечивают ценные данные о параметрах морского льда в Арктике. Типы морского льда могут быть определены на основе изображений, полученных от радиолокаторов с синтезированной апертурой (SAR) (ASAR/ENVISAT, SAR/RADARSAT-2, новый SAR на Sentinel-1 и другие) с помощью автоматических алгоритмов классификации (Zakhvatkina *et al.*, 2013). Сплоченность, протяженность и площадь морского льда Арктики постоянно измерялись спутниковыми микроволновыми радиометрами (SMMR/NIMBUS-77, SSMI/DMSP, AMSR-E/AQUA, AMSR 2/GCOM-W1) с 1979 года (Parkinson and Cavalieri, 2008). Новая эра регулярного мониторинга толщины морского льда Арктики началась в феврале 2010 года с запуском европейского спутника CRYOSAT, оснащенного интерферометрическим радиолокационным высотомером с синтезированной апертурой (SIRAL) (Laxon *et al.*, 2013). Дрейф морского льда также может быть восстановлен с использованием различных спутниковых устройств, таких как радиолокаторы, радиолокационные рефлектометры (SEAWINDS/QUIKSCAT, ASCAT/METOP), радиолокационные высотомеры и микроволновые радиометры (<http://cersat.ifremer.fr/data/discovery/by-parameter/sea-ice>).

4.3.6 ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ

Чтобы дополнить наблюдения *in-situ* (особенно на флагманских станциях) и возможности спутникового дистанционного зондирования, станции наземных измерений должны быть оснащены активным дистанционным зондированием. В Европе активное дистанционное зондирование с помощью наземных средств осуществляется в рамках инфраструктурного проекта ACTRIS. Некоторые лидары хорошо оборудованы для получения профилей свойств аэрозолей. В зависимости от инструментов могут быть получены различные наборы аэрозольных продуктов.

Идеальный набор инструментов по профилям аэрозолей - это рамановский лидар с тремя длинами волн с возможностью измерения деполяризации (три канала упругого обратного рассеяния, два канала комбинационного рассеяния N₂, деполяризация на одной длине волны) и солнечный фотометр AERONET (Heese *et al.*, 2010), работающие непрерывно каждый день в году вместе с измерителем высоты облачности (*e.g.* Vaisala CL51) и приборами *in-situ*. Такая конфигурация обеспечивает спектрально решенное аэрозольное ослабление и профили обратного рассеяния в сочетании с коэффициентом деполяризации частиц. Также возможно определение типа аэрозоля и восстановление микрофизических свойств частиц.

Лидары, которые не могут измерить чистый молекулярный отраженный сигнал (рамановский или рэлеевский), требуют допущения по соотношению ослабления к обратному рассеянию (коэффициент лидара) для восстановления аэрозолей (Biniatoglou *et al.*, 2011). Создание точных профилей ослабления на основе этих приборов невозможно. При работе в УФ или видимой области спектра, калибровка возможна в частях атмосферы без аэрозолей. Можно получить надежные

профили обратного рассеяния, когда эти лидары действуют совместно с солнечным фотомером для ограничения аэрозольной оптической толщины атмосферы. Измерители высоты облачности можно рассматривать как лидары обратного рассеяния малой мощности, они работают в диапазоне 905 или 1064 нм. Из-за низкого соотношения сигнала к шуму можно наблюдать только слои с высокой аэрозольной нагрузкой (планетарный пограничный слой, загрязнение или шлейфы пыли).

Иерархия возможных аэрозольных продуктов

Иерархия продуктов связана с возможностями инструментов (от простого измерителя высоты облачности до продвинутых многоволновых рамановских лидаров). Получение продуктов i-iv возможно с простыми лидарами обратного рассеяния, продуктов v-viii - только при наличии идеального набора инструментов (Vöckmann *et al.*, 2004).

- (i) Ослабленный профиль обратного рассеяния: калиброванный профиль атмосферного обратного рассеяния с скорректированным диапазоном. (O' Connor *et al.*, 2004)
- (ii) Аэрозольная маска: части атмосферы с повышенной аэрозольной нагрузкой (Vinietoglou *et al.*, 2011).
- (iii) Высота планетарного пограничного слоя, границы аэрозольного слоя: верхняя граница аэрозольного слоя, который взаимодействует с поверхностью, и верхняя и нижняя высота слоев поднятого аэрозоля.
- (iv) Профиль коэффициента обратного рассеяния частиц (на одной или нескольких длинах волн): количественное (откалиброванное и с коррекцией на ослабление) описание обратного рассеяния с объемом 180° , вызванного аэрозольными частицами (в $m^{-1} sr^{-1}$) (Vöckmann *et al.*, 2004; Pappalardo *et al.*, 2004).
- (v) Профиль соотношения линейной деполяризации частиц (на одной или нескольких длинах волн): количественное (откалиброванное) описание деполяризации линейно-поляризованного лазерного излучения, вызванного (несферическими) аэрозольными частицами.
- (vi) Профиль коэффициента ослабления частиц (на одной или нескольких длинах волн): количественное описание атмосферного ослабления, вызванного аэрозольными частицами (в m^{-1} , полученный из чистого молекулярного отраженного сигнала, то есть методом самокалибровки) (Vöckmann *et al.*, 2004; Pappalardo *et al.*, 2004).
- (vii) Классификация типа аэрозоля: выявление основных типов аэрозолей (таких как пыль, морской аэрозоль, дым, загрязнение, вулканический пепел) по коэффициенту деполяризации, коэффициенту лидара и/или экспоненте Ангстрема (коэффициент цвета) (Pappalardo *et al.*, 2004).
- (viii) Микрофизические свойства частиц (например, эффективный радиус, распределение по объему, показатель преломления), полученные на основе коэффициентов спектрального ослабления и обратного рассеяния.

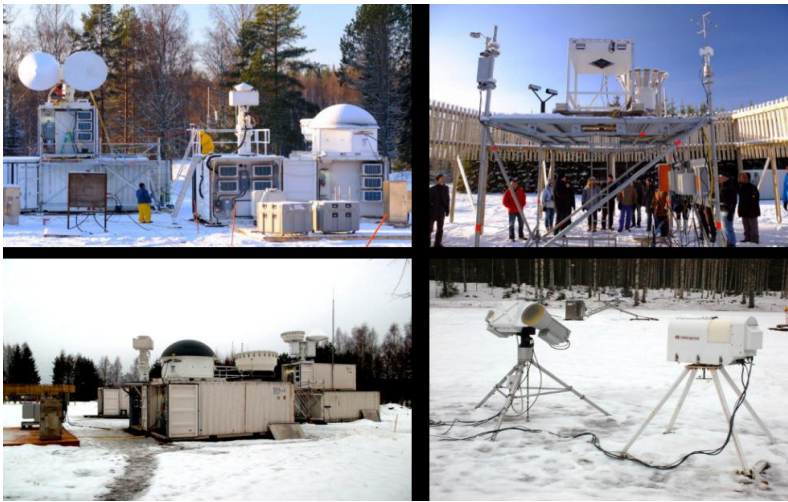


Рисунок 56 Дистанционное зондирование свойств аэрозолей и облаков с помощью наземных средств. Фотографии предоставлены Dmitri Moisseev.

Достижения в области понимания роли процессов, происходящих в облаках, имеют решающее значение для снижения неопределенности в прогнозировании осадков и водного цикла. Осадки – это ключевой компонент глобальной климатической системы и взаимодействия аэрозоль-облако. Чтобы понять и обозначить континуум климатически важных облачных режимов, от сильного дождя до мелкого дождя и снегопада, требуются станции, создающие профили облаков и осадков в регионе исследования РЕЕХ. Эти станции должны регистрировать облачные режимы типичные для региона, т.е. глубокую конвекцию, системы тонких облаков, фронтальные системы и орографическое усиление осадков

Для фиксации процессов, связанных с облаками и осадками, необходимы комплексные измерения микрофизических свойств облаков и осадков (рис.56). Для достижения этой цели необходимо сочетание облачных радиолокаторов, микроволновых радиометров и лидаров (Illingworth *et al.*, 2007).

Иерархия продуктов со станций, создающих профили облаков и осадков

Необработанные продукты:

- (i) Фактор радиоотражательной способности и доплеровская скорость (облачный радиолокатор)
- (ii) Ослабленный лидаром коэффициент обратного рассеяния (лидар)
- (iii) Яркостная температура микроволнового радиометра и пути воды

На основе этих наблюдений можно получить некоторое количество метеорологических продуктов, например:

- (i) Водность (водосодержание)
- (ii) Содержание воды в форме льда
- (iii) Мелкий морозящий дождь и размер капель дождя на основе данных радиолокатора и лидара
- (iv) Эффективный радиус льда на основе данных радиолокатора и лидара
- (v) Скорость рассеяния кинетической энергии турбулентности от радиолокационной доплеровской скорости
- (vi) Интенсивность и тип осадков

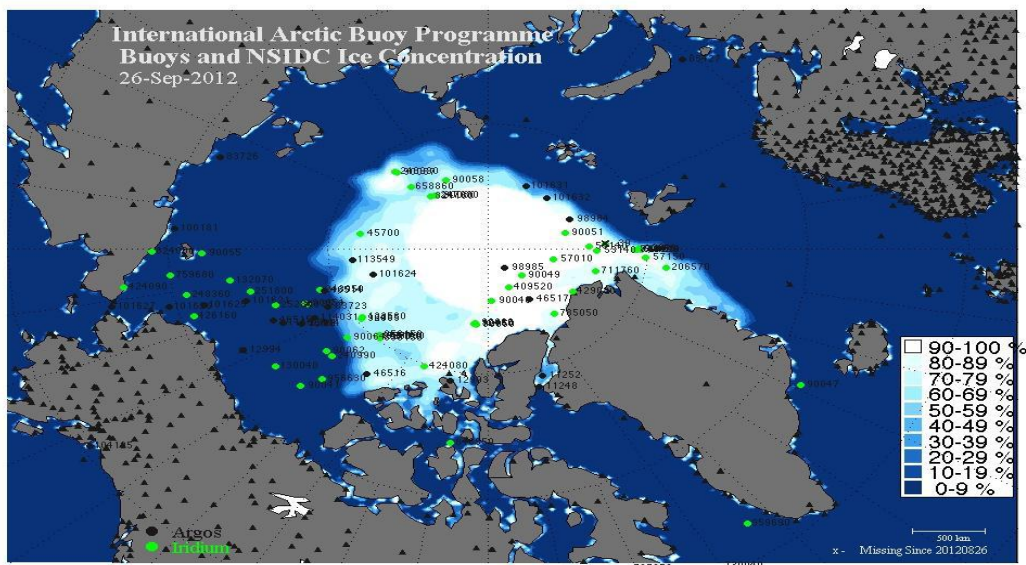


Рисунок 57 Карта местоположений буев IABP (черные и зеленые круги) по состоянию на 26 сентября 2012. Треугольники обозначают наземные метеорологические станции. Сплоченность морского льда показана на цветовой шкале. Источник изображения http://iabp.apl.washington.edu/maps_monthly_nsidcice.html, предоставлено Университетом Вашингтона.

Данные о температуре, солёности и текущих профилях верхних слоев океана получают с помощью буев, оснащенных приборами, расположенными на разных глубинах. Помимо дрейфующих буев, также используются заякоренные буи (рис.57). Сеть наблюдений за верхним слоем океана, однако, гораздо менее плотная, чем сеть наблюдений за морским льдом. О верхнем слое океана большую часть информации предоставляют спутниковые наблюдения. Современные спутниковые дистанционные сенсоры предлагают довольно широкий спектр параметров, характеризующих состояние и свойства открытых океанов. Например, прошлые и текущие данные о температуре поверхности моря для Арктики доступны на основе инфракрасных измерений MODIS/AQUA, AVHRR/NOAA и AATSR/ENVISAT, а также микроволновых наблюдений с помощью SSMI/DMSP, AMSR-E/AQUA и AMSR 2/GCOM-W1. Солёность поверхности моря (SSS) регулярно измерялась с 2009 года микроволновым радиометром MIRAS, находящимся на европейском спутнике SMOS и предоставляющего синтезированные карты SSS высокой точности. С 2011 года, данные SSS доступны также от микроволнового радиометра AQUARIUS (NASA), находящегося на борту аргентинского спутника SAC-D (Klemas, 2011). Текущие профили восстанавливаются по данным высотометров (данные сервиса AVISO - архивирование, валидация и интерпретации спутниковых океанографических данных, <http://www.aviso.oceanobs.com>), а также с помощью инфракрасных и микроволновых датчиков (Dohan and Maximenko, 2010). Вместе, эта группа спутниковых сенсоров предоставляет не только данные о траекториях течений, но и о их скорости, а также профили (с применением численного моделирования). Поверхностные ветровые поля, волновые характеристики, биогенные пленки и разливы нефти могут быть восстановлены на основе SAR и оптических данных. Альbedo ясного неба формируется из данных, полученных приборами CERES, расположенных на спутниках TERRA, AQUA и NASA-NOAA's SUOMI NPP. Фитопланктон хлорофилл, растворенный органический и суспензионный неорганический углерод, а также скорость первичной продуктивности восстанавливаются из данных измерений MODIS/AQUA, MODIS/TERRA, ALI/HYPERION, VIIRS/SUOMI NPP, а также спутника SENTINEL-3, который будет запущен в следующем году (Petrenko *et al.*, 2013).

4.3.7 МОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ IN-SITU



Рисунок 58 Экспедиции в Северном Ледовитом океане. Изображения предоставлены Ella-Maria Kyrö (слева) и Gennady Matishov (справа).

Морские наблюдения РЕЕХ будут состоять из наблюдений in-situ и дистанционных наблюдений. Измерения in-situ включают, в частности, температуру океана, соленость, химические компоненты и органическое вещество; толщину, температуру, структуру и состав морского льда и снега; а также морскую атмосферу (температура, влажность, ветры, облака, аэрозоли, химический состав). Дистанционные наблюдения будут включать температуру поверхности океана, цветность и волновое поле, свойства морского льда, в том числе тип льда, его сплоченность, протяженность, толщину и альбедо, а также параметры биологической активности (биомасса планктона). Исследования, основанные на этих наблюдениях, будут поддержаны анализом и экспериментами с применением моделей процессов, операционных моделей, а также региональных и глобальных климатических моделей. Наблюдения проводятся на дрейфующих станциях, во время исследовательских экспедиций, автономными дрейфующими станциями/буями, заякоренными буйковыми станциями, а также пилотируемыми и беспилотными исследовательскими аппаратами.

Многие наблюдения in-situ осуществляются в ходе измерительных кампаний (рис.58), проводимых на кораблях и ледовых станциях. Они значительно улучшили понимание физических процессов, происходящих с морским льдом, океаном и атмосферой, но большинство данных этих кампаний представляют точечные измерения, полученные в весенне-летний период. Российские дрейфующие станции являются одними из немногих, кто обеспечивает круглогодичные данные. РЕЕХ будет тесно сотрудничать с инициативой MOSAiC (Мультидисциплинарная дрейфующая обсерватория для изучения климата Арктики, <http://www.mosaicobservatory.org>) для получения данных круглогодично дрейфующей станции, строительство которой запланировано на 2018. Трудностью для морских наблюдений РЕЕХ является получение регулярных наблюдений в течение года с достаточно хорошим пространственным и временным разрешением. Требуется автоматические наблюдения in-situ или дистанционные наблюдения, технические возможности таких наблюдений сильно зависят от измеряемой величины.

Для изучения морского льда наиболее существенным наблюдением in-situ является вектор дрейфа льда, который определяется с помощью GPS буйев, размещенных на морском льду. С 1979 года сеть буйев поддерживается Международной программой арктических буйев (IABP,

<http://iabp.apl.washington.edu>). В настоящее время, в Северном Ледовитом океане и его окраинных морях, как правило, находится одновременно 50-100 буев (рис.57). Некоторые из буев, так называемые буи для измерения баланса массы льда, также измеряют толщину морского льда и снега, а также профили температуры через лед и снег. В некоторых зонах, таких как пролив Фрама, толщина морского льда также измеряется путем применения гидролокаторов. Главные трудности заключаются в получении регулярных наблюдений на структуры, химии и биологии морского льда.

4.3.8 АВИАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Воздушные наблюдения РЕЕХ основываются на текущей измерительной деятельности и на выдвигении новых инициатив. Одним из главных преимуществ авиационных исследовательских платформ является возможность проведения измерений *in situ* в атмосфере над обширными площадями. Более того, они могут отслеживать изучаемые атмосферные явления в широком радиусе, и если воздушное судно хорошо оснащено, то возможно осуществлять одновременные комплексные измерения атмосферы и подстилающей поверхности. Главным недостатком является высокая цена полетов; тем не менее, воздушный метод очень полезен для исследования Арктики, где трудно создать наземную наблюдательную сеть достаточной плотности. Авиационные измерения обеспечивают данными наземные станции РЕЕХ, тем самым между ними осуществляется связь.

Примеры деятельности, связанной с авиационными наблюдениями

Европа



Рисунок 59 Примеры авиационных измерений в Европе. Измерения с помощью самолета Cessna, проводимые Университетом Хельсинки (слева), измерения с помощью дирижабля PEGASOS (в центре и справа). Фотографии Ella-Maria Kyrö.

Россия



Рисунок 60 Авиационные измерения в Томской области. Фотографии ИОА СО РАН.



Рисунок 61 Самолет-лаборатория ТУ-134 «Оптик». Фотография ИОА СО РАН.

Национальный центр научных исследований, Франция (CNRS, FR) и Институт оптики атмосферы СО РАН: “Воздушные широкомасштабные региональные наблюдения в Сибири - YAK-AEROSIB”

Национальный институт изучения окружающей среды, Япония (NIES, JP) и Институт оптики атмосферы СО РАН: “Измерения парниковых газов, испытывающих воздействие экосистем Сибири”

Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Панченко М.В. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, Томск

Центральная Аэрологическая Обсерватория (ЦАО) РОСГИДРОМЕТА: Возможности наземных и воздушных исследований состава атмосферы (Борисов Ю.А.)

Дюкарев Е.А., Крутиков В.А., Кабанов М.В. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, Томск

Самолет-лаборатория ТУ-134 «Оптик» (рис.60, рис.61). Исследовательские возможности: измерения *in situ* CO₂, CH₄, CO, O₃, сажи, коэффициента рассеяния аэрозоля, распределения аэрозолей по размерам, температуры и влажности внешней среды, параметров навигации, а также проб, собранных на фильтре и измерения аэрозолей с помощью лидара. Более детальную информацию можно найти в работе Antokhin et al. (2012), где описан научный комплекс предыдущей авиационной платформы (кроме недавно установленного анализатора Picarro G2301-m и планируемого к установке в 2014 безопасного для зрения лидара нового поколения CIMEL).



Рисунок 62 Воздушные наблюдения в Китае. Фотография RADI, CAS.

Центр авиационного дистанционного зондирования RADI располагает двумя самолетами Cessna Citation S/II и двумя новыми современными самолетами ARJ 21-700er с 10 новыми единицами измерительной аппаратуры (рис.62).

Два новых воздушных судна, оборудованных 10 самыми современными телеметрическими датчиками, работающими в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазоне, высокопроизводительной системой обработки данных, авиационный атмосферный лазерный локаатор, камеру на приборах с зарядовой связью, авиационный веерный спектрометр, формирующий изображения (0.45-12.5 мкм); авиационный трехмерный лидар, авиационный интерферометр с частотным диапазоном χ (SAR), авиационный веерный спектрометр, формирующий изображения (0.45-2.5 мкм).

Воздушные и морские наблюдения

Многие из буев IABP оснащены датчиками давления и температуры для проведения измерений атмосферы над Северным Ледовитым океаном. Внедрение этих данных в модели имеет безусловное позитивное воздействие на качество анализа состояния атмосферы (Inoue *et al.*, 2009). Сокращение морского льда имеет тенденцию создавать интервалы отсутствия данных для открытого океана. Во время морских ветров, прибрежное/островное радиозондирование и станции наблюдения за погодой в нижних слоях атмосферы дают ценную информацию о состоянии атмосферы над Северным Ледовитым океаном. Данные приземных станций и судовых наблюдений собираются, например, в архиве GISTemp (Hansen *et al.*, 2010). Беспилотные авиационные системы (UAS) имеют большой потенциал для атмосферных наблюдений над Северным Ледовитым океаном (Starkweather *et al.*, 2013). Существуют различные типы UAS начиная от мелких (менее 1кг), применяемых для создания вертикальных профилей на высоте 1-3 км, и заканчивая крупными, способными достичь нижней стратосферы, со временем работы в десятки часов. Многие UAS могут одновременно осуществлять метеорологические наблюдения и дистанционные измерения льда и свойств океана, таких как температура поверхности, альbedo, скопление льда и высота надводной части льда.

4.3.9 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

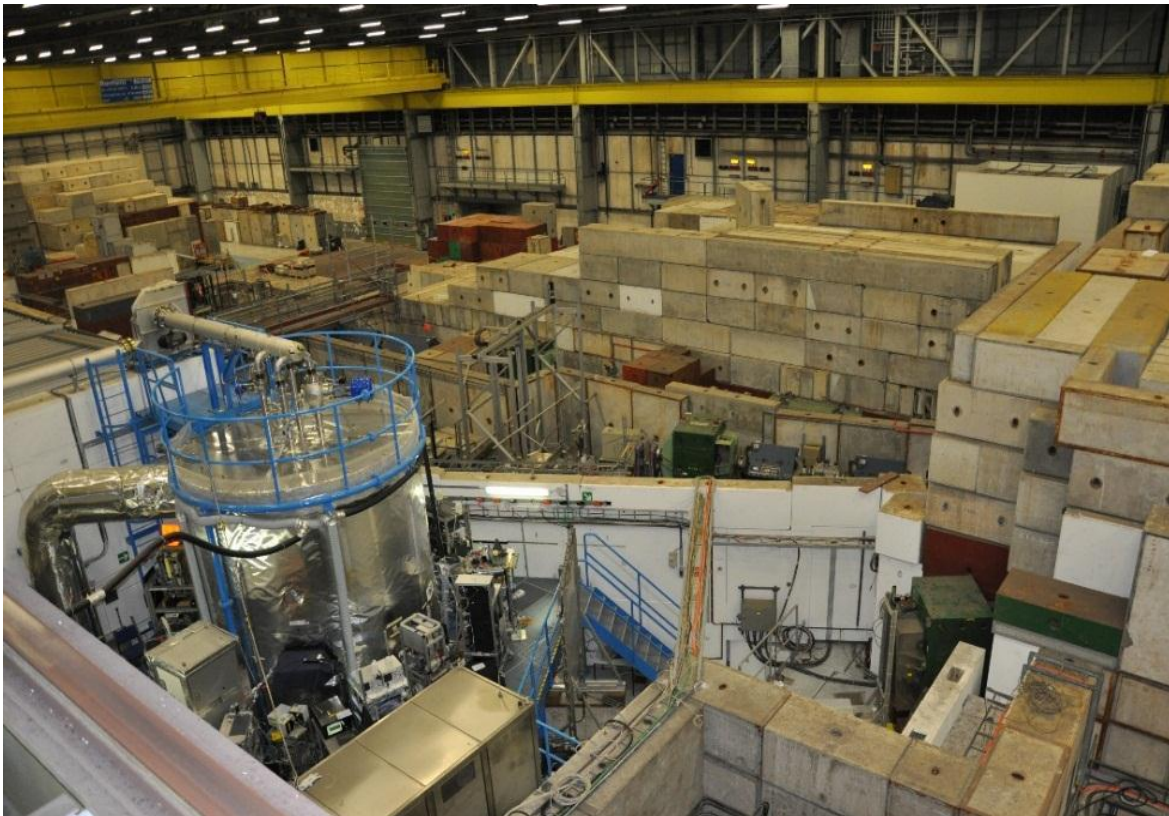


Рисунок 63 Конденсационная камера в ЦЕРНе. Фото Jonathan Duplissy.

Исследования РЕЕХ включают не только комплексные полевые наблюдения, но и лабораторные эксперименты. Экспериментальная работа ведется в различных лабораториях Европы, России и Китая. В качестве примера можно привести эмиссии аэрозолей от пожаров в сибирских бореальных лесах важные для понимания экологических и климатических воздействий в субарктических регионах и Арктике. Способность биогенных аэрозолей и аэрозолей, образовавшихся в результате горения биомассы, поглощать или рассеивать поступающую радиацию, а также действовать как ядра облачной конденсации, сильно зависит от оптических, микрофизических, химических и гигроскопических характеристик. Региональная база данных для этих свойств скудна, поэтому для получения необходимых данных необходимы лабораторные исследования.

Лабораторные эксперименты в рамках исследований РЕЕХ проводятся, например, в конденсационной камере в ЦЕРНе (Kirkby *et al.*, 2011; рис.63) и в атмосферной камере для растений в Юлихе (JPAC) под управлением Лейбницкого института тропосферных исследований (TROPOS). Эти эксперименты дают представление о начальных стадиях формирования вторичных аэрозолей (Schobesberger *et al.*, 2014), которое является важным региональным явлением в окружающей среде бореального региона (Kulmala *et al.*, 2004). Работа в камере Института Пауля Шеррера выявила важность органических паров в процессе кластеризации. Лабораторные эксперименты, имеющие отношение к РЕЕХ, осуществляются также в России и Китае.

Комплексные исследования аэрозолей, образовавшихся в результате горения биомассы, осуществляются в контролируемых условиях в Большой аэрозольной камере (1800 м³) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). Камера оборудована современными устройствами измерения и определения оптико-

микрофизических характеристик, связанных с излучением, таких как коэффициенты рассеяния аэрозолей, массовая концентрация аэрозолей и сажи, фракция сажи, единичное рассеяние альbedo в видимой области, распределение частиц по размерам. Камера также оборудована для взятия проб аэрозольных частиц с фильтров и металлических основ для последующего гравиметрического определения PM10/PM2.5 и для химического анализа аэрозолей, образовавшихся в результате горения биомассы.

Распределение по размерам частиц дыма и его комплексный показатель преломления, параметры Ангстрема по рассеянию и поглощению, единичное рассеяние альbedo и факторы эмиссии аэрозолей определенного размера изучаются с помощью методов поляризационной спектронейелометрии рассеянного излучения, аеталометрии, фотоэлектрического счётчика частиц и весового анализа. Комплексная характеристика физико-химических свойств аэрозолей, образовавшихся в результате горения, включает морфологию, химический состав, химию поверхности, содержание углерода и ионов, содержание органического углерода/элементарного углерода и измерение концентраций органических/неорганических и выбранных органических соединений (левоглюкозан, mannosan и двухосновные карбоновые кислоты). Для осуществления характеристики предлагается использовать сканирующую электронную микроскопию совместно с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией, инфракрасной спектроскопией с преобразованием Фурье, капиллярным электрофорезом, термо-оптическими методами и хроматографией.

Основные процессы горения биомассы в сибирских бореальных лесах – это тление и открытый огонь. Для моделирования различных свойств эмиссий аэрозолей в зависимости от типа топлива (сосна, валежник, др.) необходимо учитывать смещение аэрозолей, получаемых в результате двух разных типов горения, условий горения и «старения» в атмосфере. Особое внимание необходимо для идентификации микрофизических, морфологических и химических микро-маркеров аэрозолей, образовавшихся в результате природных пожаров в бореальных лесах Сибири. Характеризация отдельных частиц совместно с анализом групп позволяет давать количественную оценку структуры дыма и основных типов частиц с целью выявления отличий горения различных типов биомассы и определения морфологических и химических микро-маркеров.

Фракция сажи, единичное рассеяние альbedo, факторы эмиссий, отношение органического углерода к элементарному (OC/EC), ионный состав, молекулярные маркеры (ангидросахара) аэрозолей, образовавшихся в результате горения, в значительной степени зависят от фазы горения. Самые большие объемы эмиссий органики и левоглюкозана происходят во время фазы тления. Оптические и химические профили основных компонент твердых примесей должны быть получены для оценки влияния горения биомассы в Сибири на загрязнение атмосферы и для оценки системы аэрозоль/климат в целом.

4.4 ГАРМОНИЗИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ ДАННЫХ



Рисунок 64 Мультиплатформенные измерения РЕЕХ обеспечивают важные данные о поведении системы Земли

В ходе программы РЕЕХ будет получено большое количество данных измерений, научных публикаций, описаний методов и результатов моделирования (рис.64). План продукта данных РЕЕХ строится на создании постоянных интегрированных платформ РЕЕХ, фиксирующих изменения различных компонентов экосистемы (атмосферных, наземных, морских), и использовании самых современных методик управления, включая автоматическую передачу данных непосредственно с измерительных станций, обработку данных, контроль качества и конвертацию в форматы удобные для международных пользователей и хранения. Данные РЕЕХ будут гармонизованы с международными измерительными системами и форматами данных на основе сотрудничества с существующими инфраструктурными проектами по Арктике и бореальным зонам. Последовательная и скоординированная программа наблюдений в арктическо-бореальных регионах должна быть построена на сотрудничестве с существующими там станциями и сетями.

4.4.1 ОБЩИЕ ПРОДУКТЫ И ФОРМАТЫ ДАННЫХ

Организация баз данных, продуктов данных и форматов будет проводиться в сотрудничестве с текущими совместными европейскими, китайскими, российскими и американскими проектами. Разработка площадок, оснащенных измерительной аппаратурой, не является простой задачей и потребует не только технических знаний лучших методик измерения, но и параллельного развития управления данными для задействования научного потенциала собранных данных. Управление данными охватывает все аспекты, облегчающие использование данных пользователями, начиная от хранения данных и заканчивая доступом к необработанным и обработанным данным, а также к продуктам данных. В этой связи сообществам пользователей необходимы стандартизированные продукты данных. Таким образом, РЕЕХ должен создать порталы данных, инструменты автоматической обработки данных в реальном времени, алгоритмы восстановления данных и пользовательский интерфейс, облегчающий использование данных, а в долгосрочном периоде способствующий увеличению количества пользователей. Наиболее соответствующие проекты 2013-2020 связаны с текущими проектами EU-FP7 и H2020 - или через отдельные исследовательские инфраструктуры, или через проект FP7-ENVRI «Общие операции экологической исследовательской инфраструктуры» в Европе (совместная работа Экологического кластера ESFRI

по разработке общих электронно-научных компонентов и сервисов для своих объектов), а также через европейско-американский проект FP7-COOPEUS «Трансатлантическое сотрудничество в области экологической исследовательской инфраструктуры». Целью таких проектов по исследовательской инфраструктуре является определение удобных для пользователя структур и форматов данных следующего поколения, которые обеспечат междоменный и мультидисциплинарный подход, характерный для РЕЕХ. Ключевыми институтами в Европе являются те, которые располагают центрами по обработке и хранению данных, такие как Норвежский институт исследования атмосферы, NILU (Норвегия), где в настоящее время хранится и распространяется большая часть соответствующих массивов данных/продуктов по атмосфере, или различные компоненты Мировых центров по обработке и хранению данных программы WMO-GAW (WMO-GAW, 2014).

Сеть РЕЕХ будет использовать имеющиеся знания о рекомендациях WMO-GAW и указаниях для создания долгосрочных, стандартизированных форматов данных и сетевых систем. Глобальная система наблюдения Земли (GEOSS) связывает РЕЕХ с деятельностью, направленной на холодные регионы, Межправительственной группы наблюдения Земли (GEO). В настоящий момент РЕЕХ значится среди других международных программ и глобальных исследовательских инфраструктур, содействующих координации данных по Арктике для холодных регионов, таких как ASTRIS2, ICOS, SAON, SIOS, INTERACT, ABDS-ABA/CAFF и CRYOCLIM. Кроме того, инициатива Future Earth повысит международную узнаваемость сети РЕЕХ и откроет возможности для офиса РЕЕХ действовать в качестве регионального центра Future Earth в Арктическо-бореальной зоне.

Список примеров данных наблюдений in-situ, предоставленных инфраструктурами РЕЕХ, в связи со спутниковыми наблюдениями:

Концентрации короткоживущих загрязняющих веществ и концентрации парниковых газов в воздухе и биосфере, а также их осаждение на растительность, снег и лед.

Сезонная эволюция снега и льда на суше и в океане

Поверхностное коротковолновое и длинноволновое излучение и потоки тепла между ключевыми категориями

Альbedo поверхности

Свойства облаков, полученные с помощью активного дистанционного зондирования и дополненные спутниковыми наблюдениями

Структура пограничных слоев и вертикальные профили газов, аэрозолей и облаков

Пространственная изменчивость соответствующих метеорологических переменных

Функционирование экосистем, напр. первичная продуктивность, испарение и эффективность использования воды, почвенный газообмен, циркуляция нутриентов

Образование и обмен, например, летучих органических соединений, метана и оксида азота между экосистемами и атмосферой

Фенология растительности, продолжительность периода роста

Хронологическая последовательность различных возмущений, таких как лесные пожары

Миграция популяций (птиц, насекомых, млекопитающих, растений), вымирание видов, появление инвазивных видов

Переход лесистой местности в луга/тундру и обратно, продвижение границы древесной растительности к более высоким и северным широтам

4.5 ИНФРАСТРУКТУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА

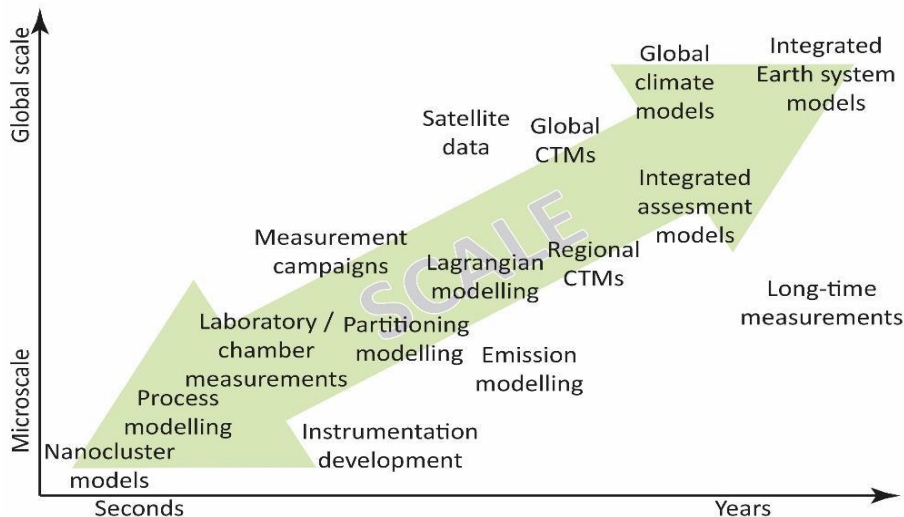


Рисунок 65 Временные и пространственные масштабы моделирования и наблюдений в рамках РЕЕХ. Kulmala et al., 2009.

Модельная платформа РЕЕХ характеризуется комплексным интегрированным подходом к моделированию системы Земли в сочетании с моделями отдельных процессов и элементов системы в различных временных и пространственных масштабах. РЕЕХ использует согласованный подход при объединении результатов моделирования, полученных из разных моделей, от различных участников и стран. РЕЕХ задействует весь потенциал иерархии моделей: анализ сценариев, обратное моделирование, моделирование, основанное на задачах и процессах измерения (рис.65). Модели проверяются данными дистанционного зондирования и данными *in situ* различных временных и пространственных масштабов с использованием включения данных и нисходящего моделирования. Анализ больших объемов данных, полученных от моделей РЕЕХ и сенсоров, будет поддержан специально разработанной виртуальной исследовательской средой.

Для целей поддержки наблюдательной системы и решения научных вопросов в рамках РЕЕХ требуется создание иерархии/аппарата современных многомасштабных моделей для различных элементов системы Земли, интегрированных с системой наблюдения.

Одной из ключевых тем международных дискуссий в контексте изменения климата является Моделирование Системы Земли (ESM). При этом важно знать правильно ли компоненты ESM отражают картину функционирования Земли. ESM состоят из уравнений, описывающих процессы в атмосфере, океане и криосфере, а также в наземных и морских биосферах. ESM является наилучшим инструментом анализа воздействия различных изменений окружающей среды на будущий климат и комплексного изучения роли различных процессов в Системе Земли. Такие типы анализа и прогнозирования изменений особенно важны для высоких широт Арктики, где изменение климата происходит с наибольшей скоростью и где приповерхностное потепление в последние десятилетия почти в два раза превышает среднемировое значение.

Процессы, и, следовательно, параметризация в Моделях систем Земли (ESM) до сих пор основываются на недостаточных знаниях физических, химических и биологических механизмов климатической системы, пространственное и временное разрешение известных процессов часто недостаточно. Моделирование взаимодействий суша-атмосфера-океан в глобальном масштабе с

использованием ESM позволяет исследовать влияние изменяющихся пространственного и временного факторов системы суши на климат. Существует недостаток механизмов эффективного продвижения необходимого понимания процессов к ESM и соединения их с процессом принятия решений. Арктическо-бореальная область играет значительную роль в качестве источника естественных и антропогенных парниковых газов, аэрозолей и других эмиссий в системе Земли.

Необходима сеть станций мониторинга с возможностью количественного определения взаимосвязей между соседними областями на территории от Арктики и Средиземноморья до промышленных районов Китая и азиатских степей. Например, помимо развития российских станций в зоне действия РЕЕХ, необходимо наладить сотрудничество с другими исследовательскими инфраструктурами (сети ACTRIS и ICOS) с целью получения глобальной панорамы переноса эмиссий, а также трансформации и старения загрязняющих веществ, входящих и выходящих из зоны РЕЕХ.

Чтобы справиться с растущим объемом данных об окружающей среде региона исследования РЕЕХ и об окружающей среде в мире требуется создание Виртуальной исследовательской среды (VRE). Это позволит исследователям обрабатывать структурированные и качественные данные в своих виртуальных кабинетах. VRE должна объединить данные, сети и вычислительные ресурсы для обеспечения понимания научным сообществом происходящих и возможных климатических изменений и их последствий в исследуемом регионе.

4.5.1 МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЗЕМЛИ

Существует критика, что процессы, и, следовательно, параметризация в Моделях системы Земли (ESM) основываются на недостаточных знаниях физических, химических и биологических механизмов климатической системы, и что пространственное и временное разрешение известных процессов недостаточно. Существует недостаток механизмов эффективного продвижения необходимого понимания процессов к ESM. В рамках РЕЕХ мы занимаемся этой проблемой.

Целью модельной платформы РЕЕХ является моделирование и прогнозирование физических аспектов системы Земли и усовершенствование понимания биогеохимических циклов как в сфере РЕЕХ, так и вне ее. Изменение окружающей среды в регионе, если рассматривать с точки зрения атмосферного потока, подразумевает изменение характеристик нижней границы. Это важно для таких каждодневных применений как прогноз погоды. Инфраструктура РЕЕХ представит свою точку зрения на физические свойства поверхности Земли, что может быть использовано для усовершенствования моделирования и прогностических моделей. Это принесет прямую выгоду жителям Севера, например, в виде усовершенствованного раннего оповещения об опасных явлениях. В долгосрочных масштабах модели биогеохимических циклов в сфере РЕЕХ нуждаются в поддержке со стороны новой инфраструктуры мониторинга для улучшения измерения и количественной оценки свойств почвы и растительности.

В самой базовой установке EMS, глобальные циркуляционные модели (GCMs) атмосферы и океана связаны друг с другом, у них общие, например, потоки импульса, водяной пар и CO₂. Традиционно,

суша была частью атмосферной модели, но в большинстве современных моделей ESM, модель суши выделена отдельно. В большинстве случаев GCMs дополняются подмоделями, охватывающими, например, атмосферную химию и аэрозоли, биогеохимию или динамику растительности. Хотя модели могут сообщаться друг с другом напрямую, обычно используется отдельный механизм связи между различными подмоделями.

Оценка моделей процессов для усовершенствования параметризации GCM

Одной из наиболее важных задач моделирования РЕЕХ является оценка моделей процесса взаимодействия биосфера-криосфера-атмосфера в Пан-Евразийском регионе и усовершенствование параметризации GCM. Научный план РЕЕХ должен стать цепочкой исследований, углубляющих наши знания о климате и качестве воздуха посредством серии взаимосвязанных процессов разного масштаба, начиная с молекулярного уровня и заканчивая региональным и глобальным. Временной масштаб цепочки исследований простирается от наносекунд до столетий или даже до геологических масштабов времени через анализ фирна и керн лда в ледниках и ледовом щите, что помогает выявить прошлые изменения климата в Пан-Евразийском регионе и соответствующие факторы воздействия.

Для диагностики, мониторинга и прогнозирования загрязнения воздуха в Сибири и Евразии будет применена комбинация прямого и обратного моделирования (Penenko et al., 2012). Региональные модели, объединенные с глобальными, посредством метода ортогональной декомпозиции позволяют представить данные о глобальных процессах на региональном уровне, где применяются стратегии экологического контроля качества (Baklanov et al., 2008).

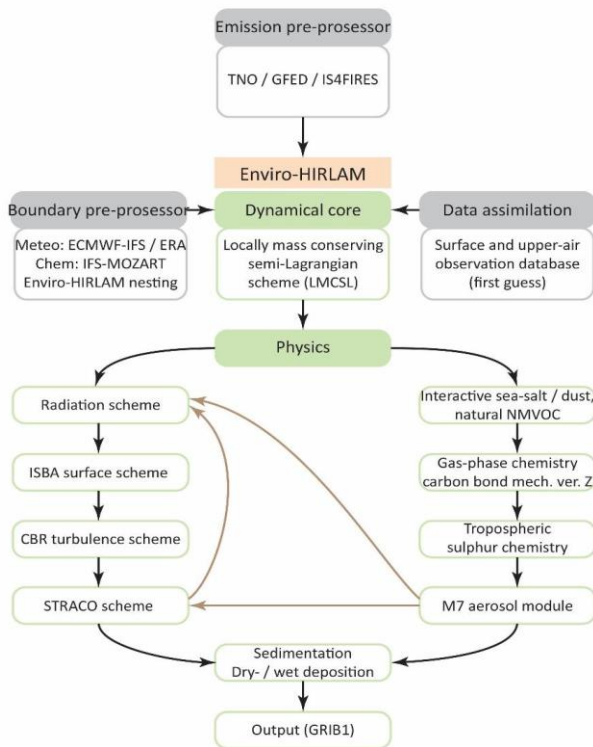


Рисунок 66 Концепция «одной атмосферы», представленная как двустороннее взаимодействие метеорологических и химических процессов. Она также выражает стратегию РЕЕХ для нового поколения интегрированных систем моделирования взаимосвязи химия-климат для прогнозирования состава атмосферы, метеорологии и изменения климата. Изображение адаптировано из Nuterman et al. (2013).

Недавно была разработана новая концепция и методология атмосферного моделирования, названная «Одна атмосфера» (рис.66). В данном случае атмосферное моделирование выполняется с учетом двустороннего взаимодействия метеорологических и химических процессов (Baklanov et al., 2011; Zhang et al., 2012). Модели атмосферного переноса химических веществ должны включать не только загрязняющие вещества, воздействующие на здоровье (компоненты качества воздуха), но также парниковые газы и аэрозоли, воздействующие на климат, метеорологические процессы и т.п. Этот подход должен использоваться при разработке нового поколения интегрированных систем моделирования взаимосвязи химии и климата для прогнозирования состава атмосферы, метеорологии и изменения климата. Оперативная интеграция метеорологических/климатических моделей и моделей атмосферного переноса аэрозолей и химических веществ дает возможность использовать все метеорологические 3D поля в каждый промежуток времени и рассматривать связь загрязнения воздуха (напр., аэрозоли) с метеорологическими процессами и климатическими факторами, а затем с химическим составом атмосферы (рис.66). Этот очень перспективный путь развития будущих систем атмосферного моделирования (как часть и как шаг к Системам моделирования Земли) будет рассмотрен в РЕЕХ. Это приведет к созданию моделей нового поколения для климатического, метеорологического, экологического прогнозирования и прогнозирования химического загрязнения атмосферы (EUMETCHEM, 2012: <http://www.eumetchem.info>) и обеспеченности инструментами для оценки экологических рисков и оптимизации стратегии.

Научные вопросы, интегрированный подход ESM.

Как можно описать реакцию эмиссий BVOC на изменения химии атмосферы и соответствующие воздействия на растительность (воздействие CO₂, введение озона, зависимость от азота), учитывая фенологическое и физиологическое состояние растений, а также непосредственные климатические условия?

Как можно количественно описать депонирование загрязнителей воздуха (т.е. озона) растительностью и как четко разграничить устьичное и неустыичное депонирование (включая химическое депонирование эмиссиями БЛОС, воздействие озона на устьица)?

4.5.2 СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Социально-экономическое развитие Пан-Евразийского региона зависит от ряда глобальных и макроэкономических процессов, таких как развитие мирового производства и потребления энергии, национального и глобального спроса на природные ресурсы, специфики национальной политики по развитию северных территорий и политики относительно малых народов. Изменение климата будет играть существенную роль в общих социально-экономических прогнозах и оценках наряду с существующей климатической политикой, которая уже оказывает влияние на экономическое развитие. Региональная динамика постсоветского периода характеризовалась многими негативными социальными тенденциями и процессами, такими как существенная миграция населения из северных регионов, упадок тысяч таежных поселений из-за краха советской

лесохозяйственной индустрии, нарушение транспортных связей, существенное ухудшение работы социальных сфер, включая медицину, образование и снабжение товарами первой необходимости, особенно в отдаленных областях.

Важной предпосылкой социально-экономического развития региона, особенно в высоких широтах, является переход к устойчивому развитию, целью которого является создание приемлемых стандартов жизни людей, сохранение экологии и стабильности биосферы в регионе. В России этот переход заявлен как отправная точка национальной и региональной политики управления природными ресурсами. Однако подобные заявления не всегда соответствуют действительности (Skryzhevskaya et al., 2015; Tynkkynen, 2007; 2010). Экологическую ситуацию в крупных регионах Северной Евразии можно охарактеризовать как продолжающийся тяжелый экологический кризис, начавшийся вследствие нерегулируемого антропогенного воздействия на природу и бурного роста производства и транспортировки природных ресурсов, в основном, ископаемого топлива. Все это приводит к снижению качества основных компонентов окружающей среды – воздуха, воды, почвы и растительности, и возникновению многих рисков. Пан-Евразийский регион является одним из наиболее уязвимых в мире.

Учитывая сложный и неопределенный характер прогнозов социально-экономического развития региона, основным инструментом моделирования в ходе РЭЭХ станет интегрированное моделирование (рис.67). Интегрированное моделирование способно рассматривать проблемы различной природы – экономической, экологической и социальной. Одним из планируемых направлений является использование интегрированных кластеров, таких как интегрированный модельный кластер ESM ИААА (http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Ecosystems_ServicesandManagement/Integrated-Model-Approach.en.html). Этот кластер объединяет различные модели: экономическую модель GLOBIOM (Havlik et al., 2011), лесную специализированную модель G4M (Rametsteiner et al., 2007), сельскохозяйственную модель EPIС (Izaurradle et al., 2006) и другие, которые объединяются в общую структуру моделирования. Кластер ESM можно будет модифицировать и адаптировать для условий и проблем регионов.

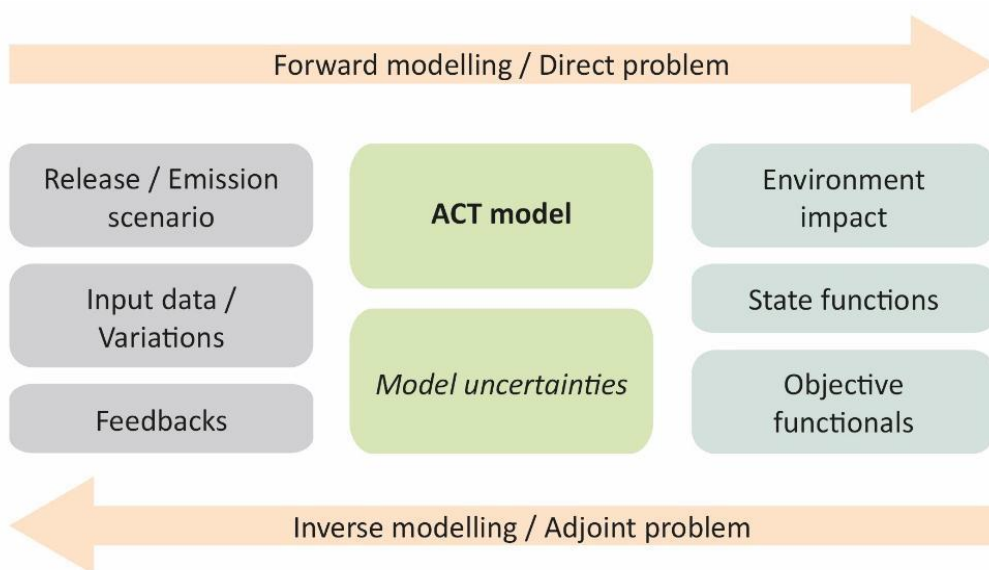


Рисунок 67 Схема оценки экологического риска и оптимизации стратегии ослабления негативных последствий на основании прямого/обратного моделирования. Модели АСТ – это модели атмосферного переноса химических веществ. Изображение из Baklanov et al. (2012).

Другой перспективный подход к моделированию связан с совместным применением агентского и потокового моделирования в анализе обобщенной системы земли. В сущности, агентская модель учитывает набор индивидуальных неоднородных блоков принятия решений, именуемых агентами, которые рассматривают свои опции в соответствующей среде и формируют решения на основании заранее определенного набора правил. Агенты находятся под влиянием различных внутренних и внешних факторов, поэтому могут быть изучены несколько различных сценариев. Моделирование с использованием фактических опций будет задействовано для исследования воздействия неопределенности, появляющейся вследствие недостатка информации. По вопросам, связанным со стратегиями ослабления негативных последствий и адаптации к ним, и с целью лучшего понимания, как происходят эти политические процессы и как им содействовать, будут использованы различные методы общественных наук, включая совместную работу с заинтересованными сторонами.

4.5.3 ВИРТУАЛЬНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СРЕДА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объемы архивов данных по окружающей среде постоянно растут благодаря последним разработкам в области моделирования, высокопроизводительных компьютеров и измерительной аппаратуры. Это делает невозможным всесторонний анализ этих данных с использованием обычных вычислительных средств и программного обеспечения для хранения и обработки данных. Для решения этой задачи требуется создание виртуальной исследовательской среды (VRE), которая обеспечит интегрированный доступ к источникам данных, инструментам и службам между дисциплинами и сообществами пользователей. VRE позволит исследователям обрабатывать структурированные и качественные данные в личных виртуальных кабинетах (de Roure and Goble, 2007). Тематическая VRE должна объединить данные, сети и вычислительные ресурсы для обеспечения глубокого понимания научным сообществом происходящих и возможных климатических изменений и их последствий.

Первые шаги по развитию элементов VRE домена РЕЕХ, нацеленных на региональный климатический и экологический мониторинг и моделирование, а также на поддержку образования, были сделаны в процессе проекта FP6 EC ENVIRO-RISKS (Baklanov and Gordov, 2007). Была разработана и запущена интерактивная веб-система для региональной климатической оценки на базе архивов метеорологических данных (<http://climate.risks.scert.ru>) (рис.68). На этой основе была разработана экспериментальная программная и аппаратная платформа «Климат», нацеленная на интегрированный анализ разнородных данных, имеющих привязку к местности (<http://climate.scert.ru>; Gordov *et al.*, 2013). Она может быть использована как прототип элемента виртуальной среды РЕЕХ и как испытательный стенд для подхода VRE. В настоящий момент этот элемент VRE доступен через геопортал (<http://climate.scert.ru>). VRE обобщает модели WRF и «Planet Simulator» с помощью повторного анализа и данных инструментальных измерений, а также поддерживает глубокий статистический анализ хранящихся и моделируемых по запросу данных. На основе VRE можно запускать интегрированные модели, осуществлять предварительную обработку результатов моделирования, используя модули обработки числовых данных, анализировать и визуализировать полученные результаты. Недавно к набору инструментов статистического анализа

был добавлен новый функционал, направленный на детальное изучение климатических экстремальных явлений в Северной Азии. Также виртуальная среда предлагает тематические образовательные курсы для студентов и аспирантов (Gordova et al., 2013). Элемент VRE «Климат» обеспечивает ученых, занимающихся мультидисциплинарными научными проектами, надежными и практичными инструментами для комплексного изучения изменений климата и экосистем в глобальном и региональном масштабах. С его помощью даже не имеющие опыта программирования пользователи смогут обрабатывать и визуализировать многомерные данные наблюдений и моделирования, используя унифицированный интерфейс.

Виртуальная исследовательская среда РЕЕХ должна объединить различные распределенные хранилища данных, системы обработки и анализа и набор моделей сложных климатических и экологических процессов, обрабатываемых на суперкомпьютерах. Инструменты VRE должны быть нацелены на воспроизведение в высоком разрешении текущих климатических процессов, происходящих в северной Евразии, и на надежные прогнозы их динамики в рамках выбранных сценариев.

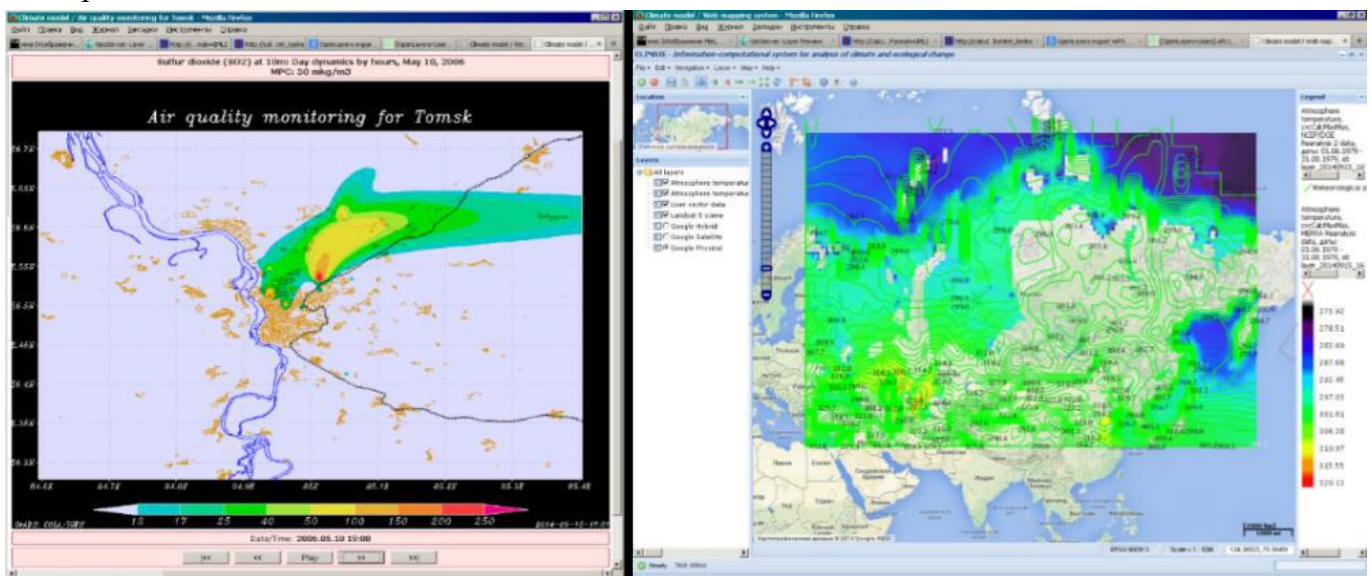


Рисунок 68 Веб-портал ENVIRO-RISKS (<http://climate.risks.scert.ru/>), обеспечивающий доступ к интерактивной системе для оценки регионального климата и окружающей среды на основе метеорологических данных и данных по качеству воздуха (концентрация диоксида серы; Томск, Россия), (слева). Справа, пример пользовательского интерфейса платформы «Климат», обеспечивающей поддержку мультидисциплинарного регионального изучения наук о Земле и окружающей среде. Изображения Evgeny Gordov SCERT/IMCES SB RAS.

Учитывая многообразие и комплексный характер исследований, которые планируется провести в ходе РЕЕХ, важно иметь твердую геопривязанную основу, содержащую всю доступную накопленную информацию, например, по ландшафтам, наземным экосистемам, водоемам, биологической продуктивности биосферы и ее взаимодействие с нижней тропосферой. Такой базис будет реализован в виде Комплексной системы информации о земельных ресурсах (ILIS) для северной Евразии (Schepaschenko et al. 2011) как многослойная географическая информационная система (ГИС) с соответствующими атрибутивными базами данных. Геопривязанная основа ILIS представлена гибридной базой данных о почвенно-растительном покрове, она разработана с использованием мультисенсорного дистанционного зондирования и всей доступной наземной информации (учет лесов и земель, мониторинг возмущений, верифицированные данные официальной статистики, изменения in situ и т.п.). Основное разрешение ILIS – 1 км². Для регионов

с быстрыми изменениями почвенно-растительного покрова может использоваться лучшее разрешение. Первоначальная версия ILIS будет разработана на основе данных 2011г. Планируется использовать ILIS: (i) для внедрения унифицированной системы классификации и количественного описания экосистем и ландшафтов; (ii) как критерий для отслеживания динамики землепользования и почвенно-растительного покрова; (iii) для эмпирической оценки исследуемых потоков (NO₂, CH₄, VOC, NO_x, аэрозолей, и т.п.); (iv) для использования в различных моделях и для валидации моделей; (v) для получения градиентов для масштабирования данных наблюдений в точке.

Методология мультidisциплинарных оценок возможных экологических рисков и уязвимости, проработанная в проектах Arcticrisk-Narp и FP6 ENVIRO-RISKS (Baklanov *et al.*, 2006a,b; Mahura *et al.*, 2005; 2008), может быть оптимизирована и применена как веб-инструмент оценки возможных воздействий опасных явлений и изменений окружающей среды на экосистемы и население в регионе исследования РЕЕХ. Компоненты ГИС и Google-Earth такого инструмента могли бы использоваться для дальнейшего улучшения визуализации и анализа результатов. Используя этот веб-инструмент, может быть осуществлено краткосрочное и долгосрочное моделирование (от дня до года) с просчитыванием траектории и распространения для выстраивания показателей возможного воздействия, например, постоянных эмиссий, случайных выбросов, планового строительства и работ для выбранных участков местности. Моделирование может включать такие факторы, как пути атмосферного переноса, обтекание воздушным потоком, максимальные расстояния достижения, быстрый перенос, факторы влажности, интегрированные по времени концентрации в атмосфере, схемы сухого, влажного и общего осаждения и т.д. Результаты моделирования можно применять в качестве исходной информации для дальнейшей оценки доз, воздействий, рисков, краткосрочных и долгосрочных воздействий потенциальных источников эмиссий на население и окружающую среду. Оценка рисков и составление карт будет важно в процессе принятия решений и для анализа экологических, социальных и экономических последствий для разных географических зон и различных групп населения. Этот анализ должен принимать во внимание все соответствующие социально-геофизические факторы и вероятности, а также использовать базы демографических и административных данных. Все это должно быть доступно через веб-портал, разрабатываемый в рамках РЕЕХ.

5. ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕЕХ НА ОБЩЕСТВО (F3)

Существует несколько способов развития социального аспекта в рамках РЕЕХ, эта работа будет строиться на основе взаимодействия с научной повесткой РЕЕХ (F1), планами по инфраструктуре РЕЕХ (F2), а также деятельностью в сфере образования и передачи знаний (F4). Стратегия имеет два направления. Во-первых, при формулировке исследовательских вопросов научной повестки будет уделено внимание социальным нуждам региона исследования РЕЕХ, как это уже было сделано в этом научном плане. Дальнейшие исследования этого аспекта будут проведены, когда конкретные научные проекты будут запущены в рамках РЕЕХ. Это в особой степени относится к исследовательским вопросам по антропогенной системе. Во-вторых, социальный аспект принимается во внимание при обращении к нуждам, связанным с исследовательской инфраструктурой и ролью социальных партнеров в этом. Здесь могут быть применены интерактивные методы, начиная от семинаров с заинтересованными лицами до исследования, предполагающего непосредственное участие этих лиц. Соответственно РЕЕХ будет выступать в качестве испытательной лаборатории для совместных разработок. Изучение и разработка этих вопросов будут продолжены в дальнейшем после реализации научного плана РЕЕХ.

5.1 КЛИМАТ: СМЯГЧЕНИЕ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ И АДАПТАЦИЯ К НИМ

Смягчение отрицательных последствий эмиссий парниковых газов и адаптация к последствиям изменения климата являются двумя основными направлениями социальной реакции на изменение климата. Меры по смягчению негативных последствий включают способы производства и потребления энергии, в то время как меры по адаптации позволяют избегать риски и уязвимость, связанные с последствиями изменения климата насколько это возможно. Оба направления включают изменения в энергетических системах, сельском хозяйстве, урбанизированных средах и лесном хозяйстве. Это основные сектора, в рамках которых должны быть приняты во внимание меры по смягчению негативных последствий и адаптации к ним. Кроме того, важно понять и проанализировать взаимосвязь между адаптацией и смягчением негативных последствий. Некоторые из ключевых вопросов, рассмотренных в докладе IPCC 2007: Каков оптимальный объем деятельности по адаптации и смягчению негативных последствий? Когда эта деятельность должна быть выполнена, и как следует комбинировать эти два направления? Могут ли адаптация и смягчение негативных последствий заменить друг друга, или они дополняют друг друга? Каков потенциал для создания синергии между ними? Как с течением времени меняется их стоимость и эффективность? Пятый оценочный доклад IPCC отмечает, что в ближайшие годы необходимо избежать компромиссов и выявить синергию между смягчением негативных последствий и адаптацией к ним. Также необходимо разработать институциональные связи и внедрить вопросы смягчения негативных последствий и адаптации в более широкий круг политики устойчивого развития (Denton *et al.*, 2014).

5.1.1 СМЯГЧЕНИЕ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ И ВЛИЯНИЕ НА ОБЩЕСТВО

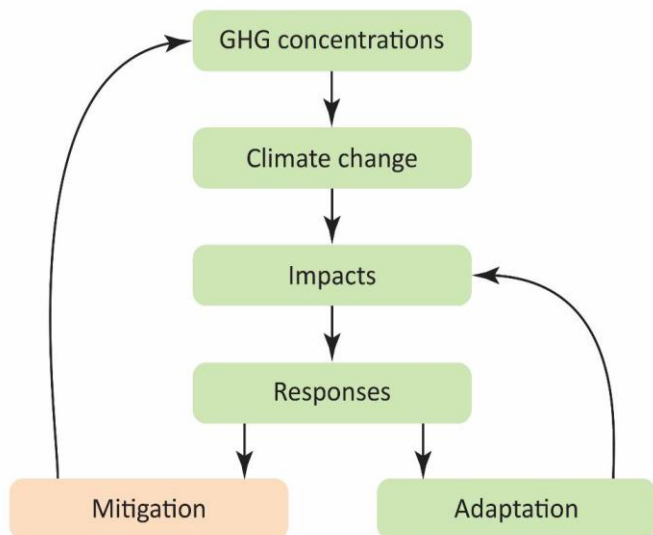


Рисунок 69 Смягчение негативных последствий понимается как деятельность по охране природы от общества (Stehr et al., 2005).

СИНОПСИС Основной целью планов и стратегий по ослаблению негативных последствий изменения климата является построение общества, заботящегося о чистоте окружающей среды в арктическо-бореальном регионе. Необходимо принятие мер по стабилизации и снижению эмиссий парниковых газов от сельского и лесного хозяйства, производства энергии и промышленного производства. Для стабилизации уровня парниковых газов нужно разработать новые технологии, управленческие практики и городское планирование, необходимо расширять использование возобновляемых источников энергии (таких как, ветер). Более того, для защиты природных накопителей углерода необходимы меры по землепользованию, связанные с сельским и лесным хозяйством, а также охраной экосистем океана.

РЕЕХ обращается к следующим основным темам смягчения негативных последствий

Производство энергии, энергоэффективность и промышленное производство

Производственная деятельность такая как, например, производство энергии и промышленное производство являются основными видами антропогенной деятельности, воздействующими на изменения окружающей среды. Основными последствиями такой деятельности на окружающую среду является загрязнение, изменение землепользования, интенсивное использование природных ресурсов. Но все же производственная деятельность является жизненно важной частью экономики и современного общества. Одной из задач грядущих десятилетий является оптимизация производственной деятельности с целью минимизации ее воздействия на окружающую среду без снижения производительности. РЕЕХ внесет свой вклад в решение этой проблемы путем изучения взаимосвязей между антропогенной деятельностью и окружающей средой. В ходе РЕЕХ будут проводиться локальные исследования связей между экосистемами и промышленной инфраструктурой с целью создания эффективной модели такого взаимодействия, что является необходимым шагом для оптимизации присутствия человека в окружающей среде. Повышение энергоэффективности, а также повышение использования возобновляемых источников энергии подразумевает сбережение ограниченных энергоресурсов, снижение нагрузки на окружающую

среду, поддержку обмена технологиями и продвижение технологических инноваций. Практическая реализация может задействовать схемы, учитывающие изменения в области политики (ref. ПАСА).

Север и восток России очень перспективны по минеральным ресурсам. Ресурсное ориентирование экономики этих регионов России в постсоветский период возросло под влиянием увеличившегося спроса. Сектор экономики по освоению природных ресурсов (добыча полезных ископаемых и лесное хозяйство) будет превалировать на большинстве этих территорий и в следующие десятилетия. Но остаются серьезные социально-экономические проблемы. В постсоветский период доминирующими в процессе принятия решений на уровне предприятий и федерального/региональных правительств стали критерии доходности, а критерии социальной ответственности и экологические критерии не применялись. В результате чего в районах добычи и обработки ресурсов местное население столкнулось с серьезными экологическими проблемами. Существует также социально-экологические противоречия между промышленной разработкой природных ресурсов и традиционными формами природопользования (например, разведение северных оленей). Процессы, направленные на снижение негативных последствий использования ресурсов, малоэффективны, так как налоговые сборы от добывающей промышленности поступают практически целиком в федеральный бюджет, минуя бюджеты местного уровня. Следовательно, местные власти не могут направить достаточные средства на программы по социальной защите и охране окружающей среды.

Координация управления водными ресурсами и эксплуатации экосистем

Для оптимизации взаимодействия между промышленной инфраструктурой и окружающей средой требуется контроль и координация. Координация управления водными ресурсами и эксплуатации экосистем важна как для поддержания экономического роста, так и для предотвращения дестабилизации окружающей среды. В северной Евразии находятся огромные запасы водных ресурсов и экосистемы (в частности, крупнейшая экосистема на планете - бореальный лес, включая сибирскую тайгу), которые действуют как важные компоненты глобального механизма биотической регуляции. Весьма вероятно, что они будут подвержены значительному риску. Только на севере Сибири в замороженном грунте содержится до 900 Пг углерода. Потепление и таяние многолетней мерзлоты могут оказать разрушительное воздействие на систему Земли, сохранение бореальных лесов, жизнь малых народов и иметь тяжелые последствия для национальной и глобальной экономик. Осмысление взаимодействий между компонентами системы Земли при текущих и будущих гидрологических режимах, динамикой многолетней мерзлоты и функционированием арктических и бореальных экосистем является неперенным условием грамотного социально-экономического развития этих огромных территорий. Разработка сбалансированных рекомендаций по переходу к устойчивому управлению водными ресурсами и экосистемами в Евразии имеет ключевое значение для стратегического планирования, и станет перспективной исследовательской задачей системного анализа.

Городское планирование и проектирование

Городские территории значительно влияют на изменение климата посредством эмиссий парниковых газов и аэрозольных частиц. Потенциал снижения эмиссий на городских территориях велик, и многие города уже достигли успеха в этом, следуя экологическим проектам. Повестка

научных исследований РЕЕХ в городском контексте сосредоточена на определении наилучших стратегий снижения эмиссий парниковых газов с учетом взаимодействий между землепользованием и атмосферой, также рассматривается взаимодействие загрязнение-климат.

Например, в настоящее время в России при территориальном и городском планировании почти не учитываются результаты научно-исследовательских работ и прогнозов возможного будущего изменения климата и опасных явлений. Общего плана территориального развития в России не существует. В то же время имеется значительный объем географической информации, которую можно внедрить в междисциплинарные исследования для целей городского планирования. Программа РЕЕХ должна стать источником достоверных данных для зонирования и городского планирования в арктическом и бореальном регионе Евразии в соответствии с прогнозом на 40 лет.

Евразийские транспортные коридоры

Развитие новых евразийских транспортных коридоров (по суше и Северному морскому пути) может инициировать быстрый рост товарообмена в регионе, повышение занятости, применение технологических инноваций в транспортном и инфраструктурном секторе и привести к экономическому и социальному развитию. Важной исследовательской задачей будет оценка энергоэффективности и социально-экологических последствий новых транспортных коридоров, а также оптимизация будущих транспортных потоков на евразийском и субрегиональном уровнях (Farré *et al.*, 2014).

Защита природных накопителей углерода

Защита природных накопителей углерода заключается в рациональном использовании природных ресурсов, экологической безопасности и новых экологических стандартах жизни человека, защите биоразнообразия и рациональном использовании ресурсов Российских прибрежных зон. Основной задачей здесь является определение практик устойчивого лесопользования и оценка их воздействия на экосистемы.

Геоинжиниринг

Геоинжиниринг и рекультивация являются методами искусственного преобразования окружающей среды, под которым подразумевается техническое удаление загрязняющих веществ, изоляция опасных отходов и использование солнечной радиации. В основном, геоинжиниринг предлагается как еще один вариант нейтрализации последствий изменения климата, он также понимается как дополнительная методика для стратегий ослабления негативных последствий и адаптации к ним (Wigley, 2006). Основная критика геоинженерных методов сводится к нехватке в них контроля и предсказуемости. Современная наука до сих пор не может достичь определенного уровня понимания всех обратных связей компонент системы Земли и не может с уверенностью прогнозировать долгосрочные эффекты таких методов. Как уже отмечалось, мы не можем серьезно предлагать проводить какие-либо геоинженерные работы относительно изменения климата до момента полного понимания своего собственного вклада в эти изменения (Matthews and Turner, 2009). В этом отношении РЕЕХ участвует в изучении технологий геоинжиниринга, предоставляя необходимую информацию по различным взаимодействиям внутри климатической системы.

В наступающие десятилетия возможна разработка и использование технологий геоинжиниринга для противодействия изменению климата. Но прежде чем проводить какие-либо крупномасштабные полевые эксперименты, важно количественно описать и проанализировать их воздействие на чувствительные экосистемы Арктики путем моделирования и создания сценариев. Будущие исследования в рамках научно-исследовательской сферы РЕЕХ будут охватывать такие вопросы, как мягкий геоинжиниринг, а именно различные петли обратной связи, изменения альbedo и т.д.

5.1.2 АДАПТАЦИЯ – КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ

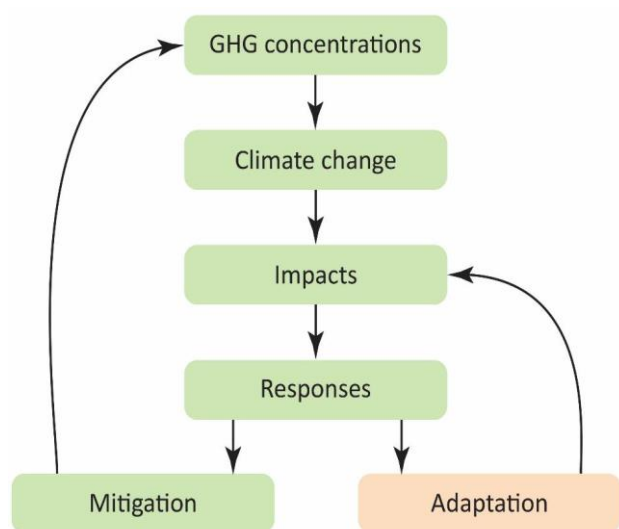


Рисунок 70 Под адаптацией понимается деятельность по защите общества от природы (Stehr et al., 2005).

СИНОПСИС РЕЕХ участвует в разработке плана адаптации, предоставляя научные знания по природным и климатическим процессам с целью оценки объема климатических рисков в будущем. РЕЕХ будет накапливать научные знания о том, как сообщества исследуемых регионов способны адаптироваться к изменениям климата, и что может затруднять эти процессы.

РЕЕХ обращается к следующим основным темам адаптации

Разработка стратегий адаптации - это политический процесс, который требует решений по выбору типа мер для уменьшения рисков и уязвимости к изменению климата. Пятый оценочный доклад рассматривает климатические риски, возникающие из взаимодействия опасных явлений, подверженности им и уязвимости (рис.71). Антропогенное изменение климата и природная изменчивость приводят к появлению опасных явлений, в то время как подверженность воздействию определяется как наличие людей, биологических видов или экосистем, природоохранных функций, служб и ресурсов, инфраструктуры, или экономических, социальных активов, культурного достояния в районах, которые могут значительно пострадать. Уязвимость определяется как предрасположенность к отрицательным воздействиям, согласно с IPCC она включает чувствительность и способность к адаптации. В рамках программы РЕЕХ, главная цель заключается в понимании того, как район зависит от климатических рисков, и что можно сделать, чтобы адаптироваться к ним.

Оценка климатических рисков

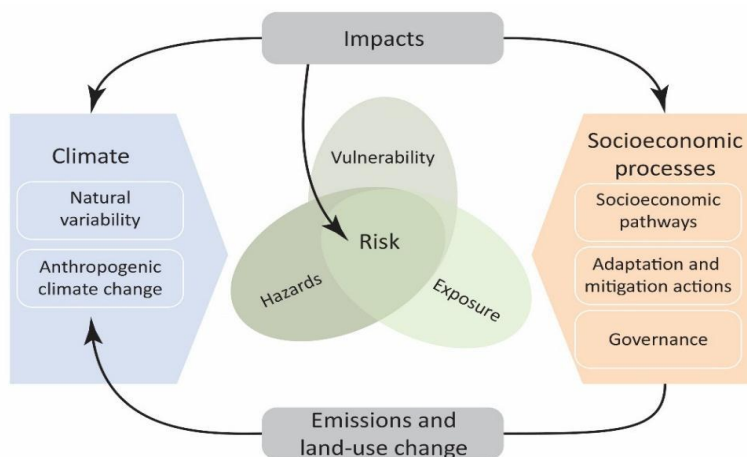


Рисунок 71 Представление климатических рисков на концептуальном уровне. Изображение адаптировано из доклада IPCC, 2014

Изменение климата будет иметь различные последствия в регионе РЕЕХ, но то, как различные опасные явления изменяются от региона к региону, а также подверженность населения и имущества воздействию этих изменений, зависит от местных особенностей и возможностей. Учитывая широкую вариативность условий в регионе РЕЕХ, необходимо разработать методологии для оценки климатических рисков в регионе. Например, существует европейские широкие оценки уязвимости к изменению климата, которые охватывают государства-члены ЕС на региональном уровне (Holsten and Kropp, 2012). Для региона РЕЕХ, внимание будет сосредоточено на двух направлениях: во-первых, на выявлении путей оценки более обширных изменений в регионе в целом и, во-вторых, на выявлении ключевых секторов или географических районов, где могут быть проведены более подробные исследования.

Подверженность воздействию экстремальных погодных явлений

Существует также необходимость оценить, в какой степени возрастет объем экстремальных погодных явлений в регионе РЕЕХ, и какие виды мер по адаптации необходимы. Нужно исследовать, как могут быть улучшены имеющиеся методики оценки этих явлений (Greiving *et al.*, 2006). Экстремальные события в регионе варьируются от штормового нагона воды, оползней до обильных осадков, которые подвергают людей и их имущество опасности. Ключевые исследовательские потребности здесь включают создание связи между методами оценки и экстремальными погодными явлениями, и их последующее связывание с развитием систем раннего предупреждения (см. раздел 5.3.2.)

Устойчивое сельское и лесное хозяйство

Большая часть территорий, используемых под экстенсивное сельское хозяйство в северной части Евразии, находится в России, Украине и Казахстане. Интенсификация сельского хозяйства и применение эффективных сельскохозяйственных технологий в этих зонах могут приумножить результаты сельскохозяйственного сектора в регионе. Совместно с развитием новой евразийской транспортной инфраструктуры, это существенно повысит продовольственную безопасность в

Евразии. Важными темами исследования в области лесного хозяйства являются институциональные сдвиги в российском лесном хозяйстве в 1990-2000 гг. и их воздействие на управление лесами и адаптацию к природным изменениям (Kuzminov, 2011), а также прогноз частоты лесных пожаров вследствие изменения климата и с учетом того, как лесное законодательство влияет на сектор и его способность адаптироваться к меняющемуся климату.

Политика в области адаптации и её реализация

Адаптация может проходить как в рамках долгосрочных структурных изменений в обществе, так и через краткосрочные изменения, связанные с неожиданными потрясениями (IPCC, 2014). В первом случае необходимы долгосрочные политические стратегии, в то время как второй требует таких мер, как создание систем раннего предупреждения, с помощью которых информацию о климатических воздействиях можно внедрять в краткосрочное управление природными и экономическими ресурсами, а также в общественную деятельность. Следовательно, можно выделить плановую адаптацию, которая состоит из мер, принятых государством для снижения уязвимости к изменению климата посредством политических процессов, и саморегулирующуюся адаптацию, при которой различные субъекты, такие как частные компании или отдельные лица, меняют свои методы работы, чтобы уменьшить риски, связанные с изменением климата (IPCC, 2007). Планируемые адаптационные процессы, как правило, осуществляются на национальном уровне, к планированию привлекаются различные министерства. В контексте данной исследовательской программы, адаптация, а также стратегии по смягчению негативных последствий должны быть разработаны для федеральных, региональных и местных органов власти и различных секторов экономики (e.g. Skryzhevskaya et al., 2015). Кроме того, как обсуждалось ранее, должны быть исследованы возможности для комплексных решений по адаптации и смягчению негативных последствий.

Условия жизни северных народов

Оленеводство, речное и морское рыболовство – это основные традиционные отрасли экономики севера и основное занятие кочевых северных народов. Это источник стабильности коренных северных сообществ. Число диких и домашних северных оленей в Сибири в постсоветский период резко уменьшилось (Gray, 2000, Niya and Inoue, 2010, Litvinenko, 2013). Полевые исследования на севере Якутии показали, что наличие питьевой воды (в виде льда зимой) и биотоплива (в основном, дерева), пашня и продуктивность земель, а также характер воспроизводства животных и охоты претерпевают изменения. (Niya and Inoue, 2010). Маршруты миграции диких северных оленей меняются в соответствии с новыми экологическими условиями. По данным спутника MODIS видно, что северные олени передвигаются вдоль рек и через зоны с лучшей растительностью, избегая учащающиеся лесные пожары. Опросы коренных жителей, владельцев домашних оленей показали, что текущее изменение климата не очень сильно нарушило их деятельность, и они способны успешно к ним адаптироваться, но, с другой стороны, серьезное воздействие на них оказали социальные изменения, последовавшие за развалом Советского Союза (http://www.chikyu.ac.jp/rihn_e/project/C-07.html).

5.2 ВЫРАБОТКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ

СИНОПСИС РЕЕХ будет тесно сотрудничать с влиятельными организациями, такими как Межправительственная панель по изменению климата (Intergovernmental Panel for Climate Change - IPCC), новой международной глобальной инициативой «Future Earth» и инициативой «Digital Earth» (Цифровая Земля). Future Earth - это новая десятилетняя исследовательская инициатива, разработанная Международным советом по науке (the International Council for Science - ICSU), ООН, Международным советом по социальным наукам (International Social Science Council - ISSC) и Belmont Forum. Future Earth сместит фокус исследований глобального изменения окружающей среды, осуществляемых под управлением ICSU, на междисциплинарные исследования, ориентированные на поиск решений и разработанные совместно с конечными пользователями (политиками, бизнесом, неправительственными организациями, гражданами, средствами массовой информации). Цифровая Земля - это глобальный проект, нацеленный на использование мировых ресурсов данных для разработки виртуальной 3-D модели Земли в целях мониторинга, измерения и прогнозирования природных явлений и человеческой деятельности на планете.

Одна из основных целей РЕЕХ заключается в предоставлении инструментов для ученых, чтобы те могли получить результаты, которые снизили бы неопределенность научных знаний, необходимых для принятия политических решений в регионе РЕЕХ. Сокращение этих неопределенностей требует мультидисциплинарных исследований с использованием передовых методов измерения и моделирования. Равнозначно важным аспектом является отображение потребностей конечных пользователей научных результатов РЕЕХ (правительства, парламенты, финансирующие организации, муниципалитеты и города, бизнес, граждане, неправительственные организации, средства массовой информации) и их вовлеченность в планируемые исследования, которые удовлетворят эти потребности. Различным научным дисциплинам и секторам политики будет предложено присоединиться к программе РЕЕХ, чтобы быть в состоянии реагировать на вызовы, которые требуют мультидисциплинарного подхода.

Проект РЕЕХ будет способствовать решению основных глобальных проблем и социально-экономических вопросов, связанных с глобальным устойчивым развитием и взаимодействиями экосистем, атмосферы и общества (например, взаимодействием между изменением климата и наземной, прибрежной и морской средами; сельским и лесным хозяйством, потреблением энергии, городским планированием; экстремальными событиями). РЕЕХ займется подготовкой оценок и аналитических записок по соответствующим темам для политических деятелей региона и будет поддерживать открытый диалог с заинтересованными сторонами. РЕЕХ создаст каналы связи как международные, так и внутри каждой отдельной страны, и гарантирует то, что новое научное знание будет доступным и пригодным для использования на политическом уровне.

РЕЕХ будет тесно сотрудничать с влиятельными организациями, такими как Межправительственная панель по изменению климата (Intergovernmental Panel for Climate Change - IPCC), Международный совет по науке (the International Council for Science - ICSU), новой международной глобальной инициативой «Future Earth» и инициативой «Digital Earth» (Цифровая Земля). Future Earth - это новая десятилетняя исследовательская инициатива, разработанная ICSU, ООН, Международным советом по социальным наукам (International Social Science Council - ISSC) и Belmont Forum. Future Earth сместит фокус исследований глобального изменения окружающей среды, осуществляемых под управлением ICSU, на междисциплинарные исследования, ориентированные на поиск решений и разработанные совместно с конечными пользователями

(политиками, бизнесом, неправительственными организациями, гражданами, средствами массовой информации). Ключевой идеей Future Earth является совместная разработка исследований посредством сотрудничества заинтересованных сторон, ученых и финансирующих организаций для получения знания, необходимого, чтобы справиться с глобальным изменением климата и для перехода к экономике устойчивого развития.

РЕЕХ поддержан основным проектом Международной программы геосфера-биосфера (IGBP) iLEAPS (Интегрированное исследование процессов экосистем суши и атмосферы - Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study), который также является основным проектом Future Earth. iLEAPS делает исследования взаимосвязи экосистема-атмосфера-общество в рамках РЕЕХ более узнаваемыми, и как часть инициативы «Future Earth» iLEAPS может действовать как канал передачи результатов РЕЕХ на политический уровень в странах-участницах РЕЕХ. Через iLEAPS РЕЕХ связан с инициативой «Future Earth», в рамках которой будут реорганизованы программы по Глобальному изменению окружающей среды ICSU с целью осуществления интегрированных исследований глобального устойчивого развития. Для этого потребуются интеграция социальных наук и экономики с естественными науками на всех уровнях проведения исследований - от планирования до реализации и интерпретации результатов. Поиск наилучшего варианта для организации совместной работы в таких различных сферах сложен, но РЕЕХ готов сделать первые шаги в евразийском регионе к решению проблем Земли с ее растущим населением.

В каждой стране у ученых есть свои собственные каналы доступа к политическим кругам. В РЕЕХ привлекаются видные научные деятели, их опыт используется для эффективного диалога между наукой и политикой. Например, в Финляндии РЕЕХ напрямую работает с Национальной климатической панелью; Форумом экологической информации (www.ymparistiedonfoorumi.fi), которые предоставляют научные данные для принятия политических решений; а также с Future Earth, международной инициативой по глобальной устойчивости под руководством ICSU, ISSC и ООН (<http://www.ICSU.org/future-earth>); и с форумом Цифровой Земли.

5.3 ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НА ПОЛЬЗУ ОБЩЕСТВА

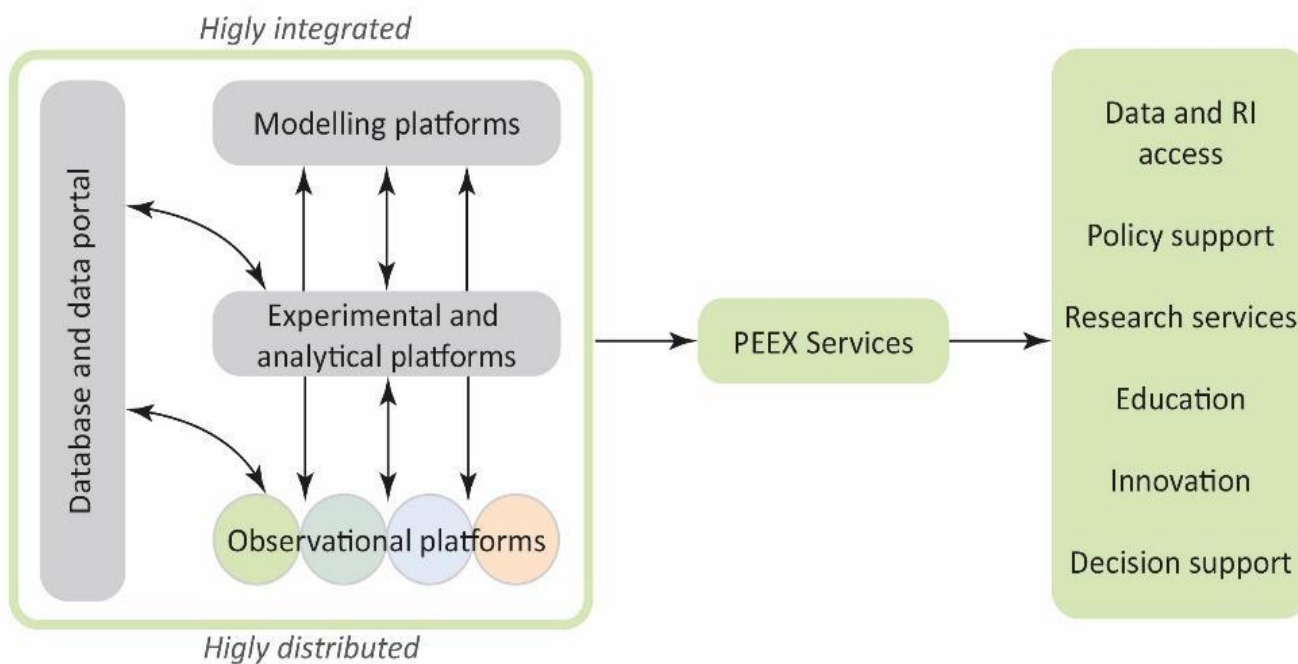


Рисунок 72 Проектная концепция инфраструктуры PEEH на основе сервис-ориентированного подхода (Lappalainen et al., 2014a,b).

5.3.1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВЕРЕННЫХ ДАННЫХ

Скоординированные данные in-situ по наземной, воздушной и водной системам, совместно со спутниковыми наблюдениями, формируют основу для новой науки и ведут к созданию новых моделей системы Земли, сценариев и систем раннего предупреждения. Одним из главных итогов предварительного этапа PEEH является наблюдательная сеть PEEH, которая заполнит текущий недостаток наблюдений в Северной Евразии. В особой степени это относится к самым северным регионам Сибири и побережья Северного Ледовитого океана. Целью является донесение наблюдательной структуры в международный контекст со стандартными или сопоставимыми процедурами.

Европейский союз ESFRI, совместно с инфраструктурными проектами ЕС (такими как EU-FP-7 ASTRIS, ANAEE, ENVRI, COOPEUS и предстоящим инфраструктурным проектом в рамках Horizon 2020), обеспечивают основу для разработки гармонизированных продуктов данных и для калибровки измерений, произведенных сетью, в соответствии с международными стандартами. Широкое сотрудничество в циркумполярном контексте также является неотъемлемой частью подхода, связанного с гармонизированным продуктом данных. Например, атмосферные, наземные и морские компоненты программы наблюдения PEEH будут выполнять задачи для других международных сетей, таких как AERONET (USA AErosol RObotic NETwork), NDACC (Сеть для обнаружения изменений в составе атмосферы) и сети GAW (Глобальная служба атмосферы), действующей под руководством Всемирной метеорологической организации (WMO).

5.3.2 СИСТЕМЫ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Антропогенная деятельность напрямую затрагивает природные среды и системы и косвенно ускоряет процессы, ответственные за изменение климата. Кроме того, северные сообщества воздействуют на биологические, химические и физические процессы чувствительных сред и экосистем в тайге и арктических регионах. В худшем случае, этот двойной тип развития может также ускорить другие негативные тенденции. Например, увеличение использования природных ресурсов в арктическом регионе, совместно с увеличением транспортных потоков, увеличит риск аварий, таких как разливы нефти, а также увеличит антропогенные эмиссии в наземную, воздушную и водные системы, повлечет негативные изменения в землепользовании в лесах и сельскохозяйственных районах. Таяние вечной мерзлоты и экстремальные погодные явления увеличивают риски стихийных бедствий, таких как лесные пожары, наводнения и оползни, а также риски разрушения объектов инфраструктуры, таких как здания, дороги и системы распределения энергии. Экстремальные события, которые уже происходят (ураганы, наводнения, лесные пожары, оползни, случаи загрязнения воздуха в мегаполисах и т.д.), и их воздействие на благополучие человека и инфраструктуру, дают нам представление о возможных будущих опасностях и подчеркивают растущую потребность в надежных системах раннего предупреждения. Скоординированная сеть наблюдений РЕЕХ совместно с моделированием в рамках РЕЕХ образуют основу для следующего поколения систем раннего предупреждения по всему региону исследований РЕЕХ.

5.3.3 ИННОВАЦИИ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

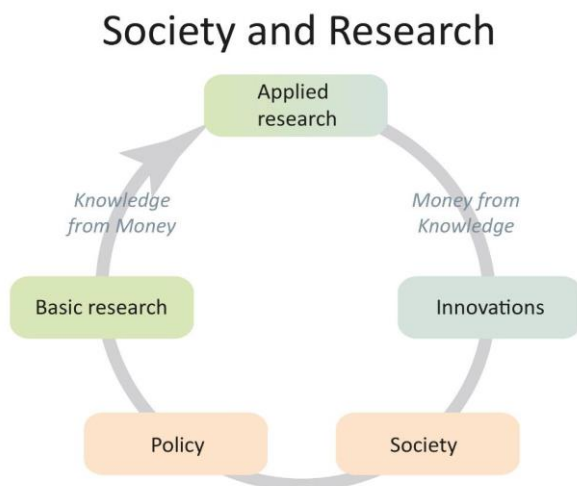


Рисунок 73 Общество и фундаментальные исследования тесно связаны друг с другом

Общество и фундаментальные исследования тесно связаны друг с другом. Используя ресурсы, предоставляемые обществом (или политиками), фундаментальные исследования генерирует новые знания, которые затем используются в прикладных исследованиях. Через прикладные исследования, и в частности, с помощью инноваций, из новых знаний производится новый капитал. Важно обеспечить, чтобы этот цикл не был нарушен. Технологическое развитие может ответить на некоторые из вопросов, поставленные в F1. Тем не менее, следует рассматривать все общество, включая его экономические и культурные аспекты, в поисках экологически рациональных решений глобальных проблем.

5.4 КАЧЕСТВО ВОЗДУХА В МЕГАПОЛИСАХ

Китай является примером напряженного региона с экологической точки зрения с быстро меняющимся социально-экономическим условиям. В настоящее время, плохое качество воздуха в Пекине и других мегаполисах Китая угрожает здоровью сотен миллионов людей и вызывает серьезные проблемы для окружающей среды, таким образом серьезно снижая производительность земли и всей нации. Китай активно ищет новые способы защиты окружающей среды, которые являются менее затратными, но создают больше преимуществ и приводят к сокращению эмиссий, а также содействуют устойчивому развитию. Китай намерен ускорить выстраивание ресурсосберегающего и экологически ориентированного общества и стремится к улучшению уровня охраны окружающей среды и повышения качества жизни. В частности, Китай нацелен уменьшить смертность из-за плохого качества воздуха (Internation Eurasian Academy of Sciences, 2012). Эмиссии различных загрязняющих веществ взаимосвязаны, и их воздействие на здоровье и окружающую среду зависит от большого числа различных факторов, включая все процессы от первичных эмиссий до реакций разложения или осаждения.

РЭЕХ будет использовать комплексный подход при решении проблемы качества воздуха. Этот подход принимает во внимание все соответствующие загрязняющие вещества и их источники, перенос и преобразование в атмосфере, а также воздействие загрязняющих веществ на общество и на принятие политических решений. Используя этот подход, наиболее практические решения могут быть реализованы поэтапно. Целью является достижение заметных улучшений качества воздуха в наиболее короткие, но реалистичные с экономической и общественной точки зрения сроки. Для проблемы, такой сложной и многогранной, как качество воздуха в Пекине и в Восточном Китае, решения могут быть найдены только с помощью такого подхода.

Важно одновременно заниматься исследованием различных загрязнителей воздуха для того, чтобы достичь намеченных Всекитайским собранием народных представителей улучшений качества воздуха. Это связано с несколькими механизмами обратной связи и взаимодействиями между различными загрязняющими веществами. Таким образом, мы предоставляем концепцию - от понимания к решениям:

- (i) Создать сеть комплексных и непрерывных измерений для сбора наиболее важных данных о качестве воздуха и метеорологии с общественной и экономической точки зрения. Сюда будет входить пилотная и справочная системы.
- (ii) Провести всесторонний анализ источников эмиссий различных загрязнителей воздуха. Это обеспечит подробную информацию о наиболее эффективных региональных способах снижения эмиссий.
- (iii) Провести комплексные измерения качества воздуха в помещениях в репрезентативной выборке жилых и офисных зданий, а также применить моделирование открытой воздух – помещение для выявления и понимания критических точек для качества воздуха в помещениях в Китае.
- (iv) Провести интегративный анализ данных, полученных от сети измерений, анализ эмиссий и моделирование качества воздуха в помещениях, чтобы оценить воздействие загрязняющих веществ на население, а также определить наиболее эффективные решения с общественной, экономической и экологической точек зрения.
- (v) Применить результаты, чтобы произвести структурные и инфраструктурные изменения, и разработать технические решения совместно с промышленными партнерами.

6. ПЕРЕДАЧА ЗНАНИЙ (F4)

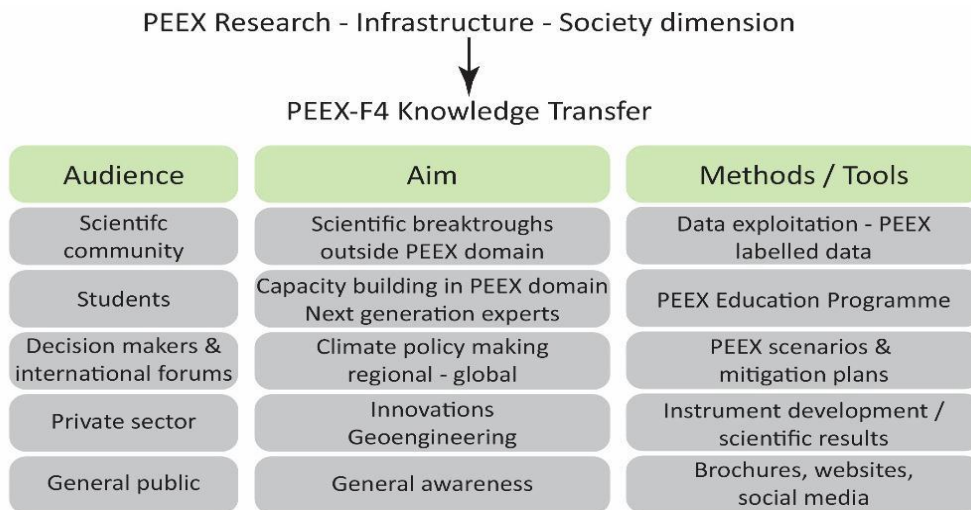


Рисунок 74 Передача знаний PEEC – основные получатели, цели и методы.

6.1 МЕЖДУНАРОДНЫМ ФОРУМАМ, ЛИЦАМ, ПРИНИМАЮЩИМ РЕШЕНИЯ И ГОСУДАРСТВЕННЫМ ВЛАСТЯМ

PEEC будет тесно сотрудничать с влиятельными международными организациями, такими как Межправительственная панель по изменению климата (Intergovernmental Panel for Climate Change - IPCC), новая международная глобальная инициатива в области устойчивого развития «Future Earth» и Цифровая Земля. «Future Earth» - это новый проект, который рассчитан на 10 лет, разработанный Международным советом по науке (the International Council for Science - ICSU), ООН, Международным советом по социальным наукам (International Social Science Council - ISSC) и Belmont Forum. «Future Earth» будет сдвигать фокус исследований глобальных изменений окружающей среды ICSU от фундаментальной науки к междисциплинарным исследованиям, ориентированным на поиск решения и разрабатываемым совместно с конечными пользователями (политическими организациями, бизнесом, неправительственными организациями, гражданами и средствами массовой информации). Цифровая Земля - это глобальный проект, нацеленный на использование мировых ресурсов данных для разработки виртуальной 3-D модели Земли в целях мониторинга, измерения и прогнозирования природных явлений и человеческой деятельности на планете.

Одной из основных задач проекта PEEC является предоставление ученым инструментария с целью получения результатов, которые снижают фактор неопределенности научных знаний, необходимых для принятия политических решений в регионе PEEC (рис.74). Снижение этих неопределенностей требует мультидисциплинарных исследований с использованием передовых методов измерения и моделирования. Тем не менее, в равной степени важным аспектом является отображение потребностей конечных пользователей научных результатов PEEC (правительства, парламенты, финансирующие организации, муниципалитеты и города, бизнес, граждане, общественные организации, средства массовой информации) и их вовлечение в планирование исследований, которые удовлетворят эти потребности. С целью решения проблем, требующих междисциплинарного подхода, к участию в проекте PEEC будут привлечены различные политические группы и представители разных научных дисциплин.

Проект РЕЕХ будет способствовать решению основных глобальных проблем и социально-экономических вопросов, связанных с глобальным устойчивым развитием и взаимодействиями экосистем, атмосферы и общества. Примерами в данном случае могут служить взаимодействия между изменением климата и наземной, прибрежной и морской средами, а также сельским и лесным хозяйством, потреблением энергии, городским планированием; экстремальными явлениями. РЕЕХ займется подготовкой оценок и аналитических записок по соответствующим темам для политических деятелей региона и будет поддерживать открытый диалог с заинтересованными сторонами и политическими организациями. РЕЕХ создаст каналы связи как международные, так и внутри каждой отдельной страны, чтобы обеспечить доступность и пригодность использования научного знания на политическом уровне. Ключевой идеей будущей науки о Земле является совместная разработка исследований совместно с заинтересованными сторонами, учеными и финансирующими организациями для получения знания, необходимого обществу, чтобы справиться с глобальным изменением климата и для перехода к экономике устойчивого развития.

РЕЕХ поддержан основным проектом IGBP iLEAPS (Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study – Интегрированное изучение процессов экосистем суши и атмосферы). iLEAPS откроет обзор на исследование взаимосвязей экосистема-атмосфера-общество в рамках РЕЕХ, и как часть IGBP и инициативы «Future Earth» iLEAPS может действовать как канал передачи результатов РЕЕХ на политический уровень в странах-участницах РЕЕХ. Через iLEAPS РЕЕХ связан с инициативой «Future Earth», которая будет реорганизовывать программы Глобального изменения окружающей среды ICSU на благо исследований глобального устойчивого развития. Для этого требуется интеграция общественных наук и экономики с естественными науками на всех уровнях - от планирования исследований и до их проведения и интерпретации результатов. Поиск наилучшего варианта для организации совместной работы в таких различных сферах сложен, но РЕЕХ готов сделать первые шаги в Пан-Евразийском регионе к решению проблем Земли с ее растущим населением.

6.2 НАУЧНЫМ СООБЩЕСТВАМ И ЧАСТНОМУ СЕКТОРУ



Рисунок 75 Студенты и аспиранты, участвующие в интенсивном полевом курсе в Нуутиälä, Финляндия. Фотография Ella-Maria Kyrö.

РЕЕХ внесет свой вклад в создание нового интегрированного исследовательского сообщества системы Земли в Пан-Евразийском регионе, открывая свою инфраструктуру исследований и моделирования и приглашая международных партнеров и организации для участия в ее разработке и использовании. РЕЕХ станет важным объединяющим фактором социально-экономических и естественнонаучных сообществ для совместного решения крупных проблем, влияющих на благополучие человека, общества и экосистем в арктическо-бореальном регионе.

РЕЕХ помогает налаживать связи и устанавливать доверие между естественными и общественными науками, проект поддерживает взаимное уважение и признание региональных и национальных особенностей, а также равенство и равноправие мужчин и женщин.

Разнообразие знаний важно для решения «Глобальных проблем». Здесь требуется объединение знаний, полученных в различных областях естественных и общественных наук. Налаживание связей между разными научными сферами необходимо для открытой дискуссии, доверия и уважения между учеными, занимающимися различными дисциплинами.

Многообразие решений также важно при работе с глобальными проблемами. При принятии решений должны учитываться региональные особенности, от климата и географического положения до культуры и законодательства. Одинаковые решения не подходят для разных ситуаций, и поэтому целью РЕЕХ является подготовка рекомендаций и инструкций с учетом региональных особенностей. РЕЕХ содействует совместному образованию и обучению и приветствует взаимное признание институтов-участников, причем требования к программам обучения и выдаваемым дипломам должны соответствовать законодательству участвующих сторон.

Разнообразие культур существует среди народов, областей науки, принципов работы различных организаций и даже внутри отдельных организаций. РЕЕХ способствует принятию и пониманию различных культур и содействует диалогу между ними.

Разнообразие инноваций необходимо для превращения идей и решений РЕЕХ в новые коммерческие услуги и продукты. Новые идеи возникают на стыке разных культур, людей, знаний и решений.

Разнообразие знаний, инноваций, решений и т.д. в конечном счете основывается на различиях между людьми. Эти различия всегда проявляются в процессе взаимодействия. РЕЕХ признает, что все люди разные, и для личностного роста, обучения и образования требуются различные меры и поддержка. РЕЕХ не принимает никаких видов дискриминации и пропагандирует равенство, в том числе, между мужчинами и женщинами, а также позитивную дискриминацию. Целью РЕЕХ является равенство мужчин и женщин в принятии решений и равной оплате за равноценную работу.

Образовательная программа РЕЕХ

Одним из первых мероприятий проекта РЕЕХ будет создание образовательной программы РЕЕХ. Основное внимание будет уделяться распространению существующего образовательного материала и сотрудничеству национальных и региональных программ. РЕЕХ нацелен на обучение

исследователей на протяжении развития их карьеры от уровня студентов и выпускников до специалистов, профессоров и руководителей научных институтов (рис.75, рис.76). Налаживание связей в естественнонаучной среде, а также с общественными науками является одной из наиболее важных целей международного и междисциплинарного образовательного сотрудничества.

Образовательная программа РЕЕХ основана на принципе непрерывного обучения на различных уровнях. Образовательные цели варьируются от увеличения осведомленности общественности до обучения специалистов и распространения научных результатов РЕЕХ заинтересованным сторонам.

Цели обучения и продвижения в научной карьере в рамках РЕЕХ: (i) обучение следующего поколения ученых с помощью тренировки технических навыков и научных вопросов одновременно с пониманием общественной сферы, имеющей отношение к глобальным проблемам, (ii) обучение мультидисциплинарных ученых с глубоким пониманием предмета и имеющих навыки широкого применения, которые могут быть использованы для работы вне сферы научно-исследовательской деятельности; (iii) налаживание сотрудничества между аспирантами и ключевыми европейскими организациями в области исследований и исследовательской инфраструктуры, оказания услуг и научной политики; (iv) осуществление перекрестного обучения с рассмотрением всех аспектов наблюдений окружающей среды от получения данных до их использования в численных моделях. Например, обучение, связанное с измерениями, будет варьироваться от разработки приборов до создания сети наблюдений. Точно так же, обучение, связанное с моделированием, будет охватывать все - от применения простых одномерных численных моделей до разработки целостных моделей системы Земли; обучение в области общественных наук будет варьироваться от понимания подходов к принятию решений, основанных на моделировании, до анализа политики. Обучение в рамках РЕЕХ будет также применить идею горизонтального обучения, где учителя берут на себя роль координаторов, а не лекторов. Совместное обучение осуществляется на всем протяжении курсов. Это способствует построению социальных связей, обмену информацией и знаниями, и, наконец, улучшает метакогнитивные навыки студентов, которые, в свою очередь, развивают навыки к самостоятельному обучению.

MSc level	PhD level	Postdoc level	Professor level
Specializing in one topic	Further specialization, learning independent research	Establishing own research	Building and maintaining international networks and research consortia
Learning general scientific practices	Understanding the big picture	Obtaining funding	Top-level initiative preparation
Joint programmes	Joint programmes	Building research group	Science workshops
Local programmes	Local / national programmes	Science workshops	Teacher workshops
International courses	Workshops	Teacher workshops	International courses
	International courses	International courses	

Рисунок 76 Структура обучения в рамках РЕЕХ от уровня выпускника магистратуры до профессора

В образовательной программе РЕЕХ рассматриваются следующие темы:

Обучение мультидисциплинарным навыкам и навыкам передачи знаний, которые возможно применить в государственном секторе и бизнесе: исследования изменений климата и качества воздуха, а также разработки планов ослабления негативных последствий и адаптации к ним требует специальных знаний (на уровне от магистра до кандидата наук), мультидисциплинарных (уровень кандидата наук), а также владение навыками работы с людьми (уровень от докторантов до профессоров) (рис.76). В образовательную программу РЕЕХ будут вовлекаться аспиранты, докторанты, технический персонал и специалисты для передачи знаний как по горизонтали - в ходе курсов, проводимых специалистами мирового уровня в различных областях науки, так и путем междисциплинарного обучения, проводимого коллегами. Докторанты, участвующие в РЕЕХ, являются слушателями национальных докторских программ в рамках проекта. Передача знаний от профессоров студентам, а также между профессорами и экспертами в различных научных областях осуществляется через курсы лекций. Это позволяет донести свежие взгляды на сложные мультидисциплинарные исследовательские вопросы РЕЕХ.

Открытие уже существующих курсов в институтах РЕЕХ для всего сообщества: учебный план РЕЕХ включает в себя открытие существующих курсов в институтах РЕЕХ для студентов из других институтов. Курсы, регулярно проводимые в других университетах, могут быть включены в учебные программы учащихся в институтах РЕЕХ. Курсы также могут быть адаптированы для передачи специальных знаний, и чтобы соответствовать потребностям конкретного института. Например, группа, специализирующаяся на наблюдениях *in-situ* или моделировании, может расширить свои знания путем образовательного обмена с институтом, специализирующимся в области дистанционного зондирования, и наоборот. Курсы также могут включать практические примеры на базе проекта, где естественные и социальные науки объединены, чтобы решить отдельно взятые вопросы, связанные с изменением климата, например, моделирование эмиссий и их воздействий на климат вплоть до мер по адаптации. Образовательные обмены также способствуют передаче знаний от коллеги к коллеге посредством обмена специалистами и профессорами и междисциплинарных семинаров, посвященных научным вопросам РЕЕХ.

Междисциплинарное сотрудничество, международная, междисциплинарная и межотраслевая мобильность: институты РЕЕХ обладают знаниями мирового уровня по изменению климата в Арктике и бореальных регионах. Передача знаний в рамках РЕЕХ способствует взаимодействию коллег и созданию сети экспертов. Обучение навыкам межличностного общения и дополнительным навыкам является частью программы передачи знаний. Программы обмена студентами способствуют междисциплинарному сотрудничеству и мобильности внутри Евразии, особенно это касается стран с арктическими и бореальными регионами (Северная Европа, Россия и Китай). Мобильность как национальная, так и международная осуществляется на четырех уровнях: (i) между станциями РЕЕХ; (ii) между областями исследований (экология-физика-технологии-химия-метеорология-география-общественные науки); (iii) между методологиями исследований (теория-моделирование-эксперименты-наблюдения; наблюдения *in situ*, дистанционные наблюдения, количественные и качественные исследования); (iv) между университетами, НИИ и бизнесом, а также политическими организациями. Мобильность осуществляется путем организации совместных курсов, семинаров и научных командировок.

Признание важности карьерного роста: обучение магистров и докторов организовано через национальные образовательные программы. Целью РЕЕХ является содействие сотрудничеству в области образования между национальными и региональными программами, а также отдельными университетами. РЕЕХ признает важность карьерного роста, и его образовательная структура нацелена на охват всех научных уровней от аспирантов до профессоров и руководителей институтов, воплощая, таким образом, идею непрерывного образования.

Поддержка создаваемых и существующих положительных обратных связей в образовании заключается в: (i) содействии формированию формального и неформального междисциплинарного и международного руководства и поддержки коллег; (ii) содействии кросс-руководству, куда привлекаются руководители из двух или более исследовательских групп; (iii) организации нескольких совместных международных курсов и семинаров ежегодно для непосредственной поддержки исследований студентов, а также обучение основополагающим навыкам и навыкам широкого применения; (iv) обеспечении прозрачного и открытого информационного потока; институты-участники публикуют объявления о курсах на веб-портале.

Обучение специалистов нового поколения в области научно-исследовательской инфраструктуры (передовой опыт, двусторонние связи между организациями): в дополнение к строительству собственной инфраструктуры в Пан-Евразийском регионе РЕЕХ будет привлекать к сотрудничеству более крупные международные научные сообщества путем совместной работы, использования и совершенствования основных наблюдательных инфраструктур, таких как сети GAW, SMEAR, ICOS, ACTRIS и ANAEE. РЕЕХ будет продвигать традиционные методы и передовой опыт в создании массивов данных долгосрочных комплексных мультидисциплинарных наблюдений и координировать сопоставление и разработку моделей и данных. РЕЕХ будет также укреплять международное научное сообщество путем обширной и постоянно развивающейся программы. РЕЕХ продвигает передачу знаний и обучение, включая содействие проведению открытых дискуссий между сетями, изначально созданными для различных областей науки, и налаживание отношений между сообществами, связанными с крупными наблюдательными инфраструктурами в регионе. Обучение, направленное на поддержку инфраструктуры и наблюдательной сети РЕЕХ, подразумевает международные курсы по основным темам и семинары, где согласуется, передается и обновляется передовой опыт. Приветствуется, когда специалисты продолжают обучение в течение всей жизни с целью постоянного совершенствования навыков. Обмен специалистами и служебные командировки являются важной частью обучения, пропагандируется обмен между институтами, внутри и вне инфраструктуры научных исследований и мониторинга. Передача знаний осуществляется в обоих направлениях, и ожидается, что специалисты поделятся своими знаниями с коллегами, а также будут вести лекции и обучать следующее поколение.

В рамках двусторонних связей между организациями полевые станции в регионе РЕЕХ совершенствуются и расширяются до мультидисциплинарных наблюдательных инфраструктур. Эти двусторонние связи подразумевают поддержку развивающегося партнера РЕЕХ со стороны более опытного в данном случае это уже существующая передовая полевая станция или мощности обработки данных путем передачи накопленного опыта. Оба партнера подписывают соглашение для инициации долгосрочного процесса, по которому инфраструктура и протоколы опытного партнера адаптируются к условиям организации, которая расширяет свою область специализации.

Поддержка в таком случае нематериальна, и финансирование для развития инструментария и объектов идет из других источников. Кроме этого, РЕЕХ поощряет поддержку коллег из разных институтов и передачу знаний, и признает, что человек, который является специалистом, и читает лекции в одной области, может нуждаться в обучении по другой тематике.

Включение исследовательской и образовательной деятельности в более широкие рамки: РЕЕХ будет поддерживать и укреплять продуктивную наддисциплинарную научно-исследовательскую среду, активно участвовать в разработке научной политики, углублять научное понимание многомасштабной концепции науки, а также заниматься построением инфраструктуры исследований окружающей среды и выступать за открытый доступ к данным и визуализации данных. Инициатива РЕЕХ продвигается Университетом Хельсинки (Финляндия), где также располагается ведущий Исследовательский центр по атмосферным наукам («от молекулярных и биологических процессов – к глобальному климату»; АТМ), который активно участвует в обучении докторантов на европейском уровне, например, в рамках инновационных сетей обучения Marie Skłodowska-Curie Horizon 2020. Институты-участники РЕЕХ также задействованы в других двусторонних и региональных программах по докторантуре.

Таблица 2 Обучение в рамках РЕЕХ: примеры целевых групп, задач и действий

<i>Целевая группа</i>	<i>Задача</i>	<i>Действие</i>
Учителя и ученики средней школы	Повышение информированности общественности	Распространение тематического материала РЕЕХ
Студенты магистратуры и аспиранты	Обучение следующего поколения ученых в сфере РЕЕХ	Локальные и региональные программы, международные курсы и семинары
Молодые ученые	Переподготовка технических экспертов, поддержание инфраструктуры	Передовой опыт. Международные курсы, семинары, обмен
Предприниматели, внедряющие научные разработки в коммерческую деятельность	Коммерческое использование результатов РЕЕХ	Международные курсы и семинары
Специалисты по работе с данными	Соответствие стандартам данных	Передовой опыт. Международные курсы, семинары, обмен
Старшие научные сотрудники	Усиление междисциплинарного понимания	Международные курсы и семинары
Заинтересованные стороны	Распространение научных результатов по ослаблению негативных последствий изменения климата/адаптации	Стратегические документы по научным результатам РЕЕХ.
Сектора экономики	Региональное информирование по системе наблюдений РЕЕХ	Распространение информации, поддержание контакта
Общественность	Общее информирование об изменениях климата в Арктике	Прозрачное распространение научных результатов РЕЕХ через веб-портал.

6.3 ШИРОКОЙ ОБЩЕСТВЕННОСТИ

Изменение климата ведет к повышению добычи природных ресурсов в Арктике, а для обеспечения устойчивости и ответственности все возрастающей промышленной и коммерческой деятельности важна объективная информация о воздействии этих изменений на регион. Помимо лиц, ответственных за принятие решений, общественность также нуждается в надежных беспристрастных оценках влияния новой промышленной деятельности, а также в информации о последствиях коммерческой деятельности. Такие темы, как “защита природных накопителей углерода” или “подверженность экстремальным погодным явлениям”, описанные в разделе “Воздействие на общество”, будут включены в повестку информационно-разъяснительной работы. Организации, задействованные в проекте РЕЕХ, могут предоставить такую информацию. А вовлечение общественных наук повысит информированность о воздействии поведения различных потребителей на глобальное изменение климата, а также о социальных изменениях, происходящих в регионе исследования РЕЕХ.

РЕЕХ занимается распространением научной информации как для широкой общественности, так и для преподавателей начальной и средней школы. Мероприятия заключаются в распространении информационных материалов и продвижении электронных курсов, предоставляемых Европейским геофизическим союзом, например, Geosciences Information For Teachers (GIFT, <http://egu.eu/outreach/gift/>) и webGeology (образовательные ресурсы Университета Тромсе, Норвегия (<http://ansatte.uit.no/webgeology/>)). РЕЕХ также поддерживает использование дистанционного обучения (например курс, предлагаемый ВМО своим членам (<http://www.WMO.int>)). Кроме того, РЕЕХ поддерживает массовые открытые онлайн курсы (MOOCs), рассчитанные на неограниченное число участников и доступные через интернет. Метаданные архивов изображений, уже созданные членами UNIGEO, являются общедоступными. Одним из примеров обширного источника данных, находящихся в открытом доступе, связанного с мультидисциплинарным исследованием бореальных лесов, является база данных smart-SMEAR (<http://avaa.tdata.fi/web/smart>, Junninen *et al.*, 2009). Smart-SMEAR широко используется на курсах анализа данных, организованных Университетом Хельсинки.

7. РЕАЛИЗАЦИЯ



В течение первых двух-трех лет после стартового совещания в Хельсинки в октябре 2012 года были сделаны первые шаги по реализации РЕЕХ. Научный план РЕЕХ разрабатывался по принципу снизу вверх. Ранние версии научного плана создавались на основе обобщенных результатов тем, представленных на совещаниях РЕЕХ (Хельсинки, 2012; Москве, Nuutiälä и Китай, 2013; Санкт-Петербург, Россия, 2014). Кроме того, Рабочие группы РЕЕХ предоставили материалы для научного плана РЕЕХ и идеи для реализации программы РЕЕХ.

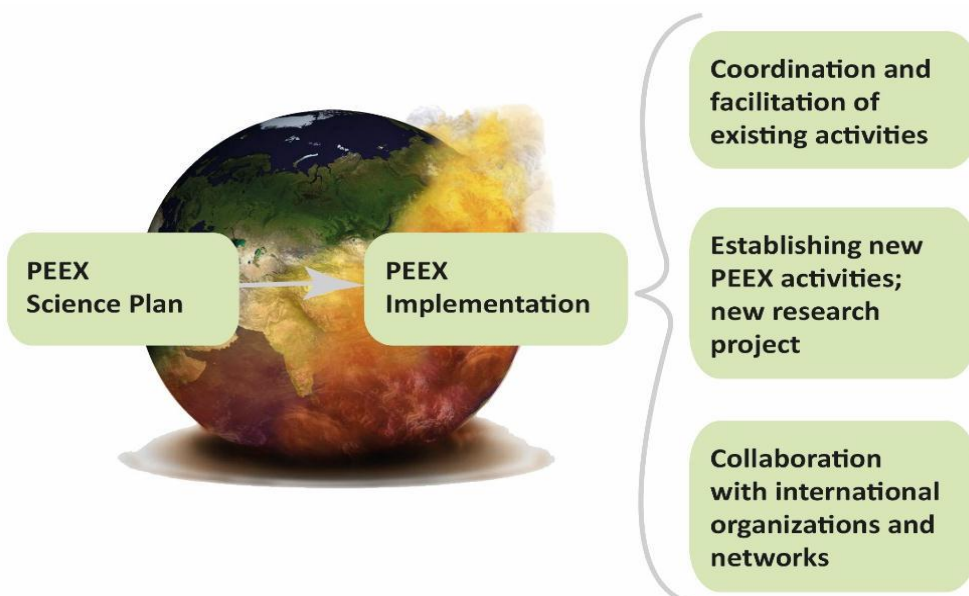


Рисунок 77 Компоненты реализации РЕЕХ.

Реализация РЕЕХ будет состоять из (i) координации и содействия существующей деятельности (исследования-инфраструктура-образование), (ii) создания новых направлений деятельности, таких как научно-исследовательские проекты или новые измерительные площадки, (iii) сотрудничества с международными организациями и сетями, чтобы найти синергию и общие направления деятельности, (iv) открытия диалога с заинтересованными сторонами и конечными пользователями. Реализация исследовательской и инфраструктурной программы РЕЕХ направлена на предоставление услуг (раннего предупреждения) обществу и обеспечение новой, достоверной информации для целей выработки политических решений (рис.77). Ориентировочный срок для проведения подготовительной работы - минимум 10 лет (рис.78).

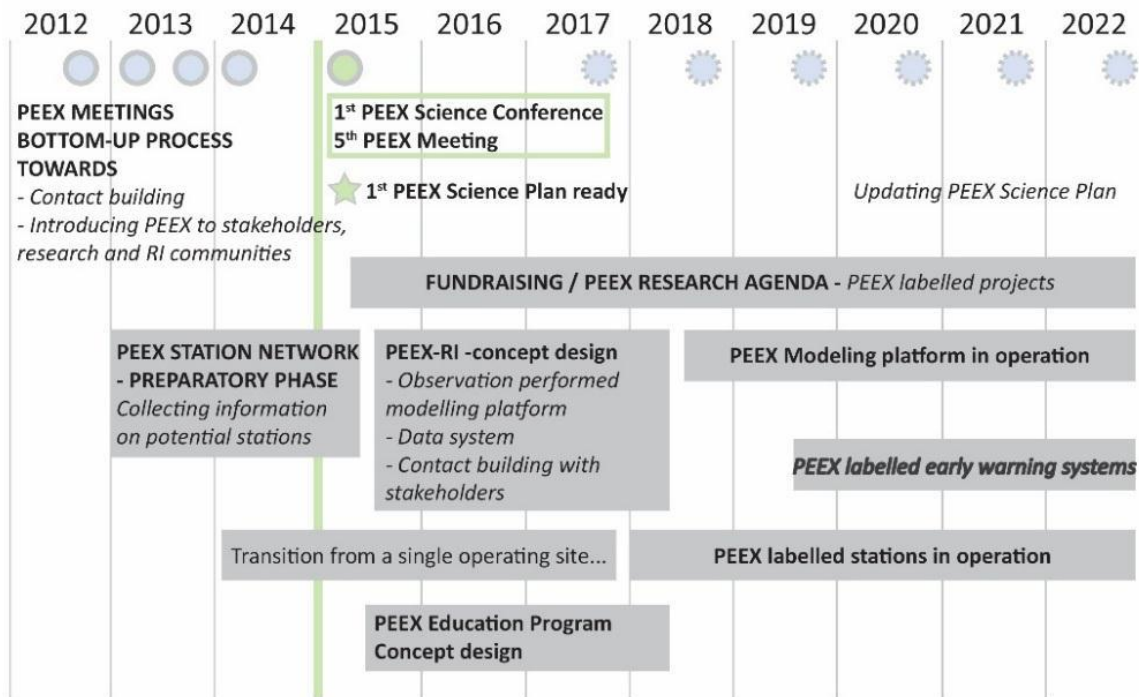


Рисунок 78 Предварительный график PEEH.

Координация и содействие существующей деятельности

Одной из наиболее стратегически важных задач PEEH является заполнение пробела наблюдений в атмосферных данных *in-situ* в Сибирском и всем Северо-евразийском регионе, а также начало процесса по переходу к стандартизированным и гармонизированным процедурам обработки данных по всему региону PEEH. Чтобы подчеркнуть важность этого шага, PEEH начнет реализацию своего Научного плана с создания подробной проектной концепции для Пан-Евразийской наблюдательной сети. На первом этапе, Пан-Евразийская наблюдательная сеть будет построена на основе инфраструктуры существующей сети станции и деятельности по дистанционному зондированию. Подробные планы технических требований, установок приборов, потока данных, хранения данных и распределения данных будут сделаны совместно с институтами-участниками PEEH (см. Lappalainen *et al.*, 2014b). Реализация строится на опыте, приобретенном в течение первых двух лет, в 2012-2014 годах, когда мы собирали метаинформацию о потенциальных атмосферных и экосистемных станциях, особенно в российских бореальных и арктических регионах. В настоящее время база данных содержит информацию о 171 различных станциях. Следующим шагом будет включение информации о станциях в Китае. После подтверждения готовности баз метаданных станций мы будем (i) анализировать способность существующей наблюдательной инфраструктуры служить основой программы наблюдения PEEH и (ii) определять, какой тип новых инфраструктур необходим в регионе исследования PEEH. PEEH нацелен на поиск синергии с основными европейскими инфраструктурами наблюдения за сушей и атмосферой.

Детальная проектная концепция платформы моделирования PEEH будет разработана в соответствии с наблюдательной сетью PEEH. Первым результатом платформы моделирования PEEH на предварительном этапе станет инвентаризация имеющихся средств моделирования, соответствующих целям PEEH, которую проведет команда моделирования PEEH; будут отражены основные пробелы в существующих инструментах моделирования и предложены планы их

развития и совершенствования. Кроме того, будут определены синергии со спутниковыми и наземными данными и моделями.

Первые мероприятия образовательной программы PEEH будут составлять курсы под маркой PEEH, предоставляемые институтами-участниками PEEH, а также образовательным веб-модулем. Первая категория курсов PEEH нацелена на гармонизацию наблюдательной платформы и процедур PEEH от измерений до обработки данных. Курсы, организованные участвующими институтами, размещены организаторами на сайте PEEH, они служат в качестве канала для обмена знаниями в рамках институтов-участников PEEH. Примерами курсов PEEH являются семинары CRAICC-PEEH, финансируемые NordForsk, вторая Зимняя школа ASTRIS и десятая Летняя школа по физике, измерениям и отбору проб атмосферных аэрозолей (<https://www.atm.helsinki.fi/peeh/index.php/education>).

Создание новых видов деятельности PEEH

Научный план PEEH, представляющий собой исследовательскую повестку, является тематическим «зонтиком» для нескольких заявок на финансирование и новых научно-исследовательских проектов. PEEH будет активно подавать заявки на финансирование в несколько источников на национальном, скандинавском и европейском уровнях. Первые заявки на финансирование будут направлены в открывающиеся конкурсы программ Nordfrosk и EU-HORIZON-2020, а также в российские и китайские программы финансирования научных исследований. Примерами первых программ под маркой PEEH являются семинары CRAICC-PEEH (2014-2015) и FAAS (Будущая Арктика - Оценка и Сценарии), финансируемые NordForsk и совместный проект Финского научно-исследовательского центра АТМ и НИИ «АЭРОКОСМОС», который называется «Разработка методов мониторинга динамики естественных и антропогенных эмиссий газовых примесей и аэрозолей в атмосферу на основе космических данных и результатов моделирования».

Сотрудничество с международными организациями и сетями

PEEH будет сотрудничать с несколькими международными организациями и сетями. PEEH связан с Belmont Forum и инициативой Future Earth через Европейский центр Future Earth. PEEH формирует Арктико-бореальный узел Европейского центра. В Финляндии PEEH также будет сотрудничать с «Российским центром», формируемым вокруг Университета Хельсинки. Кроме того, PEEH будет активно действовать в отношении Арктического совета, Северного совета и других соответствующих организаций.

Наиболее важными направлениями научного сотрудничества для PEEH первоначально будут Скандинавские научно-исследовательские центры и IIASA (Международный институт прикладного системного анализа). Развитие научно-исследовательской инфраструктуры будет осуществляться во взаимодействии с GEOSS (Глобальная система наблюдения за планетой Земля). GEOSS связывает PEEH с деятельностью GEO по холодным регионам (Межправительственная группа по наблюдению Земли). В настоящий момент PEEH значится среди других глобальных

исследовательских инфраструктур и международных программ, содействующих координации данных по Арктике, таких как SAON (Система Арктических Опорных Наблюдений), SIOS (Интегрированная система наблюдения Земли Svalbard), WMO GCW и GAW (Глобальное наблюдение криосферы и Глобальная служба атмосферы Всемирной метеорологической организации), INTERACT (Международная сеть исследования и мониторинга суши в Арктике), ABDS-ABA/CAFF (Сохранение флоры и фауны Арктики) и CRYOCLIM (Мониторинг изменения климата в криосфере).

В Китае РЕЕХ заинтересован сотрудничать с инициативой «Экономический пояс Шелкового пути». Один из самых популярных терминов дипломатических достижений Китая в 2014 - это стратегия «Один пояс, одна дорога», то есть, Новый Экономический пояс Шелкового пути, который связывает Китай с Европой через Центральную и Западную Азию, и Морской Шелковый путь XXI века, который соединяет Китай с Юго-Восточной Азией, Африкой и Европой. Китайские инициативы «Экономический пояс Шелкового пути» и «Морской Шелковый путь XXI века» могут стать основой для решения экологических проблем в Азии. Новый «Шелковый путь» является в большей степени сетью, чем установленным маршрутом через внутренние районы континента (рис.79).

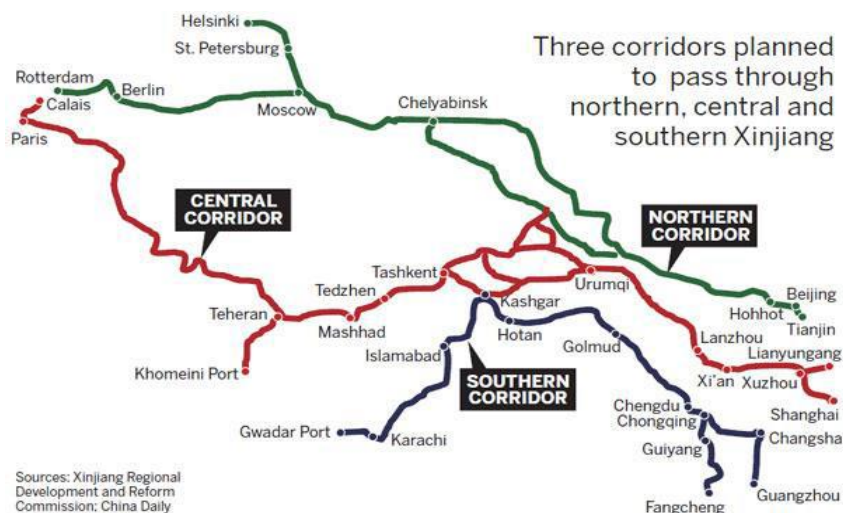


Рисунок 79 Новый Шелковый Путь.

Координация и управление РЕЕХ

Деятельность РЕЕХ координируется штаб-квартирой РЕЕХ (НҚ), расположенной в Университете Хельсинки, Финляндия. Штаб-квартира РЕЕХ поддерживаются программными офисами РЕЕХ (РО) в Москве и Пекине. Штаб-квартира и программные офисы РЕЕХ являются основными органами, координирующими привлечение средств и информационную деятельность РЕЕХ, они также оказывают содействие Подготовительному Комитету РЕЕХ, который состоит из представителей наиболее активных институтов-участников РЕЕХ в Европе, России и Китае (Приложение-2).

Список авторов

Alekseychik, Pavel, University of Helsinki, FI
 Alexeevsky, N., Moscow State University, RU
 Anisimov, Sergey, Borok Geophysical Observatory; IPE RAS, RU
 Antropov, Alexey, Ministry of Education & Science of Russian Federation, RU
 Arneth, Almut, Lund University, SE
 Arnold, Steve, University of Leeds, UK
 Arshinov, Mikhail, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, RU
 Asmi, Ari, University of Helsinki, FI
 Asmi, Eija, Finnish Meteorological Institute, FI
 Babkovskaia, Natalia, University of Helsinki, FI
 Bagryansky, Victor, Inst. of Chemical Kinetics & Combustion SB RAS, RU
 Baklanov, Alexander, World Meteorological Organization
 Baklanov, Petr, Pacific Inst. of Geography RAS, RU
 Baltensperger, Urs, Paul Scherrer Institute, CH
 Belan, Boris, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, RU
 Belotserkovsky, Andrey, Tver State University, RU
 Berninger, Frank, University of Helsinki, FI
 Birmili, Wolfram, Leibniz Institute for Tropospheric Research, DE
 Bitjukova, Victoriya M. V. Lomonosov Moscow State University, RU
 Bobylev, Leonid, Nansen Centre, NO
 Bogorodskiy, Petr, Arctic & Antarctic Research Institute, RU
 Bondur, Valery, AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, RU
 Borisov, Yury, Central Aerological Observatory RU
 Borisova, Alla, University of Helsinki FI
 Boy, Michael, University of Helsinki, FI
 Brouchkov, Anatoli, Lomonosov Moscow State University, RU
 Brovkin, Victor, Max Planck Institute for Meteorology, DE
 Buenostro Mazon, Stephany, University of Helsinki, FI
 Bäck, Jaana, University of Helsinki, FI
 Chalov, Sergey, Lomonosov Moscow State University, RU
 Chechin, Dmitry, Obukhov Institute for Atmospheric Physics RAS, RU
 Cheng, Yafang, Max Planck Institute for Chemistry, DE
 Chi, Xuguang, CAS, CN
 Chibilev, Aleksander, Russian Geographical Society, RU
 Chongyin, Li, Inst. of Remote Sensing & Digital Earth, CAS, CN
 Chu, Yingchu, GEO, CN
 Chubarova Natalia, Lomonosov Moscow State University, Geography RU
 Congbin Fu, China Research Center of International Eurasian Academy of Sciences, CN
 de Leeuw, Gerrit, Finnish Meteorological Institute, FI
 De Mazière, Martine, Belgian Institute for Space Aeronomy, BE
 Diakonov, Kirill Russian Geographical Society, RU
 Ding, Aijun, ICGCR at Nanjing University, CN
 Dobrolyubov, Sergey, Lomonosov Moscow State University, RU
 Drozdov, Dmitry, Earth Cryosphere Institute, SB, RAS, RU
 Dubtsov, Sergei, Inst. of Chemical Kinetics & Combustion SB RAS
 Dyukarev, Egor, Inst. of Monitoring of Climatic & Ecological Systems SB RAS
 Elansky, Nikolay, Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, RU
 Eleftheriadis, Konstantinos, NCSR Demokritos, GR
 Ermolaev, Oleg, Russian Geographical Society, RU

Ezau, Igor, Nansen Center, NO
Fedorov, Gennady, Russian Geographical Society, RU
Filatov, Nikolai, Northern Water Problems Institute, RU
Flint, Mikhail Vladimirovich, Inst. of Oceanology of RAS, RU
Frolov, Alexander, Roshydromet, RU
Fu, Congbin, Nanjing University, CN
Glezer, Olga, Inst. of Geography, RAS, RU
Gliko, Alexander, Departement of Earth Sciences RAS, RU
Godin-Beekmann, Sophie, CNRS, FR
Golitsyn, George, Obukhov IAP RAS, RU
Gongbing, Peng, China Science Center of IEAS, Inst. of Geography, CAS, CN
Gordov, Evgeny, Inst. of Climatic and Ecological Systems, SB, RAS, RU
Greenslade, Diana, Future Earth
Grenier, Christophe, LSCE, IPSL, FR
Guo, Huadong, Inst. of Remote Sensing & Digital Earth, CAS, CN
Gurov, Ilya, Russian Geographical Society RU
Gvishiani, Alex, RAS Earth Science Div., RU
Han, Shenghui, Inst. of Atmospheric Physics, CAS, CN
Hansson, H-C, Stockholm University, SE
Hari, Pertti, University of Helsinki, FI
Heimann, Martin, Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, DE
Helgenberger, Sebastian, BOKU, AT
Hoffmann, Thorsten, Inst. of Inorganic & Analytical Chemistry, DE
Holtslag, A.A.M. (Bert), Wageningen University, NL
Hõrrak, Urmas, University of Tartu, EE
Huang, Mei, Inst. of Geographical Sciences & Natural Resources Research CAS, CN
Hüttich, Christian, Friedrich-Schiller-University Jena, DE
Ikävalko, Johanna, Finnish Meteorological Institute, FI
Isaev, Alexey, Russian State Hydrometeorological University (RSHU), RU
Ivakhov, Viktor, Main Geophysical Observatory (MGO), RU
Janhunen, Juha, University of Helsinki, FI
Juhola, Sirkku, University of Helsinki, FI
Jung, Thomas, Alfred Wegener Institute, ECRA, DE
Järvi, Leena, University of Helsinki, FI
Järvinen, Heikki, University of Helsinki, FI
Kabanov, Mikhail, Inst. of Monitoring of Climatic & Ecological Systems SB, RU
Kachur, Anatoly, Pacific Geographical Institute, FEB, RAS, RU
Kanukhina, Anna, Russian State Hydrometeorological University, RU
Karlin, Lev, RSHU, RU
Kasimov, Nikolay, Lomonosov MSU, Geographical faculty, RU
Kattsov, Vladimir, Voeikov Main Geophysical Observatory, RU
Kauristie, Kirsti, Finnish Meteorological Institute, FI
Kerminen, Veli-Matti, University of Helsinki, FI
Kharytonov, Roman, State Environmental Investment Agency of Ukraine, UA, RU
Khattatov, Vyacheslav, Central Aerological Observatory RU
Kieloaho, Antti-Jussi, University of Helsinki, FI
Kokkola, Harri, Finnish Meteorological Institute, FI
Kolosov, Vladimir, Russian Geographical Society, RU
Koltermann, Peter, Lomonosov Moscow State University, RU
Komarov, Alexander, Inst. of Physico-chemical & Biological Problems in Soil Science of RAS, RU
Komppula, Mika, Finnish Meteorological Institute, FI
Korhonen, Hannele, Finnish Meteorological Institute, FI
Kosheleva, N., Moscow State University, RU
Kotlyakov, Vladimir, IG RAS, RU

Kozlov, Alexander, Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, RU
Kozlovsky, Nikolay, FEB, RAS, RU
Krasnova, Alisa Estonian University of Life Sciences, EE
Krejčí, Radovan, Stockholm University, SE
Krell, Andreas, Stockholm University, SE
Krutikov, Vladimir, IMCES SB RAS, RU
Krutikova, Anna, IKZ RAS, RU
Kryazhimskiy, Arkady, RAS, RU
Krüger, Olaf, Tartu Observatory, EE
Kudeyarov, Valery, Inst. of Physical-Chemical & Biological problems of Soil Science RAS, RU
Kujansuu, Joni, University of Helsinki, FI
Kukkonen, Ilmo, University of Helsinki, FI
Kulmala, Markku, University of Helsinki, FI
Kustov Vasilii, Arctic & Antarctic Research Institute, St.Petersburg, RU
Kurten, Theo, University of Helsinki, FI
Kyrö, Ella-Maria, University of Helsinki, FI
Laaksonen, Ari, Finnish Meteorological Institute, FI
Laj, Paolo, Laboratoire de Glaciologie, FR
Lappalainen, Hanna K., University of Helsinki/FMI, FI
Larson, Libby National Aeronautics & Space Administration (NASA), US
Lauri, Antti, University of Helsinki, FI
Laurila, Tuomas, Finnish Meteorological Institute, FI
Laverov, Nikolay, RAS, RU
Li, Tingting, Inst. of Atmospheric Physics, CAS, CN
Liao, Ke, China Science Centre of IEAS, Inst. of Geography CAS, CN
Lihavainen, Heikki, Finnish Meteorological Institute, FI
Litvinenko, Tamara, Inst. of Geography, RAS, RU
Lisitzin, Aleksandr P, Inst. of Oceanology, RU
Lund, Marianne, CICERO, NO
Lychagin, M., Moscow State University, RU
Ma, Keping, Biodiversity Committee, CAS/Institute of Botany, CAS, CN
Mahura, Alexander, Danish Meteorological Institute (DMI), DK
Makshtas, Alexander, Arctic & Antarctic Research Institute (AARI), RU
Mammarella, Ivan, University of Helsinki, FI
Mareev, Evgeny, Inst. of Applied Physics, RAS, RU
Mather, James, Pacific Northwest National Laboratory, US
Matishov, Gennady G. Kola Science Centre of RAS, RU
Matishov, Dmitry G., Southern Scientific Centre, RAS, RU
Matvienko, Gennadii, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, RU
Melnikov, Vladimir, Inst. of Cryosphere RAS, RU
Melnikov, Igor, Permafrost Institute Siberian Branch of RAS, RU
Melnikova, Irina, Saint-Petersburg State University, RU
Mikhailov, Eugene, Saint-Petersburg State University, RU
Mikhalyuk, Roman, Southern Scientific Center of RAS, RU
Moiseenko, Tatyana, Vernadsky Institute of Geochemistry & Analytical Chemistry of RAS, RU
Moisseev, Dmitri, University of Helsinki, FI
Myhre, Cathrine, NILU, NO
Nie, Wei, Nanjing University, CN
Nigmatulin, Robert, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, RU
Nigmatulina, Venera, retiree, RU
Noe, Steffen, Estonian University of Life Sciences, EE
Ojala, Anne, University of Helsinki, FI
Paavola, Riku, Oulanka research station / Thule Institute / University of Oulu, FI
Panov, Aleksey Vasilyevich, International Institute of Forests, RU

Paramonov, Mikhail, University of Helsinki, FI
Paris, Jean-Daniel, LSCE CEA, FR
Petäjä, Tuukka, University of Helsinki, FI
Pihlatie, Mari, University of Helsinki, FI
Piskunova, Elena, The Herzen State Pedagogical University of Russia, RU
Pisso, Ignacio, NILU, NO
Pliysnin, Viktor, Russian Geographical Society RU
Pogoreltsev, Alexander, Russian State Hydrometeorological University, RU
Popovicheva, Olga, Dept. Microelectronics MSU, RU
Potapov Aleksandr S. Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, RU
Pumpanen, Jukka, University of Helsinki, FI
Puzanov, Alexander, Inst. for Water & Environmental Problems of SB RAS, RU
Pöschl, Ulrich, Max Planck Institute for Chemistry, DE
Regerand, Tatyana, Northern Water Problems Inst., RAS, Petrozavodsk, RU
Repina, Irina, A.M. Obukhov Institute, RAS, RU
Reshetnikov, Alexander, MGO Roshydromet, RU
Richter, Andreas, University of Vienna, AT
Rousseau, Denis, CERES-ERTI (Environmental Research and Teaching Inst.), FR
Rumyantsev, Vladislav, ILR RAS, RU
Ruuskanen, Taina, University of Helsinki, FI
Samulenkov, Dmitry, St. Petersburg State University, RU
Shakhramanyan, Mikhail, AEROCOSMOS, RU
Sharov, Alexander, Russian foundation for Basic Research, RU
Shchepaschenko, Dmitry, IIASA, AT
Shcherbinin, Aleksei, Helsinki University, FI
Shevchenko, Vladimir, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, RU
Shitova, Natalia, Russian Geographical Society, RU
Shvidenko, Anatoly, IIASA, AT
Sipilä, Mikko, University of Helsinki, FI
Skorokhod, Andrey, A.M. Obukhov Inst. of Atmospheric Physics RAS, RU
Smith Korsholm, Ulrik, Danish Meteorological Inst., DK
Smyshlyaev, Sergej P, Russian State Hydrometeorological University, RU
Sofiev, Mikhail, Finnish Meteorological Institute, FI
Sorokotyaga, Yaroslav, RFBR, RU
Spracklen, Dominick, University of Leeds, UK
Su, Hang, MPIC, DE
Subetto, Dmitry, Northern Water Problems Inst., Karelian Research Centre, RU
Sun, Junying, Chinese Academy of Meteorological Sciences, CN
Sundet, Jostein, The Research Council of Norway, NO
Suni, Tanja, University of Helsinki, FI
Tampieri, Francesco, CNR ISAC, IT
Tarasova, Oksana, WMO, CH
Terzhevik, Arkady, Northern Water Problems Inst., Karelian Scientific Centre, RU
Timofeyev, Yu M., Physics Faculty Saint-Petersburg State University, RU
Tishkov, Arkadii, Russian Geographical Society
Tishkov, Valery, Russian Geographical Society RU
Troitskaya, Yuliya, Institute of Applied Physics RAS RU
Tsidilina, Marina, AEROCOSMOS RU
Tulohonov, Arnold, Russian Geographical Society RU
Tutbalina, Olga, Moscow State University, RU
Tynkkynen, Veli-Pekka, University of Helsinki, FI
Tørseth, Kjetil, NILU, NO
Umnov, Alexey, University of Nizhni Novgorod RU
Urban, Marcel, Inst. of Geography, University of Jena, DE

Vanderstraeten, Martine, BELSPO, BE
Vesala, Timo, University of Helsinki, FI
Vidale, Pier Luigi, University of Reading, NERC, UK
Wiedensohler, Alfred, Leibniz Institute for Tropospheric Research, DE
Vihma, Timo, Finnish Meteorological Institute, FI
Viisanen, Yrjö, Finnish Meteorological Institute, FI
Winderlich, Jan, Max Planck Institute for Chemistry, DE
Vitale, Vito, ISAC-CNR, IT ,
Worsnop, Douglas, University of Helsinki, FI
Vyacheslav I. Kharuk, Sukachev Forest Institute, RU
Xue, Yong, Inst. of Remote Sensing & Digital Earth, CAS, CN
Yubao Qiu, RADI, CN
Yurova, Alla, Nansen, NO
Zapadinsky, Evgeni, University of Helsinki, FI
Zaytseva, Nina, Department of Earth Sciences, RAS, RU
Zhang, Jiahua, Inst. of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, CN
Zheng Xunhua, Inst. of Atmospheric Physics, CAS, CN
Zherebtsov, Geliy, ISZC SB RAS, RU
Zhmur, Vladimir, RFBR, RU
Zilitinkevich, Sergej, Finnish Meteorological Institute, FI
Zimov, Sergey, MGO Roshydromet, RU
Zinchenko, Alexander, Main Geophysical Observatory (MGO), RU
Zuev, Vladimir, Inst. of Monitoring of Climatic & Ecological Systems, RU

Austria

BOKU
 IASA
 University of Vienna

Belgium

Belgian Institute for Space Aeronomy
 BELSPO

Canada

Université du Québec à Montréal

China

Biodiversity Committee, CAS/ Institute of Botany, CAS
 China Agricultural University, Department of Nutrition and Food Safety
 China Research Center of International Eurasian Academy of Sciences
 China Science Center of IEAS, Institute of Geography, CAS
 Chinese Academy of Meteorological Sciences
 Chinese Academy of Sciences (CAS)
 Fudan University
 Institute for Climate & Global Change Research (ICGCR), Nanjing University
 Institute of Atmospheric Physics, CAS
 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS
 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
 Nanjing University
 RADI, CAS
 Tsinghua University

Denmark

Danish Meteorological Institute (DMI)
 Niels Bohr Institute

Estonia

Estonian University of Life Sciences
 Tartu Observatory
 University of Tartu

France

CERES-ERTI (Environmental Research and Teaching Institute)
 CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique)
 Future Earth
 Laboratoire de Glaciologie
 LSCE, CEA
 LSCE, IPSL

Finland

Finnish Meteorological Institute
 University of Helsinki
 University of Oulu

Germany

Alfred Wegener Institute, ECRA
 Friedrich-Schiller-University Jena
 Institute of Geography, University of Jena
 Institute of Inorganic and Analytical Chemistry
 Johannes Gutenberg University, Institute of Book Studies
 Leibniz Institute for Tropospheric Research
 Max Planck Institute for Chemistry
 Max Planck Institute for Meteorology
 Max-Planck-Institute for Biogeochemistry

Greece
NCSR Demokritos

Italy
CNR ISAC

Japan
JAMSTEC

Norway
Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC)
Norwegian Meteorological Institute
CICERO
NILU- Norwegian Institute for Air Research
The Research Council of Norway
University of Oslo

The Netherlands
Wageningen University

Russia
A.M. Obukhov Institute for Atmospheric Physics RAS (IAP RAS)
Arctic and Antarctic Research Institute (AARI)
Borok Geophysical Observatory, Institute of Physics of the Earth RAS
Central Aerological Observatory
Department of Earth Sciences Russian Academy of Sciences
Far East branch of RAS
Herzen State Pedagogical University of Russia
Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS"
Institute for Water and Environmental Problems of SB RAS
Institute of Applied Physics, RAS
Institute of Arid Zone, Southern Scientific Center of RAS (SSC RAS)
Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Institute of Geography, RAS
Institute of Limnology RAS
Institute of Monitoring of Climatic & Ecological Systems (IMCES) SB RAS
Institute of Natural Sciences, North Eastern Federal University
Institute of Nuclear Physics, Moscow State University
Institute of Physical-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
Institute of the Earth Cryosphere of SB RAS (IEC SB RAS)
Kazan Federal University, Institute of Fundamental Medicine and Biology
Kola Science Centre of RAS
Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of RAS
Ministry of Education and Science of Russian Federation
Moscow State University
Murmansk Marine Biological Institute (MMBI) RAS
National Research University, Higher School of Economics
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS
P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS
Pacific Institute of Geography, FEB RAS
RDC SCANEX
RPA "Typhoon" (Roshydromet)
Russian foundation for Basic Research (RFBR)
Russian Geographical Society
Russian State Hydrometeorological University (RSHU)
Saint Petersburg State University
St. Petersburg Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS

Southern Scientific Center of RAS (SSC RAS)
Sukachev Institute of Forest SB RAS
Tver State University
University of Nizhni Novgorod
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS)
Vernadsky Inst. of Geochemistry & Analytical Chemistry of RAS (GEOKHI)
Voeikov Main Geophysical Observatory (MGO)

Sweden

Lund University
Stockholm University

Switzerland

GEO (Group on Earth Observations)
Paul Scherrer Institute
World Meteorological Organization

UK

University of Leeds
University of Reading, NERC

Ukraine

State Environmental Investment Agency of Ukraine
Ukrainian Hydrometeorological Institute

USA

Byrd Polar and Climate Research Center
National Aeronautics and Space Administration (NASA)
Pacific Northwest National Laboratory
U.S. Naval Academy
University of Illinois

ПРИЛОЖЕНИЕ-3 ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЕХ

PEEX PROGRAM - MAIN ORGANIZATIONAL BODIES

Preparatory Phase Steering Committee

- Prof. Markku Kulmala, University of Helsinki , Finland (chair)
- Prof. Sergej Zilitinkevich, Finnish Meteorological Institute, Finland (vice-chair)
- Research Director Yrjö Viisanen, Finnish Meteorological Institute, Finland
- Prof. Valery Bondur, AEROCOSMOS, Russia
- Prof. Nikolay Kasimov, Moscow State University, Russia
- Prof. Vladimir Kotlyakov, Institute of Geography, Russia
- Prof. Gennady Matvienko, Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Russia
- Prof. Huadong Guo, The Institute of Remote Sensing and Digital Earth (RADI), Chinese Academy of Sciences (CAS)
- Prof. Alexander Baklanov, World Meteorological Organization (WMO)
- Prof. Hans-Christen Hansson, Integrated Land Ecosystem–Atmosphere Processes Study (iLEAPS)

PEEX Program Headquarters, Helsinki, Finland

Head Prof. Markku Kulmala, University of Helsinki
Prof. Sergej Zilitinkevich, Finnish Meteorological Institute (FMI)
Secretary General Dr. Hanna K. Lappalainen, University of Helsinki / FMI
Science director Prof. Tuukka Petäjä, University of Helsinki
Science officer Dr. Joni Kujansuu, University of Helsinki, PEEX China
Science officer Dr. Taina Ruuskanen, University of Helsinki, Education and training
Science officer Dr. Antti Lauri, University of Helsinki, Education and training
Administrative officer Mrs. Alla Borisova, University of Helsinki

Address:

University of Helsinki, Department of Physics
Division of Atmospheric Sciences (Physicum, Kumpula campus)
Gustaf Hällströmin katu 2a
FI-00560 Helsinki

Main Program Offices in Russia

Moscow State University

Head Prof. Nikolay Kasimov
Prof. Sergej Zilitinkevich
Science Officer Prof. Natalia Chubarova
Executive Officer Dr. Pavel Konstantinov

Address:

Moscow State University
MSU, Faculty of Geography,
Russia, 119991,
Moscow, GSP-1,
1 Leninskiye Gory

AEROCOSMOS

Head Prof. Valery Bondur
Science Officers:
Dr. Marina Tsidilina
MSc. Alexandra Tushnova

Address:

AEROCOSMOS
Gorokhovskiy pereulok 4
Moscow, Russia, 105064
Tel: +7 495 632 1654, +7 495 632 1719
Fax: +7 495 632 1178
E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Main Program Offices in China

Institute of Remote Sensing and digital Earth, CAS (RADI)

Director Ms. Liu Jie, International Affairs Office

Address:

Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
No.9 Dengzhuang South Road
Haidian District,
Beijing 100094, P.R. China
Tel: +86 10 8217 8969 (direct)
Fax: +86 10 8217 8968

Regional Office; University of Nanjing Prof. Aijun Ding

Address:

School of Atmospheric Sciences
Nanjing University
22 Hankou Road,
Nanjing 210093
P.R. China
Tel & Fax: +86 25 83593758

For the detailed contact information see <http://www.atm.helsinki.fi/peex/>.

- Aaltonen, H., Pumpanen, J., Hakola, H., Vesala, T., Rasmus, S., and Back, J.: Snowpack concentrations and estimated fluxes of volatile organic compounds in a boreal forest, *Biogeosciences*, 9(6), 2033–2044. doi:10.5194/bg-9-2033-2012, 2012.
- Achat, D. L., Bakker, M. R., Augusto, L., Derrien, D., Gallegos, N., Lashchinskiy, N., Milin, S., Nikitich, P., Raudina, T., Rusalimova, O., Zeller, B., and Barsukov, P.: Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia: effects of microbiological and physicochemical properties, *Biogeoscience*, 10, 733–752, doi:10.5194/bg-10-733-2013, 2013.
- ACIA, 2014. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) Overview Report.
- Alcamo, J., Mayerhofer, P., Guardans, R., van Harmelen, T., van Minnen, J., Onigkeit, J., Posch, M., and de Vries, B.: An integrated assessment of regional airpollution and climate change in Europe: findings of the AIR-CLIM Project, *Environ. Sci. Policy* 5, 257–272, doi:10.1016/S1462-9011(02)00037-0, 2002.
- Allen, C. D., Makalady, A. K., Checjuini, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., and Cobb, N.: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risk for forests, *Forest Ecology & Management* 259, 660–684, doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001, 2010.
- Alvarado, M. J., Logan, J. A., Mao, J., Apel, E., Riemer, D., Blake, D., Cohen, R. C., Min, K.-E., Perring, A. E., Browne, E. C., Wooldridge, P. J., Diskin, G. S., Sachse, G. W., Fuelberg, H., Sessions, W. R., Harrigan, D. L., Huey, G., Liao, J., Case-Hanks, A., Jimenez, J. L., Cubison, M. J., Vay, S. A., Weinheimer, A. J., Knapp, D. J., Montzka, D. D., Flocke, F. M., Pollack, I. B., Wennberg, P. O., Kurten, A., Crouse, J., Clair, J. M. St., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Yantosca, R. M., Carouge, C. C., and Le Sager, P.: Nitrogen oxides and PAN in plumes from boreal fires during ARCTAS-B and their impact on ozone: an integrated analysis of aircraft and satellite observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 9739–9760, doi:10.5194/acp-10-9739-2010, 2010.
- Anenberg, S. C., Balakrishnan, K., Jetter, J., Masera, O., Mehta, S., Moss, J., and Ramanathan, V.: Cleaner cooking solutions to achieve health, climate, and economic cobenefits, *Environ. Sci. Technol.* 47, 3944–3952, 2013.
- Anisimov, S. V., Mareev, E. A., and Bakastov, S. S.: On the generation and evolution of electrostatic structures in the surface layer, *J. Geophys. Res.*, 104, 14359–14368, 1999.
- Anisimov, S. V., Mareev, E. A., Shikhova, N. M., and Dmitriev, E. M.: Universal spectra of electric field pulsations in the atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2217–2220, 2002.
- Antokhin, P. N., Arshinov, M. Yu., Belan, B. D., Davydov, D. K., Zhidovkin, E. V., Ivlev, G. A., Kozlov, A. V., Kozlov, V. S., Panchenko, M. V., Penner, I. E., Pestunov, D. A., Simonenkov, D. V., Tolmachev, G. N., Fofonov, A. V., Shamanaev, V. S., and Shmargunov, V. P.: Optik-É AN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29(1), 64–75, 2012.
- Arashkevich, E. G., Flint, M. V., Nikishina, A. B., Pasternak, A. F., Timonin, A. G., Vasilieva, J. V., Mosharov, S. A., and Soloviev, K. A.: The role of zooplankton in transformation of organic matter in the Ob Estuary, on the shelf and in the deep regions of the Kara Sea, *Oceanology*, 50(5), 766–779, 2010.
- Arneth, A., Niinemets, Ü., Pressley, S., Bäck, J., Hari, P., Karl, T., Noe, S., Prentice, I. C., Serça, D., Hickler, T., Wolf, A., and Smith, B.: Process-based estimates of terrestrial ecosystem isoprene emissions: incorporating the effects of a direct CO₂-isoprene interaction, *Atmos. Chem. Phys.* 7, 31–53, 2007.
- Arneth, A., Svenningsson, B., Swietlicki, E., Tarozzi, L., Decesari, S., Facchini, M. C., Birmili, W., Sonntag, A., Wiedensohler, A., Boulon, J., Sellegri, K., Laj, P., Gysel, M., Bukowiecki, N., Weingartner, E., Wehrle, G., Laaksonen, A., Hamed, A., Joutsensaari, J., Petäjä, T., Kerminen, V.-M., and Kulmala, M.: EUCAARI ion spectrometer measurements at 12 European sites – analysis of new particle formation events, *Atmos. Chem. Phys.* 10, 7907–7927, 2010a.
- Arneth, A., Harrison, S. P., Tsigaridis, K., Menon, S., Bartlein, P. J., Feichter, H., Korhola, A., Kulmala, M., O'Donnell, D., Schurgers, G., Sorvari, S., Vesala, T., and Zaehle, S.: Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system: from past to future, *Nature Geoscience*, 3, 525–532, 2010b.
- Arshinov, M. Yu., Belan, B. D., Kozlov, A. V., Antokhin, P. N., Davydov, D. K., and Arshinova, V. G.: Continuous measurements of aerosol size distribution at two Siberian stations: new particle formation bursts, in: European Aerosol Conference, Granada, Spain, 2–7 September 2012, A-WG01S1P25, 2012.
- Asmi E., Freney, E., Hervo, M., Picard, D., Rose, C., Colomb, A., and K. Sellegri :Aerosol cloud activation in summer and winter at puy-de-Dôme high altitude site in France, *J. Atmos. Chem. Phys.*, 12, 11589–11607,doi:10.5194/acp-12-11589-2012, 2012.
- Baklanov, A., and Gordov, E.: *Enviro-RISKS: Man-induced Environmental Risks: Monitoring, Management and Remediation of Man-made Changes in Siberia*, Scientific Report 08-05, DMI Scientific Report 08–05. ISBN: 978-87-7478-571-2, 2007.

- Baklanov, A., Sørensen, J. H., and Mahura, A.: Long-Term Dispersion Modelling. Part I: Methodology for Probabilistic Atmospheric Studies, *J. Comp. Technologies*, 11, 136–156, 2006a.
- Baklanov, A., Mahura, A., Morozov, S., Nazarenko, L., Rigina, O., Tausnev, N., and Koshkin, V.: Modelling of anthropogenic impact on the Arctic environment, Baklanov, A. (Ed.), Russian Academy of Sciences (ISBN 5-91137-007-7; In Russian), 2006b.
- Baklanov, A. A., Gordov E. P., Heimann, M., Kabanov, M. V., Lykosov, V. N., Mahura, A. G., Onuchin, A. A., Penenko, V. V., Pushistov, P. Yu., Shvidenko, A., Tsvetova, E. A., and Zakarin, E. A.: Enviro-RISKS: Man-induced Environmental Risks: Monitoring, Management and Remediation of Man-made Changes in Siberia, in: Baklanov A., and Gordov E. (Eds.), DMI Scientific Report 08-05 (ISBN: 978-87-7478-571-2), 2008.
- Baklanov, A., Mahura, A., and Sokhi, R.: Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models, Springer, 242, doi:10.1007/978-3-642-13980-2, 2011.
- Baklanov, A. A., Penenko, V. V., Mahura, A. G., Vinogradova, A. A., Elansky, N. F., Tsvetova, E. A., Rigina, O. Yu., Maksimenkov, L. O., Nuterman, R. B., Pogarskii, F. A., and Zakey, A.: Aspects of Atmospheric Pollution in Siberia. Chapter 8, in: Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Series: Springer Environmental Science and Engineering. Groisman, P. Y., and Gutman, G. (Eds.), ISBN 978-94-007-4568-1, 303–346, 2012.
- Bastviken, D., Tranvik, L. J., Downing, J. A., Crill, P. M., and Enrich-Prest, A.: Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink, *Science* 331, 50, doi: 10.1126/science.1196808, 2011.
- Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P., and White, J. W. C.: Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years, *Nature*, 488, 70–72, doi:10.1038/nature11299, 2012.
- Battarbee, R. W., Patrick, S., Kernan, M., Psenner, R., Thies, H., Grimalt, J., Rosseland, B. O., Wathne, B., Catalan, J., Mosello, R., Lami, A., Livingstone, D., Stuchlik, E., Straskrabova, V., and Raddum, G.: High mountain lakes and atmospherically transported pollutants. In: Huber, U. M., Bugmann, H. K. M., and Reasoner, M. A. (Eds), *Global Change and Mountain Regions*, Springer, 2005.
- Bauerle, W. L., Bauerle, W. L., Orenc, R., Wayc, D. A., Qian, S. S., Stoyf, P. C., Thorntong, P. E., Bowdena, J. D., Hoffmann, F. M., and Reynolds, R. F.: Photoperiodic regulation of the seasonal pattern of photosynthetic capacity and the implications for carbon cycling, *PNAS*, 109, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1119131109, 2012.
- Berchet, A., Paris, J.-D., Ancellet, G., Law, K. S., Stohl, A., Nédélec, P., Arshinov, M. Yu., Belan, B. D., and Ciais, P.: Tropospheric ozone over Siberia in spring 2010: remote influences and stratospheric intrusion. *Tellus B*, 65, 19688, http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19688, 2013.
- Bergen, K. M., Hitzler, S. K., Kharuk, V. I., Krankina, O. N., Loboda, T. V., Zhao, T., Shugart, H. H., and Sun, G.: Human dimensions of environmental change in Siberia, *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, Groisman, P. Y., and Gutman, G., (Eds), Springer, 251–302, 2013.
- Berry, P. A. M., Garlick, J. D., Freeman, J. A., and Mathers, E. L.: Global inland water monitoring from multi-mission altimetry *GRL*, 32, L16401, doi:10.1029/2005GL022814, 2005.
- Biniotoglou, I., Amodeo, A., D'Amico, G., Giunta, A., Madonna, F., Mona, L., and Pappalardo, G.: Examination of possible synergy between lidar and ceilometer for the monitoring of atmospheric aerosols, *SPIE Europe Remote Sensing, Proc. SPIE* 8182, 818209, 2011.
- Bitukova, V. R., and Kasimov, N. S.: Atmospheric pollution of Russia's cities: assessment of emissions and immissions based on statistical data, *Geofizika*, 29, 53–67, 2012.
- Bitukova, V. R., Kasimov, N. S., and Vlasov, D. V.: Environmental portrait of Russian cities, *J. Ecol. Ind. Russ.*, 4, 6–18, 2010.
- Blacksmith Institute: World's most polluted places, Blacksmith Institute, New York, 2007.
- Bloom, A. A., Palmer, P. I., Fraser, A., Reay, D. S., and Frankenberg, C.: Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data, *Science*, 327(5963), 322–325, doi: 10.1126/science.1175176, 2010.
- Bluhm, B. A., Gebruk, A. V., Gradinger, R., Hopcroft, R. R., Huettmann, F., Kosobokova, K. N., Sirenko, B. I., and Weslawski, J. M.: Arctic Marine Biodiversity: An Update of Species Richness and Examples of Biodiversity Change, *Oceanography*, 24(3), 232–248, 2011.
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J. W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L., and de Vries, W.: Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis, *Ecol. Appl.*, 20, 30–59, 2010.
- Bolin, B., Ciais, P., Cramer, W., Jarvis, P., Kheshgi, H., Nobre, C., Semenov, S., and Steffen, W.: Global perspective, In: Watson, R. T, Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo D. J., and Dokken, D. J. (Eds.), *Land use, land-use change, and forestry, A special report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, 23–51, 2000.

- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E.-G., Carouge, C., Langenfelds, R. L., Lathière, L., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C., and White, J.: Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature*, 443, 439–443, doi:10.1038/nature05132, 2006.
- Boyle, J. F., Mackay, A. W., Rose, N. L., Flower, R. J., and Appleby, P. G.: Sediment heavy metal records in Lake Baikal: natural and anthropogenic sources, *J. Palaeolimnol.*, 20, 135–150, 1998.
- Brunello, A. J., Molotov, V. C., Dugherkhuu, B., Goldman, C., Khamaganova, E., Strijhova, T., and Sigman, R.: Lake Baikal. Experiences and Lessons Learned Brief, Tahoe-Baikal Institute, South Lake Tahoe, CA, USA, 2006.
- Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Boesch, H., Guerlet, S., Dils, B., Aben, I., Armante, R., Bergamaschi, P., Blumenstock, T., Bovensmann, H., Brunner, D., Buchmann, B., Burrows, J. P., Butz, A., Chedin, A., Chevallier, F., Crevoisier, C. D., Deutscher, N. M., Franeenberg, C., Hase, F., Hasekamp, O. P., Heymann, J., Kaminiski, T., Laeng, A., Lichtenberg, G., De Maziere, M., Noel, S., Notholt, J., Orphal, J., Popp, C., Parker, R., Scholze, M., Sussmann, R., Stiller, G. P., Warneke, T., Zehner, C., Bril, A., Crisp, D., Griggith, D. W. T., Kuze, A., O'Dell, C., Oshchepkoc, S., Sherlock, V., Suto, H., Wennberg, P., Wunch, D., Yokota, T., and Yoshida, Y.: The Greenhouse Gas Climate Change Initiative (GHG-CCI): Comparison and quality assessment of near-surface-sensitive satellite-derived CO₂ and CH₄ global data sets, *Remote Sens. Environ.*, 162, 344–362, doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.024, 2015.
- Burrows, J. P., Platt U., and Borrell, P. (Eds.): *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 359–313, doi: 10.1007/978-3-642-14791-3, 2011.
- Byambaa, B., and Todo, Y.: Technological Impact of Placer Gold Mine on Water Quality: Case of Tuul River Valley in the Zaamar Goldfield, Mongolia, *World Academy of Science, Eng. Tech.*, 54, 2011.
- Bäck, J., Aaltonen, H., Hellen, H., Kajos, M. K., Patokoski, J., Taipale, R., Pumpanen, J., and Heinonsalo, J.: Variable emissions of microbial volatile organic compounds (MVOCs) from root-associated fungi isolated from Scots pine, *Atmos. Environ.*, 44, 3651–3659, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.06.042, 2010.
- Böckmann, C., Wandinger, U., Ansmann, A., Bosenberg, J., Amiridis, V., Boselli, A., Delaval, A., De Tomasi, F., Frioud, M., Grigorov, I. V., Hagard, A., Horvat, M., Iarlori, M., Komguem, L., Kreipl, S., Larchevêque, G., Matthias, V., Papayannis, A., Pappalardo, G., Rocadenbosch, F., Rodrigues, J. A., Schneider, J., Shcherbakov, V., and Wiegner, M.: Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2, Aerosol backscatter algorithms, *Appl. Optics*, 43, 977–989, 2004.
- Canfield, D. E., Glazer, A. N., and Falkowski, P. G.: The evolution and future of Earth's nitrogen cycle, *Science*, 330, 192–196, 2010.
- Charlson, R. J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O., and Warren, S. G.: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, 326 (6114), 655–661, 1987.
- Cheng, B., Vihma, T., Pirazzini, R., and Granskog, M.: Modeling of superimposed ice formation during spring snow-melt period in the Baltic Sea, *Ann. Glaciol.*, 44, 139–146, 2006.
- Ciais, P., Janssens, I., Shvidenko, A., Wirth, C., Malhi, Y., Grace, J., Schulze, E. D., Heimann, M., Phillips, O., and Dolman, A. J.: The potential for rising CO₂ to account for the observed uptake of carbon by tropical, temperate, and boreal forests biome, In Griffiths H. & Jarvis P. J. (Eds), *The Carbon Budget of Forest Biomes*, Garland Science/ BIOS Scientific Publishers, 109–149, 2005.
- Cohen, J. L., Furtado, J. C., Barlow, M. A., Alexeev, V. A., and Cherry, J. E.: Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling, *Environ. Res. Lett.*, 7, 014007, doi:10.1088/1748-9326/7/1/014007, 2012.
- Conard, S. G., Sukhinin, A. I., Stocks, B. J., Cahoon, D. R., Davidenko, E. P., and Ivanova, G. A.: Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia, *Climatic Change*, 55, 197–211, 2002.
- Conley, D. J., Paerl, H. Q., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C., and Likens, G. E.: Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus, *Science*, 323, 1014–1015, 2009.
- Crutzen, P. J., Elansky, N. F., Hahn, M., Golitsyn, G. S., Benninkmeijer, C. A. M., Scharffe, D. H., Belikov, I. B., Maiss, M., Bergamaschi, P., Röckmann, T., Grisenko, A. M., and Sevostyanov, V. M.: Trace gas measurements between Moscow and Vladivostok using the Trans-Siberian Railroad, *J. Atmos. Chem.*, 29, 179–194, 1998.
- Dal Maso, M., Sogacheva, L., Aalto, P. P., Riipinen, I., Komppula, M., Tunved, P., Korhonen, L., Suur-Uski, V., Hirsikko, A., Kurtén, T., Kerminen, V.-M., Lihavainen, H., Viisanen, Y., Hansson, H.-C., and Kulmala, M.: Aerosol size distribution measurements at four Nordic field stations: identification, analysis and trajectory analysis of new particle formation bursts, *Tellus*, 59B, 350–361, 2007.

Dal Maso, M., Sogacheva, L., Anisimov, M.P., Arshinov, M., Baklanov, A., Belan, B., Khodzher, T.V., Obolkin, V.A., Staroverova, A., Vlasov, A., Zagaynov, V.A., Lushnikov, A., Lyubovtseva, Yu.S., Riipinen, I., Kerminen, V.-M., and Kummla, M.: Aerosol particle formation events at two Siberian stations inside the boreal forest. *Boreal. Env. Res.* 13, 81–92, 2008.

de Leeuw, G., Kinne, S., Leon, J. F., Pelon, J., Rosenfeld, D., Schaap, M., Veeffkind, P. J., Veihelmann, B., Winker, D. M., and von Hoyningen-Huene, W.: Retrieval of aerosol properties, in: Burrows, J. P., Platt, U., and Borrell, P. (Eds), *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-14791-3, 359-313, 2011.

de Leeuw, G., Holzer-Popp, T., Bevan, S., Davies, W., Descloîtres, J., Grainger, R. G., Griesfeller, J., Heckel, A., Kinne, S., Klüser, L., Kolmonen, P., Litvinov, P., Martynenko, D., North, P. J. R., Ovigneur, B., Pascal, N., Poulsen, C., Ramon, D., Schulz, M., Siddans, R., Sogacheva, L., Tanré, D., Thomas, G. E., Virtanen, T. H., von Hoyningen Huene, W., Vountas, M., and Pinnock, S.: Evaluation of seven European aerosol optical depth retrieval algorithms for climate analysis, *Remote Sens. Environ.*, 162, 295–315, doi:10.1016/j.rse.2013.04.023, 2015.

De Roure, D., and Goble, C.: myExperiment—A Web 2.0 Virtual Research Environment, in: *International Workshop on Virtual Research Environments and Collaborative Work Environments*, Edinburgh, UK, <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/263961>, 2007.

Dentener, F., Drevet, J., Lamarque, J. F., Bey, I., Eickhout, B., Fiore, A. M., Hauglustaine, D., Horowitz, L. W., Krol, M., Kulshrestha, U. C., Lawrence, M., Galy-Lacaux, C., Rast, S., Shindell, D., Stevenson, D., Noije, T. V., Atherton, C., Bell, N., Bergman, D., Butler, T., Cofala, J., Collins, B., Doherty, R., Ellingsen, K., Galloway, J., Gauss, M., Montanaro, V., Müller, J. F., Pitari, G., Rodriguez, J., Sanderson, M., Solmon, F., Strahan, S., Schultz, M., Sudo, K., Szopa, S., and Wild, O.: Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation, *Global Biogeochemical Cycles*, 20(21), 2006.

Denton, F., Wilbanks, T. J., Abeyasinghe, A. C., Burton, I., Gao, Q., Lemos, M. C., Masui, T., O'Brien, K. L., and Warner, K.: Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1101-1131, 2014.

Ding, A. J., Wang, T., Thouret, V., Cammas, J.-P., and Nédélec, P.: Tropospheric ozone climatology over Beijing: analysis of aircraft data from the MOZAIC program, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1–13, doi:10.5194/acp-8-1-2008, 2008.

Ding, J., Zhong, J., Yang, Y., Li, B., Shen, G., Su, Y., Wang, C., Li, W., Shen, H., Wang, B., Wang, R., Huang, Y., Zhang, Y., Cao, H., Zhun, Y., Simonich, S. L. M., and Tao, S.: Occurrence and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in a rural Chinese home through biomass fuelled cooking, *Environ. Poll.*, 169, 160–166, 2012.

Ding, A. J., Fu, C. B., Yang, X. Q., Sun, J. N., Peteja, T., Kerminen, V.-M., Wang, T., Xie, Y., Herrmann, E., Zheng, L. F., Nie, W., Liu, Q., Wei, X.L., and Kulmala, M.: Intense atmospheric pollution modifies weather: a case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in the eastern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 10545–10554, doi:10.5194/acp-13-10545-2013, 2013a

Ding, A. J., Fu, C. B., Yang, X. Q., Sun, J. N., Zheng, L. F., Xie, Y. N., Hermann, E., Nie, W., Petäjä, T., Kerminen, V.-M., and Kulmala, M.: Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5813–5830, doi:10.5194/acp-13-5813-2013, 2013b.

Dlugokencky, E. J., Bruhwiler, L., White, J. W. C., Emmons, L. K., Novelli, P. C., Montzka, S. A., Masarie, K. A., Lang, P. M., Crotwell, A. M., Miller, J. B., and Gatti, L. V.: Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18803, doi:10.1029/2009GL039780, 2009.

Dohan, K., and Maximenko, N.: Monitoring ocean currents with satellite sensors, *Oceanography*, 23(4), 94–103, doi:10.5670/oceanog.2010.08, 2010.

Dolman, A. J., Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Ciais, P., Tchepakova, N., Chen, T., van der Molen, M. K., Beletti Marchesini, L., Maximov, T. C., Maksyutov, S., and Schulze, E.-D.: An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, *Biogeosciences*, 9, 5323–5340, doi:10.5194/bg-9-5323-2012, 2012.

van Donkelaar, A., Randall M., Martin, V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., and Villeneuve, P.J.: Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application, *Environ Health Perspect.* 2010 Jun; 118(6): 847–855, doi: 10.1289/ehp.0901623 . 2010.

Dooley, S., and Treseder, K.: The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies, *Biogeochemistry*, 109, 49, 2012.

Drake, J. E., Gallet-Budynek, A., Hofmockel, K. S., Bernhardt, E., Billings, S., Jackson, R. B., Johnsen, K.S., Lichter, J., McCarthy, H. R., McCormack L., Moore, D., Oren, R., Palmroth, S., Phillips, R. P., Phippen, J. S., Pritchard, S., Treseder, K. K.,

- Schlesinger, W. H., DeLucia, E., and Finzi, A. C.: Increases in the flux of carbon belowground stimulate nitrogen uptake and sustain the long-term enhancement of forest productivity under elevated CO₂, *Ecol. Lett.*, 14, 349–357, doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01593.x, 2011.
- Duncan, B. N., and Bey, I.: A modeling study of the export pathways of pollution from Europe: Seasonal and interannual variations (1987-1997), *J. Geophys. Res.*, 109, D08301, doi:10.1029/2003JD004079, 2004.
- Elansky, N. F.: Russian Studies of Atmospheric Ozone in 2007-2011, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 48(3), 281–298, 2012.
- Elberling, B., Christiansen, H. H., and Hansen, B. U.: High nitrous oxide production from thawing permafrost, *Nature Geoscience*, 3, 332–335, 2010.
- Erisman, J. W., Grinsven, H. V., Grizzetti, B., Bouraoui, F., and Powlson, D.: The European nitrogen problem in a global perspective, in: Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., and Hansen, J. (Eds.), *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2011.
- Esau, I. N., and Zilitinkevich, S. S.: On the role of the planetary boundary layer depth in the climate system, *Adv. Sci. Res.*, 4, 63–69, doi:10.5194/asr-4-63-2010, 2010.
- European Nitrogen Assessment, Sutton, M. A., Howard, C. M., Willem Erisman, J., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., and Grizzetti, B. (Eds.), Cambridge University Press, 2010.
- Farré, A. B., Stephenson, S. R., Chen, L., Czub, M., Dai, Y., Demchev, D., Efimov, Y., Graczyk, P., Grythe, H., Keil, K., Kivekäs, N., Kumar, N., Liu, N., Matelenok, I., Myksovoll, M., O'Leary, D., Olsen, J., Pavithran, S., Petersen, E., Raspotnik, A., Ryzhov, I., Solski, J., Suo, L., Troein, C., Valeeva, V., van Rijckevorsel, J., and Wighting, J.: Commercial Arctic shipping through the Northeast Passage: routes, resources, governance, technology, and infrastructure, *Polar Geography*, 37(4), 2014.
- Faubert, P., Tiiva, P., Michelsen, A., Rinnan, Å., Ro-Poulsen, H., and Rinnan, R.: The shift in plant species composition in a subarctic mountain birch forest floor due to climate change would modify the biogenic volatile organic compound emission profile, *Plant and Soil*, 352, 199–215, doi:10.1007/s11104-011-0989-2, 2012.
- Fehsenfeld, F. C., Ancellet, G., Bates, T. S., Goldstein, A. H., Hardesty, M., Honrath, R., Law, K. S., Lewis, A. C., Leaitch, R., McKeen, S., Meagher, J., Parrish, D. D., P. Pszenny, A. A., Russell, P. B., Schlager, H., Seinfeld, J., Talbot, R., Zbinden, R.: International Consortium for Atmospheric Research on Transport and Transformation (ICARTT): North America to Europe-Overview of the 2004 summer field study, *J. Geophys. Res.*, 111, D23S01, doi:10.1029/2006JD007829, 2006.
- Feuchtmayr, H., Moran, R., Hatton, K., Cannor, L., Yeyes, T., Harley, J., Arkinson, D.: Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms, *J. Appl. Ecol.*, 46, 713–723, 2009.
- Fiore, A. M., Dentener, F. J., Wild, O., Cuvelier, C., Schultz, M. G., Hess, P., Textor, C., Schulz, M., Doherty, R. M., Horowitz, L. W., MacKenzie, I. A., Sanderson, M. G., Shindell, D. T., Stevenson, D. S., Szopa, S., Van Dingenen, R., Zeng, G., Atherton, C., Bergmann, D., Bey, I., Carmichael, G., Collins, W. J., Duncan, B. N., Faluvegi, G., Folberth, G., Gauss, M., Gong, S., Hauglustaine, D., Holloway, T., Isaksen, I. S. A., Jacob, D. J., Jonson, J. E., Kaminski, J. W., Keating, T. J., Lupu, A., Marmer, E., Montanaro, V., Park, R. J., Pitari, G., Pringle, K. J., Pyle, J. A., Schroeder, S., Vivanco, M. G., Wind, P., Wojcik, G., Wu, S., and Zuber, A.: Multimodel estimates of intercontinental source-receptor relationships for ozone pollution, *J. Geophys. Res.*, 114, D04301, doi:10.1029/2008JD010816, 2009.
- Fisher, J. B., Tu, K. P., and Baldocchi, D. D.: Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites, *Remote Sensing of Environment*, 112, 901–919, 2008.
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Hess, P. G., Mahowald, N. M., Painter, T. H., Ramanathan, V., and Rasch, P. J.: Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2481–2497, 2009.
- Flanner, M. G., Shell, K. M., Barlage, M., Perovich, D. K., and Tschudi, M. A.: Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008, *Nature Geoscience*, 4, 151–155, 2011.
- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., Turetsky, M. R., and Wotton, B. M.: Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest, *Global Change Biology*, 15, 549–560, 2009.
- Flint, M. V. (Ed.), *Ecosystem of the Kara Sea*, *Oceanology*, 50(5), 637–820, 2010.
- Frolking, S., Talbot, J., Jones, M. C., Treat, C. C., Kauffman, J. B., Tuittila, E.-S., and Roulet R.: Peatlands in the Earth's 21st century climate system, *Environmental Reviews*, 19, 371–396, doi: 10.1139/a11-014, 2011.
- Füssel H.M. and Klein, R.J.T.: *Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking*, *Climatic Change* (2006) 75: 301. doi:10.1007/s10584-006-0329-3, 2006.
- Garmaev, E. Z. and Khristoforov, A. V.: *Water resources of Rivers in Lake Baikal Basin: Principles of their use and production*, Novosibirsk (in Russia), GEO, 2010.

- Gilman, J. B., Burkhardt, J. F., Lerner, B. M., Williams, E. J., Kuster, W. C., Goldan, P. D., Murphy, P. C., Warneke, C., Fowler, C., Montzka, S. A., Miller, B. R., Miller, L., Oltmans, S. J., Ryerson, T. B., Cooper, O. R., Stohl, A., and de Gouw, J. A.: Ozone variability and halogen oxidation within the Arctic and sub-Arctic springtime boundary layer, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 10223–10236, doi:10.5194/acp-10-10223-2010, 2010.
- Glezer, O. B.: Population and Its Settlement Pattern, in: *Space, Population, and Economics of Yugra. Socioeconomic Transformation of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug*, Artobolevsky, S. S., Glezer, O. B. (Eds.), *Ekonomist*, 169-191, (in Russian), 2007a.
- Glezer O. B.: The Development of the North Abroad: Experience and Lessons, *Environmental Planning and Management*, 4(5), 62–76, (in Russian), 2007b.
- Glindemann, D., Edwards, M., Liu, J., and Kuschik, P.: Phosphine in soils, sludges, biogases and atmospheric implications—a review, *Ecological Engineering*, 24, 457–463, 2005.
- Global Forest Watch, WRI, 2002 <http://www.globalforestwatch.org/>
- Goldenson, N., Doherty, K. S., Bitz, C. M., Holland, M. M., Light, B., and Conley, A. J.: Arctic climate response to forcing from light-absorbing particles in snow and sea ice in CESM, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 7903–7920, 2012.
- Gordov, E. P., Lykosov, V. N., Krupchatnikov, V. N., Okladnikov, I. G., Titov, A., G., and Shulgina, T. M.: Computational and information technologies for monitoring and modeling of climate changes and their consequences, Novosibirsk: Nauka, Siberian branch, (in Russian), 2013.
- Gordova, Yu.E., Genina, E.Yu., Gorbatenko, V. P., Gordov, E. P., Kuzhevskaya, I. V., Martynova, Yu.V., Okladnikov, I. G., Titov, A. G., Shulgina, T. M., and Barashkova, N. K.: Support of the educational process in modern climatology within based on the web-GIS platform Climate. Open and Distant Education, 1(49), 14–19, (in Russian), 2013.
- Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., and D’Angiola, A.: Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 periods, *Climatic Change*, 109, 163–190, 2011.
- Granina, L. Z.: The chemical budget of Lake Baikal – A review, *Limnol. Oceanogr.*, 42(2), 373–378, 1997.
- Gray, P. A.: Chukotka reindeer husbandry in the post-socialist transition, *Polar Research*, 19(1), 31–37, 2000.
- Greiving, S., Fleischhauer, M., and Lückenkötter, J.: A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards, *Journal of environmental planning and management*, 49(1), 1–19, 2006.
- Groisman, P. Ya., Gutman, G., Shvidenko, A. Z., Bergen, K., Baklanov, A. A., and Stackhouse Jr., P. W.: Introduction—Regional features of Siberia, in: Groisman, P. Ya., and Gutman, G. (Eds), *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, Springer, 1-17, 2013.
- cited in text only Groisman and Gutman, 2013 Groisman, P. Y., Gutman, G., Shvidenko, A. Z., Bergen, K., Baklanov, A. A., and Stackhouse Jr., P. W.: Introduction – Regional features of Siberia, in: *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, edited by: Groisman, P. Y. and Gutman, G., Springer Science C Business Media, Dordrecht, the Netherlands, 1–17, 2013.
- Gromtsev, A.: Natural Disturbance Dynamics in Boreal Forests of European Russian: a Review, *Silva Fenn.* 36(1), 41, 2002
- Grote, R., and Niinemets, Ü.: Modeling volatile isoprenoid emissions – a story with split ends, *Plant Biol.*, 10, 8–28, 2008.
- Guan, T., Yao, M., Wang J., Fang, Y., Hu, S., Wang, Y., Dutta, A., Yang, J., Wu, Y., Hu, M., and Zhu, T.: Airborne endotoxin in fine particulate matter in Beijing, *Atmos. Environ.*, 97, 35–42, 2014.
- Guenther, A. B., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., and Wang, X.: The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1471–1492, doi:10.5194/gmd-5-1471-2012, 2012.
- Gurney, K. R., Rachel, M., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Baker D., Bousquet, Ph., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, Ph., Fan, S., Fung, I. Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, Sh., Masarie, K., Peylin, Ph., Prather, M., Pak, B. C., Randerson, J., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T., and Yuen, C.-W.: Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models, *Nature*, 415(6872), 626–630, 2002.
- Gustafson, E. J.: When relationships estimated in the past cannot be used to predict the future: using mechanistic models to predict landscape ecological dynamics in a changing world, *Landscape Ecology*, 28, 1429–1437, 2013.
- Gustafson, E. J., Sturtevant, B. R., Shvidenko, A. Z., and Sheller, R. M.: Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia, *Ecological Application*, 20, 700–715, 2010.
- Gruber, N., and Galloway, J. N.: An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle, *Nature*, 451, 293–296, 2008.

- Han, L., Hana, L., Zhoua, W., Lia, W., Lib L.: Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities, *Environmental Pollution*, 163–170, 2014.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., and Lo, K.: Global surface temperature change, *Rev. Geophys.*, 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345, 2010.
- Harden, J. W., Trumbore, S. E., Stocks, B. J., Hirsch, A., Gower, S. T., O'Neill, K. P., and Kasischke, E. S.: The role of fire in the boreal carbon budget. *Global Change Biology*, 6, 174–184, doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.06019.x, 2000.
- Hari, P., and Kulmala, M.: Station for measuring ecosystem–atmosphere relations (SMEAR II), *Boreal. Environ. Res.*, 10, 315–322, 2005.
- Hari, P., Kulmala, M., Pohja, T., Lahti, T., Siivola, E., Palva, E., Aalto, P., Hämeri, K., Vesala, T., Luoma, S., and Pulliainen, E.: Air pollution in eastern Lapland: challenge for an environmental measurement station, *Silva Fennica*, 28(1), 29–39, 1994.
- Hari, P., Andreae, M. O., Kabat, P., and Kulmala, M.: A comprehensive network of measuring stations to monitor climate change, *Boreal Env. Res.*, 14, 442–446, 2009.
- Hari, P., Petäjä, T., Bäck, J., Kerminen, V.-M., Lappalainen, H. K., Vihma, T., Laurila, T., Viisanen, Y., Vesala, T., and Kulmala, M.: Conceptual design of a measurement network of the global change, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 1017–1028, doi:10.5194/acp-16-1017-2016, 2016.
- Hatakka, J., Aalto, T., Aaltonen, V., Aurela, M., Hakola, H., Komppula, M., Laurila, T., Lihavainen, H., Paatero, J., Salminen, K., and Viisanen, Y.: Overview of the atmospheric research activities and results at Pallas GAW station, *Boreal Env. Res.*, 8, 365–383, 2003.
- Havlik et al., Global land-use implications of first and second generation biofuel targets, *Energy Policy*, 39, 5690–5702, 2011.
- Heese, B., Flentje, H., Althausen, D., Ansmann, A., Frey, S.: Ceilometer lidar comparison: backscatter coefficient retrieval and signal-to-noise ratio determination, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1763–1770, 2010.
- Heimann, M., and Reichstein, M.: Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks, *Nature*, 451, 289–292, doi:10.1038/nature06591, 2008.
- Heiskanen, J. J., Mammarella, I., Haapanala, S., Pumpanen, J., Vesala, T., MacIntyre, S., and Ojala, A.: Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake, *Tellus B*, 66, 22827, doi.org/10.3402/tellusb.v66.22827, 2014.
- Hemispheric Transport of Air Pollution Working Group (HTAP): Hemispheric transport of air pollution: Part A: ozone and particulate matter, in: *Air pollution Studies 17*, Dentener, F., Keating, T., and Akimoto, H. (Eds.), United Nations, Geneva, 2010.
- Hickler, T., Vohland, K., Feehan, J., Miller, P. A., Smith, B., Costa, L., Giesecke, T., Fronzek, S., Carter, T. R., Cramer, W., Kühn, I., and Sykes, M. T.: Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model, *Global Ecology and Biogeography*, 21(1), 50–63, 2012.
- Hill, V., and Cota, G.: Spatial patterns of primary production on the shelf, slope and basin of the Western Arctic in 2002, *Deep-Sea Research II*, 52, 3369–3354, 2005.
- Hiyama, T., and Inoue, G.: Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia, In: *Natural resources development, population and environment in Russia: Their Present and Future in Relation to Japan*, in: *Proc 2nd Russian-Japanese Seminar*, Moscow, Russia, September 13–14, 8-13, 2010.
- Holling, C.S.: Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23, doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245, 1973.
- Holsten, A., and Kropp, J. P.: An integrated and transferable climate change vulnerability assessment for regional application, *Natural hazards*, 64(3), 1977–1999, 2012.
- Holzer-Popp, T., de Leeuw, G., Griesfeller, J., Martynenko, D., Klüser, L., Bevan, S., Davies, W., Ducos, F., Deuzé, J. L., Grainger, R. G., Heckel, A., von Hoyningen-Hüne, W., Kolmonen, P., Litvinov, P., North, P., Poulsen, C. A., Ramon, D., Siddans, R., Sogacheva, L., Tanre, D., Thomas, G. E., Vountas, M., Descloitres, J., Griesfeller, J., Kinne, S., Schulz, M., and Pinnock, S.: Aerosol retrieval experiments in the ESA Aerosol_cci project, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1919–1957, doi:10.5194/amt-6-1919-2013, 2013, 2013.
- Honda, M., Inoue, J., and Yamane, S.: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophysical Research Letters*, 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079, 2009.
- Hoose, C., and Möhler, O.: Heterogeneous ice nucleation of atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 9817–9854, 2012.

- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G. J., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F., Wolff, D. B.: The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *J. Hydrometeorology*, 8, 38–55, 2007.
- Hunt, A., and Watkiss, P.: Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature, *Climatic Change*, 104, 13–49, 2011.
- Hunter, M., Kozlov, M. V., Itämies, J., Pullainen, E., Bäck, J.: Current temporal trends in moth abundance are counter to predicted effects of climate change in an assemblage of subarctic forest moths, *Global Change Biology*, 2014.
- Huotari, J., Ojala, A., Peltomaa, E., Nordbo, A., Launiainen, S., Pumpanen, J. and Vesala, T.: Long term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data, *Geophysical Research Letters*, 38, L18401, doi:10.1029/2011GL048753, 2011.
- Hytteborn, H., Maslov, A. A., Nazimova, D. I., Rysin, L. P.: Boreal forests of Eurasia, in: Andersson, F. (Ed.), *Coniferous Forests, Ecosystems of the World*, Elsevier, Amsterdam, 23–99, 2005.
- IEAS: The state of China's cities 2012/2013, Beijing, Foreign Languages Press, 2012.
- Illingworth, A. J., Hogan, R. J., O'Connor, E. J., Bouniol, D., Delanoe, J., Pelon, J., Protat, A., Brooks, M. E., Gaussiat N., Wilson, D. R., Donovan, D. P., Klien Baltink H., van Zadelhoff, G. J., Eastment, J. D., Goddard, J. W. F., Wrench, C. L., Haeffelin, M., Krasnov, O. A., Russchenberg, W. J., Piriou, J. M., Vinit, F., Seifert, A., Tompkins, A. M., and Willen, U.: Cloudnet, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 883–898, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-88-6-883>, 2007.
- Inoue, J., Enomoto, T., Miyoshi, T., and Yamane, S.: Impact of observations from Arctic drifting buoys on the reanalysis of surface fields, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08501, doi:10.1029/2009GL037380, 2009.
- Inst. Health Metrics & Evaluation (IHME): Global burden of diseases, injuries, and risk factors study 2010. GBD profile: China, www.healthmetricsandevaluation.org/gbd/country-profiles, 2013.
- IPCC: Climate Change: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2013.
- IPCC: Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2014.
- IPCC SRES: Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Nakićenović, N. and Swart, R., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Barros, V. R., Field, C. B., Dokken, D. J., Mastrandrea, M. E., Mach, K. J., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- Isidorov, V. A.: Organic chemistry of the atmosphere, Khimizdat, Moscow, Russia (in Russian), 2001.
- Izaurrealde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N.J., and Jakas, M. C. Q.: Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data, *Ecol. Model.*, 192, 362–384, 2006.
- Jafarov, E. E., Romanovsky, V. E., Genet, H., McGuire, A. D., and Marchenko, S. S.: The effects of fire on the thermal stability of permafrost in lowland and upland black spruce forests of interior Alaska in a changing climate, *Environ. Res. Lett.*, 8(3), 035030, doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035030, 2013.
- Jaffe, D. A., and Wigder, N. L.: Ozone production from wildfires: a critical review, *Atmos. Environ.*, 51, 1–10, 2012.
- Janssens, I. A., Fribauer, A., Schlamadinger, B., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, A. J., Heimann, M., Nabuurs, G.-J., Smith, P., Valentini, R., and Schulze, E.-D.: The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – A European Case Study, *Biogeosciences*, 2(1), 15–26, 2005.
- Jonsson, M., and Wardle, D. A.: Structural equation modeling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems, *Biology Letters*, 6, 116–119, 2010.
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., and Xie, P. P.: CMORPH—A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution, *J. Hydrometeorology*, 5, 487–503, 2004.

- Junninen, H., Lauri, A., Keronen, P., Aalto, P., Hiltunen, V., Hari, P., and Kulmala, M.: Smart-SMEAR: on-line data exploration and visualization tool for SMEAR stations, *Boreal Env. Res.*, 1447–457, 2009.
- Järvi, L., Hannuniemi, H., Hussein, T., Junninen, H., Aalto, P. P. and co-authors. 2009a. The urban measurement station SMEAR III: continuous monitoring of air pollution and surface-atmosphere interactions in Helsinki, Finland. *Boreal Environ. Res.* 14, 86–109.
- Kalinina, O., Goryachkin, S. V., Karavaeva, N. A., Lyuri, D. I., Najdenko, L., and Giani, L.: Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern Taiga of Russia: Soil development, nutrient status, and carbon dynamics, *Geoderma*, 152: 35–42, 2009.
- Karhu, K., Auffret, M. D., Dungait, J. A. J., Hopkins, D. W., Prosser, J. I., Singh, B. K., Subke, J.-A., Wookey, P. A., Ågren, G. I., Sebastia, M.-T., Gouriveau, F., Bergkvist, G., Meir, P., Nottingham, A. T., Salina, N., and Hartley, I. P.: Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response, *Nature*, 513, 81–84, doi:10.1038/nature13604, 2014.
- Karpoff, B. S. and Roscoe, W. E.: Report on Placer Gold Properties in the Tuul Valley, Zaamar Goldfield, Mongolia, Roscoe Postle Associates INC, Toronto, Ontario, 1–66, 2005.
- Kasimov, N., and Kisllov, A. (Eds.): Environmental and geographical consequences of the global warming for the East European Plain and the Western Siberia, Moscow, Russia (in Russian), 2011.
- Kasischke, E.S.: Boreal ecosystems in the global carbon cycle, in: Fire, Climate Change and Carbon Cycling in the Boreal Forest, Kasischke, E.S., Stocks, B.J. (Eds.), *Ecological Studies*, 138, 19–30, 2000.
- Kay, J. E., L'Ecuyer, T., Gettelman, A., Stephens, G., and O'Dell, C.: The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08503, doi:10.1029/2008GL033451, 2008.
- Khvorostyanov, D. V., Ciais, P., Krinner, G., and Zimov, S. A.: Vulnerability of east Siberia's frozen carbon stores to future warming, *Geophys. Res. Lett.* 35, L10703, 2008.
- Kirkby, J., Curtius, J., Aleida, J., Dunne, E., Duplissy, J., Ehrhart, S., Franchin, A., Gagne, S., Ickes, L., Kürten, A., Kupc, A., Metzger, A., Riccobono, F., Rondo, L., Schobesberger, S., Tsagkogeorgas, G., Wimmer, D., Amorim, A., Bianchi, F., Breitenlechner, M., Dabid, A., Dommen, J., Downard, A., Ehn, M., Flagan, R. C., Haider, S., Hansen, A., Hauser, D., Jud, W., Junninen, H., Kreissl, F., Kvashin, A., Laaksonen, A., Lehtipalo, K., Lima, J., lovejoe, E., Makhmutov, V., Mathot, S., Mikkilä, J., Minginette, P., Mogo, S., Nieminen, T., Onnela, A., Pereira, P., Petäjä, T., Schnitzhofer, R., Seinfeld, J. H., Sipilä, M., Stozhkov, Y., Stratmann, F., Tomé, A., Vanhanen, J., Viisanen, Y., Vrtala, A., Wagner, P. E., Walther, H., Weingartner, W., Wex, H., Winkler, P. M., Carslaw, K. S., Worsnop, D. R., Baltensperger, U, and Kulmala, M: Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation, *Nature*, 476, 429–433, doi:10.1038/nature10343, 2011.
- Klein, R. J. T. and Juhola, S.: A framework for Nordic actor-oriented climate adaptation research, *Environmental Science & Policy*. 40, s. 101-115, 2014
- Klemas, V.: Remote Sensing of sea Surface Salinity: An overview with case studies, *Journal of Coastal Research*, 27(5), 830–838. 2011.
- Koch, D., and Del Genio, A. D.: Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7685–7696, 2010.
- Kokhanovsky, A. A., and de Leeuw, G. (Eds.): *Satellite Aerosol Remote Sensing Over Land*, Springer-Praxis, Berlin, Germany, 2009.
- Korhonen, J. F. J., Pihlatie, M., Pumpanen, J., Aaltonen, H., Hari, P., Levula, J., Kieloaho, A.-J., Nikinmaa, E., Vesala, T., and Ilvesniemi, H.: Nitrogen balance of a boreal Scots pine forest, *Biogeosciences*, 10, 1083–1095, 2013.
- Korontzi, S., McCarty, J., Loboda, T., Kumar, S., and Justice, C.: Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, *Global Biogeochem Cycles*, 20, GB2021, doi:10.1029/2005GB002529, 2006.
- Kortelainen, P., Rantakari, M., Huttunen, J. T., Mattsson, T., Alm, J., Juutinen, S., Larmola, T., Silvola, J., and Marikainen, P.: Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes, *Global Change Biology*, 12, 1554–1567, 2006.
- Korytnyi, L. M.: Urgent tasks of geographical resources management, in: edited by: Vaganov, E. A. et al.: *Resource Economics, Environmental Economics and Climate Change*, Materials of the International Conference, July, 1–7, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, 359–366, 2009.
- Kosobokova, K. N.: *Zooplankton of the Arctic Basin*, GEOS, Moscow, 2012.

- Kotilainen, J., Tysiachniouk, M., Kuliassova, A., Kuliassov, I., and Pchelkina, S.: The potential for ecological modernisation in Russia: scenarios from the forest industry, *Environmental Politics*, 17, 1, 58–77, 2008.
- Kozlova, E. A., Manning, A. C., Kisilyakhov, Y., Seifert, T., and Heimann, M.: Seasonal, synoptic, and diurnal-scale variability of biogeochemical trace gases and O₂ from a 300-m tall tower in central Siberia, *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB4020, doi:10.1029/2008GB003209, 2008.
- Krankina, O. N., Dixon, R. K., Kirilenko, A. P., and Kobak, K. I.: Global climate change adaptation: Examples from Russian boreal forests, *Climatic Change*, 36, 197–216, 1997.
- Kukkola, E., Huttunen, S., Bäck, J., and Rautio, P.: Scots pine needle injuries at subarctic industrial sites, *Trees* 11, 378–387, 1997.
- Kulmala, L., Aaltonen, H., Berninger, F., Kieloaho, A.-J., Levula, J., Bäck, J., Hari, P., Kolari, P., Korhonen, J. F. J., Kulmala, M., Nikinmaa, E., Pihlatie, M., Vesala, T., and Pumpanen, J.: Changes in biogeochemistry and carbon fluxes in a boreal forest after the clear-cutting and partial burning of slash, *Agric. Forest Meteorol.*, 188, 33–44, 2014a.
- Kulmala, M., and Petäjä, T.: Soil nitrites influence atmospheric chemistry, *Science* 333, 1586–1587, 2011.
- Kulmala, M., Dal Maso, M., Mäkelä, J. M., Pirjola, L., Väkevä, M., Aalto, P., Miikkulainen, P., Hämeri, K., and O'Dowd, C. D.: On the formation, growth and composition of nucleation mode particles, *Tellus B*, 53, 479–490, 2001.
- Kulmala, M., Suni, T., Lehtinen, K. E. J., Dal Maso, M., Boy, M., Reissell, A., Rannik, Ü., Aalto, P., Keronen, P., Hakola, H., Bäck, J., Hoffmann, T., Vesala, T., and Hari, P.: A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 557–562, doi:10.5194/acp-4-557-2004, 2004.
- Kulmala, M., Asmi, A., Lappalainen, H. K., Carslaw, K. S., Pöschl, U., Baltensperger, U., Hov, Ø., Brenguier, J.-L., Pandis, S. N., Facchini, M. C., Hansson, H.-C., Wiedensohler, A., and O'Dowd, C. D.: Introduction: European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) - integrating aerosol research from nano to global scales, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2825–2841, 2009.
- Kulmala, M., Alekseychik, P., Paramonov, M., Laurila, T., Asmi, E., Arneth, A., Zilitinkevich, S., and Kerminen, V.-M.: On measurements of aerosol particles and greenhouse gases in Siberia and future research needs, *Boreal Env. Res.*, 16, 337–362, 2011a.
- Kulmala, M., Asmi, A., Lappalainen, H. K., Baltensperger, U., Brenguier, J.-L., Facchini, M. C., Hansson, H.-C., Hov, Ø., O'Dowd, C. D., Pöschl, U., Wiedensohler, A., Boers, R., Boucher, O., de Leeuw, G., Denier van der Gon, H. A. C., Feichter, J., Krejci, R., Laj, P., Lihavainen, H., Lohmann, U., McFiggans, G., Mentel, T., Pilinis, C., Riipinen, I., Schulz, M., Stohl, A., Swietlicki, E., Vignati, E., Alves, C., Amann, M., Ammann, M., Arabas, S., Artaxo, P., Baars, H., Beddows, D. C. S., Bergström, R., Beukes, J. P., Bilde, M., Burkhardt, J. F., Canonaco, F., Clegg, S. L., Coe, H., Crumeyrolle, S., D'Anna, B., Decesari, S., Gilardoni, S., Fischer, M., Fjaeraa, A. M., Fountoukis, C., George, C., Gomes, L., Halloran, P., Hamburger, T., Harrison, R. M., Herrmann, H., Hoffmann, T., Hoose, C., Hu, M., Hyvärinen, A., Hörrak, U., Iinuma, Y., Iversen, T., Josipovic, M., Kanakidou, M., Kiendler-Scharr, A., Kirkevåg, A., Kiss, G., Klimont, Z., Kolmonen, P., Komppula, M., Kristjánsson, J.-E., Laakso, L., Laaksonen, A., Labonnote, L., Lanz, V. A., Lehtinen, K. E. J., Rizzo, L. V., Makkonen, R., Manninen, H. E., McMeeking, G., Merikanto, J., Minikin, A., Mirme, S., Morgan, W. T., Nemitz, E., O'Donnell, D., Panwar, T. S., Pawlowska, H., Petzold, A., Pienaar, J. J., Pio, C., Plass-Duelmer, C., Prévôt, A. S. H., Pryor, S., Reddington, C. L., Roberts, G., Rosenfeld, D., Schwarz, J., Seland, Ø., Sellegri, K., Shen, X. J., Shiraiwa, M., Siebert, H., Sierau, B., Simpson, D., Sun, J. Y., Topping, D., Tunved, P., Vaattovaara, P., Vakkari, V., Veefkind, J. P., Visschedijk, A., Vuollekoski, H., Vuolo, R., Wehner, B., Wildt, J., Woodward, S., Worsnop, D. R., van Zadelhoff, G.-J., Zardini, A. A., Zhang, K., van Zyl, P. G., Kerminen, V.-M., Carslaw, K. S., and Pandis, S. N.: General overview: European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) – integrating aerosol research from nano to global scales, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13061–13143, 2011b.
- Kulmala, M., Nieminen, T., Chellapermal, R., Makkonen, R., Bäck, J., and Kerminen, V.-M.: Climate feedbacks linking the increasing atmospheric CO₂ concentration, BVOC emissions, aerosols and clouds in forest ecosystems. In: *Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions*, Niinemets, Ü, and Monson, R. K (Eds.), Springer, 489–508, 2013.
- Kulmala, M., Nieminen, T., Nikandrova, A., Lehtipalo, K., Manninen, H. E., Kajos, M. K., Kolari, P., Lauri, A., Petäjä, T., Krejci, R., Hansson, H.-C., Swietlicki, E., Lindroth, A., Christensen, T. R., Arneth, A., Hari, P., Bäck, J., Vesala, T., and Kerminen, V.-M.: CO₂-induced terrestrial climate feedback mechanism: From carbon sink to aerosol source and back, *Boreal Env. Res.*, 19, Suppl. B, 122–131, 2014b.
- Kummerow, C., Hong, Y., Oleson, W. S., Yang, S., Adler, R. F., Mccollum, J., Ferraro, R., Petty, G., Shin, D. B., and Wilheit, T. T.: The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, *J. Applied Meteorology*, 40, 1801–1820, 2001.
- Kurz, W.A., Apps, M. J.: An analysis of future carbon budgets of Canadian boreal forests, *Water Air Soil Pollut.*, 82, 321–331, 1995.

- Kurz, W. A., Stinson, G., Rampley, G. J., Dymond, C. C., and Neilson, E. T.: Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain, *PNAS*, 105(5), 1551–1555, doi:10.1073/pnas.0708133105, 2008.
- Kuzminov, I.F.: Socio-economic challenges to the timber industry in North-European part of Russia (case-study of the Kostroma Oblast), *Regional Research of Russia*, 2011, 1(1), 41–51, 2011.
- Kuzyakov, Y.: Priming effects: Interactions between living and dead organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (9), 1363–1371, 2010.
- Kvaeven, B., Ulstein, M. J., Skjelkvåle, B. L.: ICP Waters – An international programme for surface water monitoring, *WaterAir Soil Pollut.*, 130, 775–780, 2001.
- Kyrö, E.-M., Väänänen, R., Kerminen, V.-M., Virkkula, A., Petäjä, T., Asmi, A., Dal Maso, M., Nieminen, T., Juhola, S., Shcherbinin, A., Riipinen, I., Lehtipalo, K., Keronen, P., Aalto, P. P., Hari, P., and Kulmala, M.: Trends in new particle formation in Eastern Lapland, Finland: effect of decreasing sulfur emissions from Kola Peninsula, *Atmos. Chem. Phys.* 14, 4383–4396, 2014.
- Lapenis, A., Shvidenko, A., Shepaschenko, D., Nilsson, S., and Aiyyer, A.: Acclimation of Russian forests to recent changes in climate, *Global Change Biology*, 11, 2090–2102, 2005.
- Lappalainen, H. K., Petäjä, T., Kujansuu, J., and Kerminen, V.-M.: Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern Pan-Eurasian arctic-boreal areas, *J. Geography Environment Sustainability*, 2(7), 13–48, 2014a.
- Lappalainen, H. K., Petäjä, T., Zaytseva, N., Shvidenko, A., Kujansuu, J., Kerminen, V.-M., Viisanen, Y., Kotlyajov, V., Kasimov, N., Bondur, V., Matvienko, G., Blaklanov, A., Zilitinkevich, S., and Kulmala, M.: Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – the first two years in action, *Proceedings of Nordic Center of Excellence in 'Cryosphere-Atmosphere Interactions in a Changing Arctic Climate' Annual Meeting 2014*, Kulmala, M., Boy, M., and Kontkanen, J. (Eds.), 2014b.
- Laothawornkitkul, J., Taylor, J. E., Paul, N. D., and Hewitt, C. N.: Biogenic volatile organic compounds in the Earth system, *New Phytologist*, 183, 27–51, 2009.
- Laxon, S.W., Giles, K. A., Ridout, A. L., Wingham, D. J., Willatt, R., Cullen, R., Kwok, R., Schweiger, A., Zhang, J., Haas, C., Hendricks, S., Krishfield, R., Kurtz, N., Farrell, S., and Davidson, M.: CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 732–737, doi:10.1002/grl.50193, 2013.
- Leskinen, A., Portin, H., Komppula, M., Miettinen, P., Arola, A., Lihavainen, H., Hatakka, J., Laaksonen, A. and Lehtinen, K. E. J.: Overview of the research activities and results at Puijo semi-urban measurement station, *Boreal Env. Res.*, 14, 576–590, 2009.
- Lihavainen, H., Kerminen, V.-M., Tunved, P., Aaltonen, V., Arola, A., Hatakka, J., Hyvärinen, A., and Viisanen, Y.: Observational signature of the direct radiative effect by natural boreal forest aerosols and its relation to the corresponding first indirect effect, *J. Geophys. Res.*, 114, D20206, doi:10.1029/2009JD012078, 2009.
- Litvinenko, T.V.: Socioecological Consequences of Transformation of Natural Resources Utilization in Russia's Eastern Part in Post-Soviet Period, *Regional Research of Russia*, 2 (4), 284–295, 2012.
- Litvinenko, T.V.: Post-Soviet Transformation of Natural Resources Utilization and its Impact on Population Dynamics in Chukotka Autonomous Okrug, *Izvestiya of Russian Academy of Sciences, Geography*, 2, 30–42, (in Russian), 2013.
- Lu, J., and Cai, M.: Quantifying contributions to polar warming amplification in an idealized coupled general circulation model, *Clim Dy*, 34, 669–687, 2010.
- Lyuri, D. I., Goryachkin, S. V., Karavaeva, N. A., Denisenko, E. A., and Nefedova, T. G.: Dynamics of agricultural lands in Russia in 20th century and post-agrogenic progradation of vegetation and soils, *GEOS, Moscow, Russia* (in Russian), 2010.
- Magnani, F., Mencuccini, M., Borghetti, M., Berbigier, P., Berninger, F., Delzon, S., Grelle, A., Hari, P., Jarvis, P. G., Kolari, P., Kowalski, A. S., Lankreijer, H., Law, B. E., Lindroth, A., Loustau, D., Manca, G., Moncrieff, J. B., Rayment, M., Tedeschi, V., Valentini, R., and Grace, J.: The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests, *Nature*, 447, 848–850, 2007.
- Mahura, A., Baklanov, A., and Sørensen, J. H.: Long-Term Dispersion Modelling. Part II: Assessment of Atmospheric Transport and Deposition Patterns from Nuclear Risk Sites in Euro-Arctic Region, 10, 112–134, 2005.
- Mahura, A., Baklanov, A., and Sørensen, J. H.: Enviro-RISKSS: Overview of Applications for Short- and Long-Term Modelling and Assessment for Atmospheric Pollutants. Abstracts of the International Conference on Environmental Observations, Modelling and Information Systems, ENVIROMIS-2008, 28 June–5 July, Tomsk, Russia, p.106, 2008.

- Makkaveev, P. N., Stunzhas, P. A., Mel'nikova, Z. G., Khlebopashev, P. V., and Yakubov, Sh. Kh.: Hydrochemical characteristics of waters in the western part of the Kara Sea, *Oceanology*, 50(5), 688–697, 2010.
- Makshtas, A., Nedashkovsky, A., P., and Uttal, T.: The role of the Arctic sea ice in carbon dioxide exchange, *AMS Conf. on Polar Meteor. Ocean.*, 3 May 2011, Boston, USA, 2011.
- Maksimovich, E., and Vihma, T.: The effect of surface heat fluxes on interannual variability in the spring onset of snow melt in the central Arctic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 117, C07012, doi:10.1029/2011JC007220, 2012.
- Malevsky-Malevich, S. P., Molkentin, E. K., Nadyozhina, E. D., and Shklyarevich, O. B.: An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the twenty-first century, *Climatic Change*, 86, 463–474, 2008.
- Maljanen, M., Sigurgsson, B., Guðmundsson, J., Óskarsson, H., Huttunen, J., and Martikainen, P.: Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries - present knowledge and gaps, *Biogeosciences* 7, 2711–2738, 2010.
- Malkhazova, S. M., Rumyantsev, V. Yu, Soldatov, M. S., Leonova, N. B., and Kislov, A. V.: Forecasted trends in changes of vegetation in European part of Russia in connection with global warming, *Geography Environment Sustainability*, 4, 5, 4–16, 2012.
- Malkhazova, S. M., Mironova, V. V., Kotova, T. V., Shartova N. V., and Orlov D. S.: Natural Focal Diseases in Russia: Monitoring and Mapping, *Geography. Environment. Sustainability*, 4, 4–12, 2013.
- Matthews, H. D., and Turner, S. E.: Of mongooses and mitigation: ecological analogues to geoengineering, *Environmental Research Letters*, 4(4), 045105, 2009.
- Mauldin, R.L., Berndt, T., Sipilä, M., Paasonen, P., Petäjä, T., Kim, S., Kurtén, T., Stratmann, F., Kerminen, V.-M., and Kulmala, M.: A new atmospherically relevant oxidant of sulphur dioxide, *Nature*, 488, 193–196, 2012.
- McComiskey, A., and Feingold, G.: The scale problem in quantifying aerosol indirect effects, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1031–1049, doi:10.5194/acp-12-1031-2012, 2012.
- McGuire, D. A., Anderson, L. G., Christensen, T. R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D. J., Heimann, M., Lorenson, T. D., Macdonald R. W., and Roulet, N.: Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change, *Ecol. Monogr.*, 79(4), 523–555, 2009.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Aha, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavska, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatca, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susni, A., Van Vliet, A. J. H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., and Züst, A.: European phenological response to climate change matches the warming pattern, *Global Change Biology*, 12, 1969–1976, doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x, 2006.
- Moiseenko, T. I., Kydrjavzeva, L. P., and Sandimirov, S. S.: Principles and methods of water quality studies for airborne polluted water bodies: case study of Kola Subarctic, *Water Res.*, 27, 81–86, 2001.
- Monn, C., and Becker, S: Cytotoxicity and Induction of Proinflammatory Cytokines from Human Monocytes Exposed to Fine (PM_{2.5}) and Coarse Particles (PM_{10-2.5}) in Outdoor and Indoor Air, *Toxicology and Applied Pharmacology* 155, 3, 245–252, 1999.
- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., and Running, S. W.: Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data, *Remote Sen. Environ.*, 111, 519–536, 2007.
- Müller, B., Lotter, A F., and Sturm, A. A.: Influence of catchment quality and altitude on the water and sediment composition of 68 small lakes in Central Europe, *Aquat. Sci., Research Across Boundaries* 60, 316–337, 1998.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., and Nemani, R. R.: Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991, *Nature*, 386, 698–702, 1997.
- Mäkelä, J. M., Aalto, P., Pohja, T., Nissinen, A., Palmroth, S., Markkanen, T., and Kulmala, M.: Observations of ultrafine aerosol particle formation and growth in boreal forest, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1219–1222, 1997.
- Nédélec, P., Thouret, V., Brioude, J., Sauvage, B., Cammas, J. P., and Stohl, A.: Extreme CO concentrations in the upper troposphere over northeast Asia in June 2003 from the in situ MOZAIC aircraft data, *Geophysical Research Letters*, 32 (14), doi:10.1029/2005GL023141, 2005.
- Nie, W., Ding, A., Wang, T., Kerminen, V.-M., George, C., Xue, L., Wang, W., Zhang, Q., Petäjä, T., Qi, X., Gao, X., Wang, X., Yang, X., Fu, C., and Kulmala, M.: Polluted dust promotes new particle formation and growth, *Sci. Rep.*, 4, 6634, doi:10.1038/srep06634, 2014.

- Noe, S. M., Kimmel, V., Hüve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Püttsepp, Ü., Jõgiste, K., Niinemets, Ü., Hörtnagl, L., and Wohlfahrt, G.: Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia, *Forest Ecology and Management*, 262, 71–81, 2011.
- Noe, S. M., Hüve, K., Niinemets, Ü., and Copolovici, L.: Seasonal variation in vertical volatile compounds air concentrations within a remote hemiboreal mixed forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3909–3926, 2012.
- Nuterman, R., Korsholm, U., Zakey, A., Nielsen, K. P., Sørensen, B., Mahura, A., Rasmussen, A., Mažeikis, A., Gonzalez-Aparicio, I., Morozova, E., Sass, B. H., Kaas, E., and Baklanov, A.: New developments in Enviro-HIRLAM online integrated modeling system, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 15, EGU2013-12520-1, 2013.
- Nöjd, P., and Kauppi, P.: Growth of Scots pine in a changing environment. In: Tikkanen E, Niemela, I. (Eds) Kola Peninsula pollutants and forest ecosystems in Lapland, Final report of the Lapland Forest Damage Project, Finland's Ministry of Agriculture and Forestry, The Finnish Forest Research Institute, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 61–64, 1995.
- O'Connor, E. J., Illingworth, A. J., and Hogan, R. J.: A technique for autocalibration of cloud lidar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 777–786, 2004.
- Ogi, M., Yamazaki, K., and Wallace, J. M.: Influence of winter and summer surface wind anomalies on summer Arctic sea ice extent, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L07701, doi:10.1029/2009GL042356, 2010.
- Oltmans, S. J., Lefohn, A. S., Harris, J. M., Tarasick, D. W., Thompson, A. M., Wernli, H., Johnson, B. J., Novelli, P. C., Montzka, S. A., Ray, J. D., Patrick, L. C., Sweeney, C., Jefferson, A., Dann, T., Davies, J., Shapiro, M., and Holben, B. N.: Enhanced ozone over western North America from biomass burning in Eurasia during April 2008 as seen in surface and profile observations, *Atmos. Environ.*, 44, 4497–4509, 2010.
- O'Sullivan, A.: Exploring past people's interactions with wetland environments in Ireland, *Proc. Royal Irish Academy*, 107C, 147–203, 2007.
- Paasonen, P., Asmi, A., Petäjä, T., Kajos, M. K., Äijälä, M., Junninen, H., Holst, T., Abbatt, J. P. D., Arneth, A., Birmili, W., Denier van der Gon, H., Hamed, A., Hoffer, A., Laakso, L., Laaksonen, A., Leitch, W. R., Plass-Dulmer, C., Pryor, S. C., Räsänen, P., Swietlicki, E., Wiedensohler, A., Worsnop, D. R., Kerminen, V.-M., and Kulmala, M.: Evidence for negative climate feedback: warming increases aerosol number concentrations, *Nature Geosci.*, 6, 438–442, doi:10.1038/ngeo1800, 2013.
- Paatero, J., Dauvalter, V., Derome, J., Lehto, J., Pasanen, J., Vesala, T., Miettinen, J., Makkonen, U., Kyrö, E.-M., Jernström, J., Isaeva, L., and Derome, K.: Effects of Kola air pollution on the environment in the western part of the Kola peninsula and Finnish Lapland - Final report, Finnish Meteorological Institute Rep. 6, 2008.
- Palmer, T., and Slingo, J.: Uncertainty in weather and climate prediction, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 4751–4767, doi:10.1098/rsta.2011.0161, 2011.
- Pappalardo, G., Amodeo, A., Pandolfi, M., Wandinger, U., Ansmann, A., Bösenberg, J., Matthias, V., Amiridis, V., De Tomasi, F., Frioud, M., Iarlori, M., Komguem, L., Papayannis, A., Roca-denbosch, F., and Wang, X.: Aerosol lidar intercomparison in the framework of EARLINET: Part III - Raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter and lidar ratio, *Appl. Optics*, 43, 5370–5385, 2004.
- Paris, J.-D., Ciais, P., Nedelec, P., Ramonet, M., Golytsin, G., Granberg, I., Athier, G., Boumard, F., Cousin, J.-M., Cayez, G., and Stohl, A.: The YAK-AEROSIB transcontinental aircraft campaigns: new insights on the transport of CO₂, CO and O₃ across Siberia, *Tellus B*, 60(4), 551–568, 2008.
- Park, H., Walsh, J. E., Kim, Y., Nakai, T., and Ohata, T.: The role of declining Arctic sea ice in recent decreasing terrestrial Arctic snow depths, *Polar Science*, 7(2), 174–187, doi: 10.1016/j.polar.2012.10.002, 2013.
- Parkinson, C. L., and Cavalieri, D. J.: Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006, *J. Geophys. Res.*, 113, C07003, doi:10.1029/2007JC004558, 2008.
- Parmentier, F. J. W., van der Molen, M. K., van Huissteden, J., Karsanaev, S. A., Kononov, S. V., Suzdalov, D. A., Maximov, T. C., and Dolman, A. J.: Longer growing seasons do not increase net carbon uptake in the northeastern Siberian tundra, *J. Geophys. Res.*, 116, G04013, doi:10.1029/2011JG001653, 2011.
- Pechony, O. and Shindell, D.: Driving forces of global wildfires over the past millenium and forthcoming century, *PNAS*, 107, 19167–19170, 2010.
- Penenko, V., Baklanov, A., Tsvetova, E., and Mahura, A.: Direct and Inverse Problems in a Variational Concept of Environmental Modeling, *Pure and Applied Geophysics*, 169(3), 447–465, 2012.
- Penner, J. E., Zhou C., and Xu, L.: Consistent estimates from satellites and models for the first aerosol indirect forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L13810, doi:10.1020/2012GL051870, 2012.

- Perovich, D. K., Richter-Menge, J. A., Jones, K. F., and Light, B.: Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L11501, doi:10.1029/2008GL034007, 2008.
- Persad, G. G., Ming, Y., and Ramaswamy, V.: Tropical troposphere-only response to absorbing aerosols, *J. Climate*, 25, 2471–2480, 2012.
- Petoukhov, V., and Semenov, V. A.: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. of Geophysical Research*, 115, D21111, doi:10.1029/2009JD013568, 2010.
- Petrenko, D., Pozdnyakov, D., Johannessen, J., Counillon, F., and Sychov, V.: Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean. *International Journal of Remote Sensing*, 34(11), 3903–3937, 2013.
- Phillips, R. P., Finzi, A. C., and Bernhardt, E. S.: Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO₂ fumigation. *Ecology Letters*, 14, 187–194, 2011.
- Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Reichstein, M., Luysaert, S., Margolis, H., Fang, J., Barr, A., Chen, A., Grelle, A., Hollinger, D. Y., Laurila, T., Lindroth, A., Richardson, A. D., and Vesala, T.: Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming, *Nature*, 451, 49–53, 2008.
- Pommier, M., Law, K. S., Clerbaux, C., Turquety, S., Hurtmans, D., Hadji-Lazaro, J., Coheur, P.-F., Schlager, H., Ancellet, G., Paris, J.-D., Nédélec, P., Diskin, G. S., Podolske, J. R., Holloway, J. S., and Bernath, P.: IASI carbon monoxide validation over the Arctic during POLARCAT spring and summer campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 10655–10678, doi:10.5194/acp-10-10655-2010, 2010.
- Portin, H. J., Komppula, M., Leskinen, A. P., Romakkaniemi, S., Laaksonen, A., and Lehtinen, K. E. J.: Observations of aerosol–cloud interactions at the Puijo semi-
- Quinn, P. K., and Bates, T. S.: The case against climate regulation via oceanic phytoplankton sulphur emissions, *Nature* 480, 51–56, 2011.
- Rametsteiner, E., Schmithuesen, F., and Tikkanen, I.: Report on the MCPFE qualitative indicators for sustainable forest management: Policies, institutions and instrument, www.iiasa.ac.at/publication/more_XC-07-014.php, 2007.
- Ramonet, M., Ciais, P., Nepomniachii, I., Sidorov, K., Neubert, R. E. M., Picard, D., Kazan, V., Biraud, S. C., Gusti, M., Schulze, E. D., and Lloyd, J.: Three years of aircraft based trace gas measurements over Fyodoroskye southern taiga forest, 300 km North-West of Moscow, *Tellus B*, 54, 713–734, 2002.
- Rampal, P., Weiss, J., Dubois, C., and Campin, J. M.: IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: Consequences in terms of projected sea ice thinning and decline, *J. Geophys. Res.*, 116, C00D07, 2011.
- Randersson, J. T., Liu, H., Flanner, M. G., Chambers, S. D., Jin, Y., Hess, P. G., Pfister, G., Mack, M. C., Treseder, K. K., Welp, L. R., Chapin, F. S., Harden, J. W., Goulden, M. L., Lyons, E., Neff, J. C., Schuur, E. A. G., and Zender, C. S.: The impact of boreal forest fire on climate warming, *Science*, 314, 1130–1132, 2006.
- Repo, M. E., Susiluoto, S., Lind, S. E., Jokinen, S., Elsakov, V., Biasi, C., Virtanen, T., and Martikainen, P. J.: Large N₂O emissions from cryoturbated peat soil in tundra, *Nature Geoscience*, 2, 189–192, 2009.
- Ribeiro, M., Losenno, C., Dworak, T., Massey, E., Swart, R., Benzie, M., and Laaser, C.: Design of guidelines for the elaboration of Regional Climate Change Adaptation Strategies, Ecologic Institute, Vienna, 2009.
- Riccobono, F., Schobesberger, S., Scott, C. E., Dommen, J., Ortega, I. K., Rondo, L., Almeida, J., Amorim, A., Bianchi, F., Breitenlechner, M., David, A., Downard, A., Dunne, E. M., Duplissy, J., Ehrhart, S., Flagan, R. C., Franchin, A., Hansel, A., Junninen, H., Kajos, M., Keskinen, H., Kupc, A., Kürten, A., Kvashin, A. N., Laaksonen, A., Lehtipalo, K., Makhmutov, V., Mathot, S., Nieminen, T., Onnela, A., Petäjä, T., Praplan, A. P., Santos, F. D., Schallhart, S., Seinfeld, J. H., Sipilä, M., Spracklen, D. V., Stozhkov, Y., Stratmann, F., Tomé, A., Tsagkogeorgas, G., Vaattovaara, P., Viisanen, Y., Vrtala, A., Wagner, P. E., Weingartner, E., Wex, H., Wimmer, D., Carslaw, K. S., Curtius, J., Donahue, N. M., Kirkby, J., Kulmala, M., Worsnop, D. R., and Baltensperger, U.: Oxidation products of biogenic emissions contribute to nucleation of atmospheric particles, *Science*, 344, 717–721, doi: 10.1126/science.1243527, 2014.
- Riutta, T., Laine, J., Aurela, M., Rinne, J., Vesala, T., Laurila, T., Haapanala, S., Pihlatie, M., and Tuittila, E.-S.: Spatial variation in plant community functions regulates carbon gas dynamics in a boreal fen ecosystem, *Tellus B*, 59, 838–852, 2007.
- Romanovsky, V., Burgess, M., Smith, S., Yoshikawa, K., and Brown, J.: Permafrost temperature records: Indicators of climate change, *EOS*, 83, 589–594, 2002.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Hammer, S. A., and Mehrotra, S.: Cities lead the way in climate-change action, *Nature*, 467, 909–911, 2010.
- Rudneva, N. A., Pronin, N., and Rudneva, M. L. V.: Microelements and heavy metals in the muscles of the Muskrat (*Ondatra Zibethica*) from the Selenga river delta, *Russ. J. Ecol. C*, 36, 435–437, 2005.

- Ritcher, Burrows, J.P., Hendrik Nüß, H., Granier, C., and Niemeier, U.: Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature* 437, 129-132, doi:10.1038/nature04092, 2005.
- Sahoo, A. K., Pan, M., Troy, T. J., Vinukollu, R., Sheffield, J., and Wood, E. F.: Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 115, 1850–1865, doi:10.1016/j.rse.2011.03.009, 2011.
- Sanchez-Rodriguez, R.: Learning to adapt to climate change in urban areas. A review of recent contributions, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1 (2), 201–206, 2009.
- Sanderson, M. G., Collins, W. J., Johnson, C. E., and Derwent, R. G.: Present and future acid deposition to ecosystems: the effect of climate change, *Atmos. Environ.* 40, 1275–1283, 2006.
- Sasakawa, M., Shimoyama, K., Machida, T., Tsuda, N., Suto, H., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A., Krasnov, O., Saeki, T., Koyama, Y., and Maksyutov, S.: Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia, *Tellus B*, 62, 403–416, doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00494.x, 2010.
- Savva, Y., and Berninger, F.: Sulphur deposition causes a large scale growth decline in boreal forests in Eurasia, *Global Biogeochemical Cycles* 24, GB3002, doi:10.1029/2009GB003749, 2010.
- Sazhin, A. F., Romanova, N. D., and Mosharov, S. A.: Bacterial and primary production in the pelagic zone of the Kara Sea, *Oceanology*, 50(5), 759–765, 2010.
- Schepaschenko, D., McCallum, I., Shvidenko, A., Fritz, S., Kraxner, F., and Obersteiner, M.: A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information, *Journal of Land Use Science*, 6:4, 245–259, doi: 10.1080/1747423X.2010.511681, 2011.
- Schepaschenko, D. G., Mukhortova, L. V., Shvidenko, A. Z., and Vedfova, E. F.: The pool of organic carbon in the soils of Russian, *Eurasian Soil Science*, 46(2), 107–116, 2013.
- Schindler, D. W.: The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58, 18–29, 2001.
- Schlesinger, W. H.: *Biogeochemistry: an analysis of global change*, 2nd ed. Academic Press, San Diego, California, 1997.
- Schobesberger et al., 2014 Molecular understanding of atmospheric particle formation from sulfuric acid and large oxidized organic molecules, *PNAS*, 17223–17228, doi: 10.1073/pnas.1306973110.
- Schulze, E.-D., Valentini, R., and Sanz, M.-J.: The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology, *Global Change Ecology*, 8, 505–518, 2002.
- Schuur, E. A. G., Bockenheim, J., Canadell, J. P., Euskirchen, E., Field, C. B., Goryachkin, S. V., Hagemann, S., Kuhry, P., Lafleur, P. M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F. E., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J. G., and Zimov, S. A.: Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implication for the global carbon cycle, *Bioscience* 58: 701–714, 2008.
- Screen, J. A., and Simmonds, I.: Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L16707, doi:10.1029/2010GL044136, 2010.
- Screen, J. A., and Simmonds, I.: Declining summer snowfall in the Arctic: causes, impacts and feedbacks, *Clim. Dyn.*, 38, 2243–2256, doi:10.1007/s00382-011-1105-2, 2012.
- Sedlar, J., Tjernström, M., Mauritsen, T., Shupe, M., Brooks, I., Persson, P. O. G., Birch, C. E., Leck, C., Sirevaag, A., and Nicolaus, M.: A transitioning Arctic surface energy budget: the impacts of solar zenith angle, surface albedo and cloud radiative forcing, *Clim. Dynam.*, 37, 1643–1660, doi:10.1007/s00382-010-0937-5, 2011.
- Sellers, P. J., Dickinson, R. E., Randall, D. A., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A., Collatz, G. J., Denning, A. S., Mooney, H. A., Nobre, C. A., Sato, N., Field, C. B., and Henderson-Sellers, A.: Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere, *Science*, 24, 275(5299), 502–509, doi:10.1126/science.275.5299.502, 1997.
- Sereda, J., Bogard, M., Hudson, J., Helps, D., and Dessouki, T.: Climate warming and the onset of salinization: rapid changes in the limnology of two northern plains lakes, *Limnologica* 41, 1–9, 2011.
- Sergeeva, V. M.: Spatial and temporal variability of phytoplankton in western Arctic Seas, Ph.D. Thesis, Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia, 2013.
- Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Yusupov, V., Kosmach, D., and Gustafsson, O.: Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Science*, 327, 1246–1250, 2010.
- Shatalina, M. V., Mareev, E. A., Anisimov, S. V., and Shikhova, N. M.: Modeling of the Electric-Field Dynamics in the Atmosphere Using the Test-Structure Method, *Radiophys. Quantum El.*, 48, 575–586, doi:10.1007/s11141-005-0102-x, 2005.

- Shatalina, M. V., Mareev, E. A., Anisimov, S. V., and Shikhova, N. M.: Recovery of space charge distribution by the method of test structures, in: Proc. Int. Conf. Atm. Electr, ICAE 07, Beijing, China, 2007.
- Shaw, G. E.: The Arctic Haze phenomenon. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 76, 2403–2412, 1995.
- Sheffield, J., Wood, E. F., and Munoz-Arriola, F.: Long-term regional estimates of evapotranspiration for Mexico based on downscaled ISCCP data, *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 253–275, 2010.
- Shindell, D., and Faluvegi, G.: climate response to regional radiative forcing during the twentieth century, *Nature Geosci.*, 2, 294–300, 2009.
- Shindell, D., Kuylensstierna, J. C. I., Vignati, E., van Dingenen, R., Amann, M., Klimont, Z., Anenberg, S. C., Müller, N., Janssens-Maenhout, G., Raes, F., Schwartz, J., Faluvegi, G., Pozzoli, L., Kupiainen, K., Höglund-Isakson, L., Emberson, L., Streets, D., Ramanathan, V., Hicks, K., Oanh, N. T. K., Milly G., Williams, M., Demkine, V., and Fowler, D.: Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security, *Science*, 335, 183–189, 2012.
- Shmakin, A. B., and Popova, V. V.: Dynamics of climate extremes in northern Eurasia in the late 20th century, *Izvestia Akad. Nauk, Atmospheric and Oceanic Physics*, 42: 157–166, 2006.
- Shuntov, V. P., Dulepova, E. G., Temnih, O. C., Volkov, A. F., Naydenko, S. V., Chuchukalo, V. I., and Volkov, I. V.: Condition of biological resources in relation to dynamics of macroecosystems in economic zone of Russian Far East Seas, in *Dynamics of the ecosystems and contemporary problems of conservation of potential bioresources of Russian Seas*, Chapter 2, Vladivostok, Dalnauka, 75–176, 2007.
- Shvidenko, A., and Nilsson, S.: A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961-1998. *Tellus*, 55B, 391–415, 2003.
- Shvidenko, A., and Schepaschenko, D. G.: Climate change and wildfires in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 6(7), 683–692, 2013.
- Shvidenko, A., and Schepaschenko, D. G.: Carbon Budget of Russian Forests, *Siberian Journal of Forest Science*, 1, 69–92, 2014.
- Shvidenko, A., Schepaschenko, D., McCallum, I., and Nilsson, S.: Can the uncertainty of full carbon accounting of forest ecosystems be made acceptable to policy makers?, *Climatic Change*, 103(1–2), 137–157, 2010.
- Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Vaganov, E. A., Sukhinin, A. I., Maksyutov, Sh. Sh., McCallum, I., and Lakyda, I. P.: Impacts of wildfire in Russia between 1998-2010 on ecosystems and the global carbon budget, *Proc. Russian Academy of Sciences (Doklady Earth Sciences)*, 441(2), 1678–1682, 2011.
- Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Kraxner, F., and Obersteiner, M.: Terrestrial ecosystems full carbon account as a fuzzy system: An attempt to understand uncertainties, in: 9th Int. CO2 Conf., Beijing, China, 3-7 June, 2013a.
- Shvidenko, A., Gustafson, E., McGuire, A. D., Kharuk, V. I., Svhepaschenko, D. G., Shugart, H. H., Tchepakova, N. M., Vygodskaya, N. N., Onuchin, A. A., Hayes, D. J., McCallum, I., Maksyutov, S., Mukhortova, L. V., Soja, A. J., Beletti-Marchesini, L., Kurbatova, J. A., Oltchev, A. V., Parfenova, E. I., and Shuman, J. K.: Terrestrial ecosystems and their change, in: *Regional Environmental Changes in Siberia and their Global Consequences*, Groisman, P. Y., and Gutman, G. (Eds.), Springer, 171–249, 2013b.
- Singh, H. B., Brune, W. H., Crawford, J. H., Jacob, D. J., and Russell, P. B.: Overview of the summer 2004 Intercontinental Chemical Transport Experiment-North America (INTEX-A), *J. Geophys. Res.*, 111, D24S01, doi:10.1029/2006JD007905, 2006.
- Skjelkvåle, B. L., and Wright, R.F.: Mountain lakes; sensitivity to acid deposition and global climate change, *Ambio*, 27, 280–286, 1998.
- Skjelkvåle, B. L., Stoddard, J. L., and Andersen, T.: Trends in surface water acidification in Europe and North America (1989-1998), *Water Air Soil Pollut.*, 130, 787–792, 2001.
- Skryzhevskaya, Y., Tynkkynen, V.-P., and Leppänen, S.: Russia's climate policies and local reality, *Polar Geography*, 38(2), 146–170, 2015.
- Smith, K. R., Samet, J. M., Romieu, I., and Bruce, N.: Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children, *Thorax*, 55, 518–532, 2000.
- Smith, L. C.: *The World in 2050: four forces shaping civilization's northern future*, Brockman Inc., 2010.
- Smith, L. C., Sheng, Y., MacDonald, G. M., and Hinzman, L. D.: Disappearing arctic lakes, *Science*, 308(5727), 1429, 2005.
- Smith, S. J., Pitcher, H., and Wigley, T. M. L.: Global and Regional Anthropogenic Sulfur Dioxide Emissions, *Global Planet Change*, 29(1-2), 99–119, 2001.

- Smith, S. J., van Aardenne, J., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A., and Delgado Arias, S.: Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1101–1116, doi:10.5194/acp-11-1101-2011, 2011.
- Sommar, J., Andersson, M. E., and Jacobi, H.-W.: Circumpolar measurements of speciated mercury, ozone and carbon monoxide in the boundary layer of the Arctic Ocean, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5031–5045, 2010.
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., and Braithwaite, D.: Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 2035–2046, 2000.
- Spracklen, D. V., Bonn B., and Carslaw, K. S.: Boreas forests, aerosols and the impacts on clouds and climate, *Philos. Trans. R. Soc.*, 266A, 1–11, doi:10.1098/rsta.2008.0201, 2008.
- Starkweather, S., Walden, V., Uttal, T., Drummond, J., Key, J., Kay, J., Vihma, T., Skov, H., Burkhardt, J.: Advancing Arctic atmospheric science through developing collaborative, use-informed targets for international observing development, *Community White Paper for Arctic Observing Summit 2013*, Vancouver, Canada, 15, 2013.
- State Report: State Report on State and Protection of Environment of the Russian Federation in 2011, Roshydromet, Moscow, 2011.
- Stehr, N., and von Storch, H.: Editorial: Introduction to papers on mitigation and adaptation strategies for climate change: protecting nature from society or protecting society from nature?, *Environmental Science & Policy*, 8, 537–540, 2005.
- Stohl, A.: Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere, *J. Geophys. Res.*, 111, D11306, doi:10.1029/2005JD006888, 2006.
- Stohl, A., and Eckhardt, S.: *Intercontinental Transport of Air Pollution. The Handbook of Environmental Chemistry*, 4, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2004.
- Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Maslanik, J., and Barrett, A. P.: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis, *Climatic Change*, 110, 1005–1027, doi:10.1007/s10584-011-0101-1, 2012.
- Struthers, H., Ekman, A. M. L., Glantz, P., Iversen, T., Kirkevåg, A., Mårtensson, M., Seland, O., and Nilsson, E. D.: The effect of sea ice loss on sea salt aerosol concentrations and the radiative balance in the Arctic, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 3459–3477, 2011.
- Su, H., Wood, E. F., McCabe, M. F., and Su, Z.: Evaluation of remotely sensed evapotranspiration over the CEOP EOP-1 reference sites, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85A, 439–459, 2007.
- Su, H., Cheng, Y., Oswald, R., Behrendt, T., Trebs, I., Meixner, F.X., Andreae, M.O., Cheng, P., Zhang, Y., and Pöschl, U.: Soil nitrite as a source of atmospheric HONO and OH radicals. *Science*, 333, 1616–1618, 2011.
- Sun, Z., Niinemets, Ü., Hüve, K., Rasulov, B., and Noe, S.M.: Elevated atmospheric CO₂ concentration leads to increased whole-plant isoprene emission in hybrid aspen (*Populus tremula* x *Populus tremuloides*), *New Phytologist*, 198, 788–800, doi: 10.1111/nph.12200, 2013.
- Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A. G., Kuhry, P., Mazhitova, G., and Zimov, S.: Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region, *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB2023, doi:10.1029/2008GB003327, 2009.
- Tchebakova, N. M., Parfenova, E. I., and Soja, A. J.: Effect of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate, *Env. Res. Lett.*, 4, 045013, 2009.
- Thomas, J. L., Raut, J.-C., Law, K. S., Marelle, L., Ancellet, G., Ravetta, F., Fast, J. D., Pfister, G., Emmons, L. K., Diskin, G. S., Weinheimer, A., Roiger, A., and Schlager, H.: Pollution transport from North America to Greenland during summer 2008, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 3825–3848, doi:10.5194/acp-13-3825-2013, 2013.
- Tikkanen, E.: Conclusions, In: Tikkanen, E., Niemelä, I. (Eds.), *Kola Peninsula pollutants and forest ecosystems in Lapland. Final report of the Lapland Forest Damage Project*. Finland's Ministry of Agriculture and Forestry, The Finnish Forest Research Institute, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 71–81, 1995.
- Tishkov, A. A.: Biogeographical Consequences of Natural and Anthropogenic Climate Changes, *Biology Bull. Rev.*, 2, 132–140, 2012.
- Troitskaya, Y., Ezhova, E. V., Sergeev, D. A., Kandaurov, A. A., Baidakov, G. A., Vdovin, M. I., and Zilitinkevich, S. S.: Momentum and buoyancy transfer in atmospheric turbulent boundary layer over wavy water surface - Part 2: Wind–wavespectra, *Nonlin. Processes Geophys.*, 20(5), 841–856, 2013. Tunved, P., Hansson, H.-C., Kerminen, V.-M., Ström, J., Dal Maso, M., Lihavainen, H., Viisanen, Y., Aalto, P. P., Komppula, M., and Kulmala, M.: High natural aerosol loading over boreal forests, *Science*, 312, 261–263, 2006.
- Troitskaya, Y., Rybushkina, G., Soustova, I., Balandina, G., Lebedev, S., and Kostianoy, A.: Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir, *Int J Remote Sens*, 33(23), 7559–7578, 2012.

- Troitskaya, Y., Troitskaya, Y., Ezhova, E. V., Sergeev, D. A., Kandaurov, A. A., Baidakov, G. A., Vdovin, M. I., and Zilitinkevich, S.: Momentum and buoyancy transfer in atmospheric turbulent boundary layer over wavy water surface. Part 2: Wind–wavespectra, *Nonlinear Proc. Geoph.*, 20, 841–856, 2013.
- Tunved, P., Ström, J., Kulmala, M., Kerminen, V.-M., Dal Maso, M., Svenningsson, B., Lunder, C., and Hansson, H.-C.: The natural aerosol over Northern Europe and its relation to anthropogenic emissions – implications of important climate feedbacks, *Tellus 60B*, 473–484, 2008.
- Tynkkynen, V.-P.: Resource curse contested – environmental constructions in the Russian periphery and sustainable development, *European Planning Studies* 15, 6, 853–870, 2007.
- Tynkkynen, V.-P.: Planning rationalities among practitioners in St Petersburg, Russia – Soviet traditions and Western influences, in: Knieling, J., and Othengrafen, F. (eds.), *Planning Cultures in Europe. Decoding Cultural Phenomena in Urban and Regional Planning*, 149–165, Aldershot Ashgate, 2009.
- Tynkkynen, V.-P.: From Mute to Reflective: Changing Governmentality in St Petersburg and the Priorities of Russian Environmental Planning, *J. Environmental Planning and Management*, 53: 2, 1–16, 2010.
- Tynkkynen, V.-P.: Russian bioenergy and the EU’s renewable energy goals: perspectives of security, In: Oxenstierna, S., and Tynkkynen, V.-P. (eds.), *Russian Energy and Security up to 2030*, 95–113, Abingdon, Routledge, 2013.
- UNEP Year Book 2013: Emerging issues in our global environment. United Nation Environmental program, 78 pp, 978-92-807-3284-9 DEW/1565/NA, 2013.
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Van De Berg, L., Bidlot, L., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J. F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J.: The ERA-40 re-analysis, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176, 2005.
- Vaschuk, L. N., and Shvidenko, A. Z.: Dynamics of forests of Irkutsk region, Irkutsk, Russia (in Russian), 2006.
- Velicogna, I., Tong, J., Zhang, T., and Kimball, J. S.: Increasing subsurface water storage in discontinuous permafrost areas of the Lena River basin, Eurasia, detected from GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L09403, doi:10.1029/2012GL051623, 2012.
- Verma, S., Worden, J., Pierce, B., Jones, D. B. A., Al-Saadi, J., Boersma, F., Bowman, K., Eldering, A., Fisher, B., Jourdain, L., Kulawik, S., and Worden, H.: Ozone production in boreal fire smoke plumes using observations from the Tropospheric Emission Spectrometer and the Ozone Monitoring Instrument, *J. Geophys. Res.*, 114, D02303, doi:10.1029/2008JD010108, 2009.
- Vesala T., Launianen, S., Kolari, P., Pumpanen, J., Sevanto, S., Hari, P., Nikinmaa, E., Kaski, P., Mannila, H., Ukkonen, E., Piao, S. L., and Ciais, P.: Autumn temperature and carbon balance of a boreal Scots pine forest in Southern Finland, *Biogeosciences*, 7, 163–176, 2010.
- Vesala, T., Eugster, W., and Ojala, A.: Eddy Covariance Measurements over Lakes, in: *Eddy Covariance – A practical guide to measurements and data analysis*, edited by: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D., Springer Science C Business Media B.V, Dordrecht, the Netherlands, 365–376, 2012.
- Vihma, T., Tisler, P., and Uotila, P.: Atmospheric forcing on the drift of Arctic sea ice in 1989-2009, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L02501, doi:10.1029/2011GL050118, 2012.
- Vihma, T., Pirazzini, R., Fer, I., Renfrew, I. A., Sedlar, J., Tjernström, M., Lüpkes, C., Nygård, T., Notz, D., Weiss, J., Marsan, D., Cheng, B., Birnbaum, G., Gerland, S., Chechin, D., and Gascard, J. C.: Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 9403–9450, doi:10.5194/acp-14-9403-2014, 2014.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., and Melillo, J. M.: Human domination of Earth's ecosystems, *Science*, 277, 494–499, 1997a.
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., and Tilman, D. G.: Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences, *Ecological Applications*, 7, 737–750, 1997b.
- Vitousek, P. M., Porder, S., Houlton, B. Z., and Chadwick, O. A.: Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20, 5–15, 2010.
- Vonk, J. E., Sánchez-García, L., van Dongen, B. E., Alling, V., Kosmach, D., Charkin, A., Semiletov, I. P., Dudarev, O. V., Shakhova, N., Roos, P., Eglinton, T. I., Andersson, A., and Gustafsson, Ö.: Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia, *Nature* 489, 137–140, 2012

- Walter, K. M., Zimov, S. A., Chanton, J. P., Verbyla, D., and Chapin III, F. S.: Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming, *Nature*, 443, 71–75. doi:10.1038/nature05040, 2006.
- Wang, R., Balkanski, Y., Boucher, O., Ciais, P., Peñuelas, J., and Tao, S.: Significant contribution of combustion-related emissions to the atmospheric phosphorous budget, *Nature Geosci.*, 8, 48–54, doi:10.1038/ngeo2324, 2015.
- Warneke, C., Bahreini, R., Brioude, J., Brock, C. A., de Gouw, J. A., Fahey, D. W., Froyd, K. D., Holloway, J. S., Middlebrook, A., Miller, L., Montzka, S., Murphy, D. M., Peischl, J., Ryerson, T. B., Schwarz, J. P., Spackman, J. R., and Veres, P.: Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02813, doi:10.1029/2008GL036194, 2009.
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., and Arellano Jr., A. F.: Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3423–3441, doi:10.5194/acp-6-3423-2006, 2006.
- Whitehead, P. G., and Crossman, J.: Macronutrient cycles and climate change: key science areas and an international perspective, *Sci Total Environ.*, 434, 13–7, 2012.
- Wigley, T.: A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization, *Science*, 314(5798), 452–454, 2006.
- Wild, O., Pochanart, P. and Akimoto, H.: Trans-Eurasian transport of ozone and its precursors, *J. Geophys. Res.*, 109, D11302, doi:10.1029/2003JD004501, 2004.
- WMO-GAW: Global Atmosphere Watch (GAW) Programme: 25 years of global coordinated atmospheric composition observations and analysis, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO, 1143, ISBN 978-92-63-11143-2, www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/GAW25_brochure_wmo_1143_en.pdf, 2014
- Woodgate, R. A., Weingartner, T., and Lindsay, R.: The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L01602, doi:10.1029/2009GL041621, 2010.
- Wotawa, G., Novelli, P. C., Trainer, M., and Granier, C.: Inter-annual variability of summertime CO concentrations in the Northern Hemisphere explained by boreal forest fires in North America and Russia, *Geophys. Res. Lett.*, 28(24), 4575–4578, doi:10.1029/2001GL013686, 2001.
- Xu, L., Myneni, R. B., Chapin III, F. S., Callaghan, T. V., Pinzon, J. E., Tucker, C. J., Zhu, Z., Bi, J., Ciais, P., Tømmervik, H., Euskirchen, E. S., Forbes, B. C., Piao, S. L., Anderson, B. T., Ganguly, S., Nemani, R. R., Goetz, S., Beck, P. S. A., Bunn, A. G., Cao, C., and Stroeve, J. C.: Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands, *Nature Climate Change*, 3, 581–586, doi:10.1038/NCLIMATE1836, 2013.
- Yan, H., and Shugart, H. H.: FAREAST: a forest gap model to simulate dynamics and patterns of eastern Eurasian forests, *J. Biogeography* 32, 1641–1658, 2005.
- Yenikeyeff, S. M., and Krysiak, T. F.: The battle for next energy frontier: The Russian polar expedition and the future of Arctic hydrocarbons, *Oxford Energy Comment*, 2007.
- Yvon-Durocher, G., Caffrey, J. M., Cescatti, A., Dossena, M., del Giorgio, P., Gasol, J. M., Montoya, J. M., Pumpanen, J., Staehr, P. A., Trimmer, M., Woodward, G., and Allen, A. P.: Reconciling the temperature dependence of respiration across timescales and ecosystem types, *Nature*, 487, 47–476, doi:10.1038/nature11205, 2012.
- Zaehle, S., Ciais, P., Friend, A. D., and Priour, V.: Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions, *Nature Geoscience*, 4, 601–605, 2011.
- Zakhvatkina, N., Alexandrov, V. Y., Johannessen, O. M., Sandven, S., Frolov, I.: Classification of sea ice types in ENVISAT synthetic aperture radar images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5), 2587–2600, 2013.
- Zhang, J., Mauzerall, D. L., Zhu, T., Liang, S., Ezzati, M., and Remais J. V.: Environmental health in China: progress towards clean air and safe water, *Lancet*, 375, 1110–1119, doi: 10.1016/S0140-6736(10)60062-1, 2010.
- Zhang, Y.: The Chemical Role of Mineral Aerosols in the Troposphere in East Asia, PhD Thesis, University of Iowa, Iowa City, IA, USA, 1994.
- Zhang, Y.: Online coupled meteorology and chemistry models in the USA, invited keynote speech at the COST-728/NetFAM workshop on Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models, Copenhagen, Denmark, May 21–23, 2007.
- Zhang, Y, Bocquet, M., Mallet, V., Seigneur, Ch., and Baklanov, A.: Real-time air quality forecasting, part II: State of the science, current research needs, and future prospects, *Atmos. Environ.*, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.02.041, 2012.

Zhou, L., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Slayback, D., Shabanov, N. V., Fung, I., and Myneni, R. B.: Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999, *J. Geophys. Res.*, 106, D17, 20 069–20 083, 2001.

Zilitinkevich, S. S.: *Turbulent Penetrative Convection*, Avebury Technical, Aldershot, 180 p., 1991.

Zilitinkevich, S. S. and Esau, I. N.: Planetary boundary layer feedbacks in climate system and triggering global warming in the night, in winter and at high latitudes, *Geography, Environment and Sustainability*, 1, 2, 20–34, 2009.

Zilitinkevich, S., Esau, I., and Baklanov, A.: Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 133, 265–271, 2007.

Zimov, S. A., Schuur E. A. G., and Chapin F. S.: Permafrost and the global carbon budget, *Science* 312, 1612–1613, 2006a.

Zimov, S., Davydov, S., and Zimova, G.: Permafrost carbon: Stock and a decomposability of a globally significant carbon pool, *Geophys. Res. Letter*, 33, L20502, doi:10.1029/2006GL027484, 2006b.

Zolotokrylin, R., Titkova, T. B., Cherenkova, E. A., and Vinogradova, V. V.: Satellite index for evaluation of climatic extremes in dru areas, *Mod Stud Earth Remote Sens Sp.*, 9, 114–121 (in Russian), 2012.