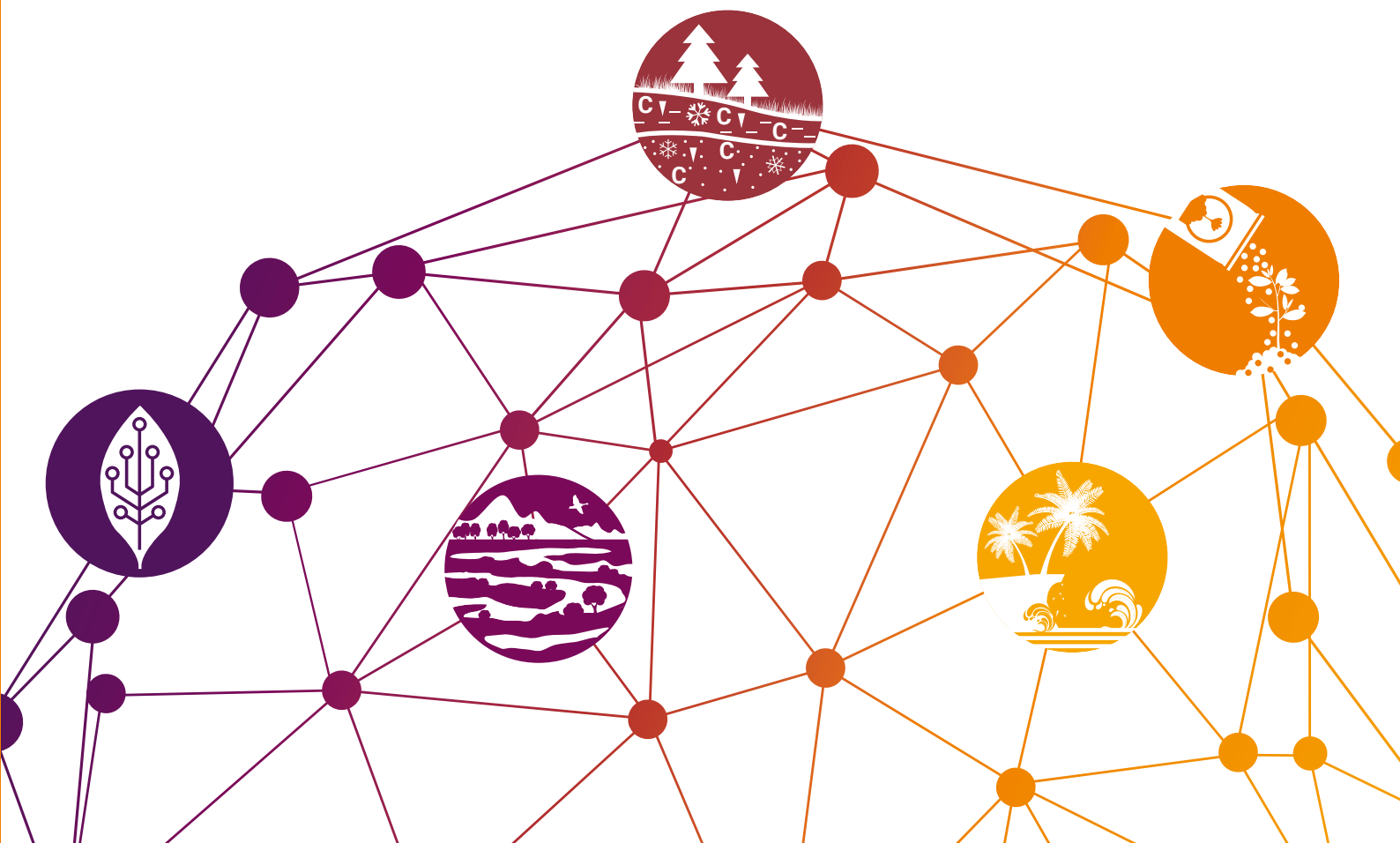


# ПЕРЕДОВЫЕ РУБЕЖИ 2018/2019 ГОДА

Намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение



© Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, 2019 г.  
ISBN: 978-92-807-3739-4  
Номер задания: DEW/2223/NA

### **Правовая оговорка**

Настоящее издание может воспроизводиться полностью или частично и в любой форме для образовательных и некоммерческих целей без отдельного разрешения владельца авторских прав при условии обязательной ссылки на первоисточник. Программа ООН по окружающей среде будет признательна за направление ей одной копии каждой публикации, в которой настоящее издание используется в качестве источника.

Данная публикация не подлежит перепродаже или любому иному использованию в коммерческих целях без предварительного письменного разрешения Программы ООН по окружающей среде. Заявки о предоставлении такого разрешения, содержащие сведения о цели и тираже воспроизведения, следует направлять Директору Отдела коммуникации по адресу: Director, Communication Division, UN Environment, P.O. Box 30552 Nairobi, 00100 Kenya

Употребляемые обозначения и изложение материала в данной публикации не подразумевают выражения какого бы то ни было мнения со стороны Программы ООН по окружающей среде относительно правового статуса той или иной страны, территории или города, или их полномочных органов, или же относительно делимитации их границ или установления их пределов. С общими руководящими указаниями по вопросам, связанным с использованием приводимых в публикациях географических карт, можно ознакомиться по адресу: <http://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm>

Упоминание какой-либо коммерческой компании или продукции в настоящей публикации не подразумевает их одобрения со стороны Программы ООН по окружающей среде. Запрещается использовать информацию из этой публикации, касающуюся запатентованных продуктов, для популяризации или рекламы.

© Авторские права на географические карты, фотографии и иллюстрации указываются в подписях к ним.

### **Предлагаемое название для цитирования:**

ЮНЕП (2019). Передовые рубежи 2018/2019 года: намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, Найроби.

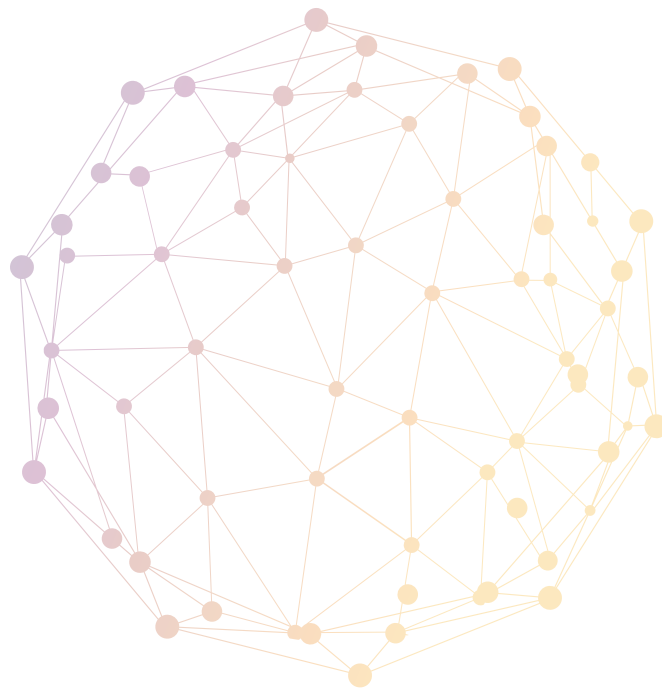
### **Производство**

Отдел естественных наук  
Программа ООН по окружающей среде  
P.O. Box 30552  
Nairobi, 00100, Kenya  
Тел.: (+254) 20 7621234  
Эл. почта: [publications@unenvironment.org](mailto:publications@unenvironment.org)  
Веб-сайт: [www.unenvironment.org](http://www.unenvironment.org)

Программа ООН  
по окружающей среде  
поощряет применение  
экологически безопасных технологий  
во всем мире и в своей деятельности.  
Наши правила распространения печатных  
изданий направлены на уменьшение  
углеродного следа Программы ООН  
по окружающей среде.

# ПЕРЕДОВЫЕ РУБЕЖИ 2018/2019 ГОДА

Намечающиеся проблемы, имеющие экологическое измерение





# Содержание

	Вступительное слово	7
	Выражение признательности	8
	<b>Синтетическая биология: реконструирование окружающей среды</b>	<b>10</b>
	Возможности и проблемы	10
	Переписывание кода жизни	12
	Новое использование прикладных технологий: от лаборатории к экосистеме	16
	Инновации требуют проявления мудрости	18
	Список использованной литературы	20
	<b>Экологическая связность: мост к сохранению биоразнообразия</b>	<b>24</b>
	Восстановление связности фрагментированных экосистем	24
	Движущие силы фрагментации	26
	Содействие внедрению решений, обеспечивающих связность	30
	Постановка целевых задач по обеспечению связности в будущем	32
	Список использованной литературы	34
	<b>Вечномерзлые торфяники: теряя почву под ногами в теплеющем мире</b>	<b>38</b>
	Ускорение изменений в Арктике	38
	Оттаивание вечной мерзлоты, разлагающийся торф и сложные взаимодействия	40
	Повышение осведомленности о вечномерзлых торфяниках	44
	Первоочередные задачи в области накопления знаний и расширения сетей взаимодействия	46
	Список использованной литературы	48
	<b>Фиксация азота: от циклического загрязнения азотом к экономике, обеспечивающей рециркуляцию азота</b>	<b>52</b>
	Глобальная проблема азота	52
	Общеизвестные и предполагаемые свойства азота	54
	Раздробленность политики и решения, направленные на формирование многооборотной экономики	58
	На пути к целостному международному подходу в отношении азота	60
	Список использованной литературы	62
	<b>Плохая адаптация к изменению климата: как не попасть в западню на пути сохранения способности к эволюционному развитию</b>	<b>66</b>
	Определение адаптации и плохой адаптации в контексте изменения климата	66
	Нарастание проблем плохой адаптации	68
	Предотвращение плохой адаптации в условиях ограничения глобального потепления не более чем на 1,5°C	73
	Список использованной литературы	74



# Вступительное слово



В первом десятилетии XX-го века два немецких химика — Фриц Габер и Карл Бош — разработали способ недорогого и крупномасштабного производства синтетического азота. Благодаря этому изобретению началось массовое производство удобрений на основе азота, которое преобразовало сельское хозяйство по всему миру. Наряду с этим оно ознаменовало собой начало нашего долгосрочного вмешательства в баланс азота на Земле. В настоящее время ежегодные потери химически активного азота в окружающую среду оцениваются в 200 млрд долл. США, и это приводит к деградации наших земель, загрязняет воздух, которым мы дышим, и служит спусковым крючком распространения «мертвых зон» и токсичного цветения водорослей в наших водотоках.

Поэтому неудивительно, что многие ученые утверждают, что нынешнюю геологическую эру следует официально именовать эпохой «антропоцена». Всего за несколько десятилетий деятельность человека стала причиной ускорения темпов роста среднемировой температуры, которая повышается в 170 раз быстрее, чем в природных условиях. Более 75 процентов всей поверхности суши на нашей планете подверглось планомерному

изменению, а более 93 процентов всех рек навсегда изменили свое течение. Мы не только стали причиной кардинальных перемен в биосфере, но и обрели способность переписывать код структурных элементов, из которых состоят живые организмы, более того, научились создавать их практически с нуля.

Каждый год сеть ученых, специалистов и учреждений со всего мира ведет работу под эгидой Программы ООН по окружающей среде в целях выявления и анализа назревающих проблем, которые окажут глубокое воздействие на наше общество, экономику и окружающую среду. Одни из этих проблем неразрывно связаны с новыми удивительными технологиями, которые находят прикладное применение и несут непредсказуемые риски, тогда как другие являются вечными вопросами, как, например, фрагментация девственных ландшафтов и оттаивание вечномерзлой почвы. Загрязнение окружающей среды азотом является еще одной проблемой, ставшей непредвиденным последствием десятилетий деятельности человека в биосфере. Наконец, плохая адаптация к изменению климата — последняя из проблем, проанализированных в настоящем докладе, подчеркивает нашу неспособность адекватно и надлежащим образом приспособиться к меняющемуся вокруг нас миру.

Однако есть и хорошие новости, о которых следует рассказать. На следующих страницах читатель может узнать о том, что в решении глобальной проблемы регулирования круговорота азота в природе начинает формироваться целостный подход. В Китае, Индии и Европейском союзе предпринимаются новые многообещающие шаги, направленные на сокращение потерь и повышение эффективности азотных удобрений. В конечном итоге рекуперация и рециклирование азота, равно как и других ценных питательных веществ и материалов, может способствовать переводу сельского хозяйства на принципы экологически безопасного и устойчивого развития — отличительной черты подлинно многооборотной экономики.

Проблемы, исследованные в докладе «Передовые рубежи», должны служить напоминанием о том, что где бы мы ни вмешивались в природные процессы — будь то в мировом масштабе или на молекулярном уровне — мы рискуем создать долгосрочные факторы воздействия на наш общепланетарный дом. Но действуя предусмотрительно и работая вместе, мы можем упредить возникновение этих проблем и разработать такие решения, которые будут служить нам всем на благо будущих поколений.

Джойс Мсуйя

И. о. Директора-исполнителя

Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде

# Выражение признательности

## **Синтетическая биология: реконструирование окружающей среды**

### **Ведущие авторы**

Бартоломей Колодзейчик, компания «H2SG Energy Pte. Ltd.», Сингапур

Натали Кофлер, Йельский институт биосферных исследований, Йельский университет, штат Коннектикут, Соединенные Штаты Америки

### **Соавторы и рецензенты**

Марианела Арайя, Секретариат Конвенции о биологическом разнообразии, Монреаль, Канада

Джеймс Булл, Факультет естественных наук, Техасский университет в Остине, штат Техас, Соединенные Штаты Америки

Джексон Чемпер, Департамент биологической статистики и вычислительной биологии, Корнеллский университет, штат Нью-Йорк, Соединенные Штаты Америки

Чэнь Лю, Департамент биологической статистики и вычислительной биологии, Корнеллский университет, штат Нью-Йорк, Соединенные Штаты Америки

Ёнгют Ютавон, Национальное агентство по научно-техническому развитию Таиланда, Патхумтхани, Таиланд

## **Экологическая связность: мост к сохранению биоразнообразия**

### **Ведущий автор**

Гэри Табор, Центр по сохранению крупных ландшафтов, штат Монтана, Соединенные Штаты Америки

### **Соавторы и рецензенты**

Майя Банкова-Тодорова, Фонд сохранения видов Мохаммеда bin Зайеда, Абу-Даби, Объединенные Арабские Эмираты

Камило Андрес Корреа Айрам, Научно-исследовательский институт биологических ресурсов им. Александра фон Гумбольдта, Богота, Колумбия

Летисия Коуту Гарсия, Федеральный университет Мату-Гросу-ду-Сул, Кампу-Гранди, Бразилия

Валери Капос, Программа ООН по окружающей среде — Всемирный центр мониторинга охраны природы, Кембридж, Великобритания

Эндрю Олдз, Факультет естественных наук и инженерного дела, Университет Солнечного берега, Маручидор, Австралия

Илеана Ступариу, Географический факультет, Бухарестский университет, Румыния

## **Вечномерзлые торфяники: теряя почву под ногами в теплеющем мире**

### **Ведущий автор**

Ханс Юстен, Грайфсвальдский университет / Грайфсвальдский центр по изучению болот, Грайфсвальд, Германия

### **Соавторы и рецензенты**

Дианна Копански, Программа ООН по окружающей среде, Найроби, Кения

Дэвид Олефельдт, Факультет сельскохозяйственных, биологических и экологических наук, Альбертский университет, Эдмонтон, Канада

Дмитрий Стрелецкий, Географический факультет, Университет Джорджа Вашингтона, Вашингтон, округ Колумбия, Соединенные Штаты Америки

## **Фиксация азота: от циклического загрязнения азотом к экономике, обеспечивающей рециркуляцию азота**

### **Ведущие авторы**

Марк Саттон, Центр по экологии и гидрологии, Эдинбург, Великобритания

Нандула Рагхурам, Университет Индрапрастха Гуру Гобинд Сингха, Нью-Дели, Индия

Тапан Кумар Адхья, Калингский институт промышленных технологий, Бхубанешвар, штат Одisha, Индия

### **Соавторы и рецензенты**

Джилл Бэрн, Геологическая служба США, штат Колорадо, Соединенные Штаты Америки

Кристофер Кокс, Программа ООН по окружающей среде, Найроби, Кения

Вим де Врис, Вагенингенский университет и научно-исследовательский центр, Вагенинген, Нидерланды

Кевин Хикс, Стокгольмский институт окружающей среды, Йорк, Великобритания

Клэр Ховард, Центр по экологии и гидрологии, Эдинбург, Великобритания

Сяотан Цзюй, Факультет сельскохозяйственных ресурсов и экологических наук, Китайский сельскохозяйственный университет, Пекин, Китай

Дэвид Кантер, Колледж искусств и наук, Нью-Йоркский университет, штат Нью-Йорк, США



**Карджел Массо**, Международный институт тропического сельского хозяйства, Ибадан, Нигерия  
**Жан Пьер Ометто**, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия  
**Рамеш Рамачандран**, Национальный центр по устойчивому управлению прибрежной зоной, Министерство окружающей среды, леса и изменения климата, Ченнаи, Индия  
**Ханс Ван Гринсвен**, Нидерландское агентство экологических оценок (PBL), Гаага, Нидерланды  
**Вилфрид Винивартер**, Международный институт прикладного системного анализа, Лаксенбург, Австрия

### **Плохая адаптация к изменению климата: как не попасть в западню на пути сохранения способности к эволюционному развитию**

#### **Ведущий автор**

**Кэтрин МакМюллен**, Стокгольмский институт окружающей среды, Бангкок, Таиланд

#### **Соавторы и рецензенты**

**Томас Даунинг**, Глобальное партнерство по адаптации к изменению климата, Оксфорд, Великобритания  
**Энтони Патт**, Институт экологических решений, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцария  
**Бернадетт Ресуррексьон**, Стокгольмский институт окружающей среды, Бангкок, Таиланд  
**Джессика Трони**, Программа ООН по окружающей среде, Найроби, Кения

#### **Особой благодарности заслуживают:**

Александра Бартельмес и Косима Тебетмейер, Грайфсвальдский центр по изучению болот, Германия; Марин Клиндер, Национальный центр данных по исследованию снега и льда, штат Колорадо, Соединенные Штаты Америки; Саломея Чаманджи, Дэвид Коул, Никольен Деланж, Анджелина Джампу, Филип Дрост, Вирджиния Гитари, Цзянь Лю, Ариана Маджини, Нада Матта, Полин Муго, Сюзан Мутеби-Ричардс, Шари Ниджман, Андреас Обрехт, Сэмюэл Опийо, Мозес Осани, Роксанна Самий, Раджиндер Сиан, Нандита Сурендран и Жозефина Вамбуа, Программа ООН по окружающей среде.

#### **Консультанты по производству**

Маартен Каппелле и Эдоардо Дзандри, Программа ООН по окружающей среде.

#### **Производственная группа**

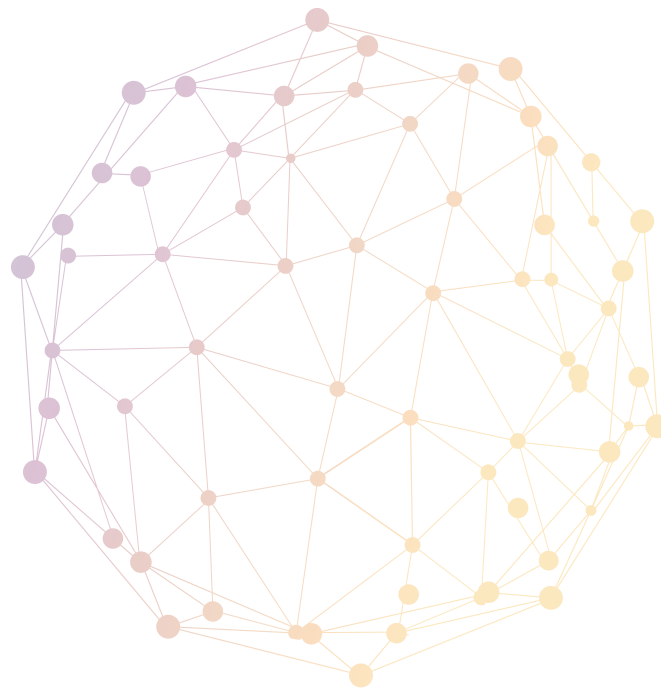
Главный редактор: Пинья Сарасас, Программа ООН по окружающей среде  
Техническая поддержка: Аллан Лелей, Программа ООН по окружающей среде  
Выпускающий редактор: Александра Хортон, Великобритания

#### **Художественно-графическое оформление и верстка**

Художник-оформитель: Одри Ринглер, Программа ООН по окружающей среде  
Картограф: Джейн Муриити, Программа ООН по окружающей среде

#### **Печать**

ЮНОН / Секция типографских услуг / Найроби, сертифицировано по стандарту ISO14001:2004





*Вечномерзлые торфяники с многочисленными озерными впадинами на мысе Болванский Нос, Россия  
Фотография предоставлена: Hans Joosten*

## Вечномерзлые торфяники: теряя почву под ногами в теплеющем мире

### Ускорение изменений в Арктике

Торфяники, расположенные в тропиках, являются точкой притяжения внимания всего мира, поскольку они играют важнейшую роль в накоплении углерода и смягчении последствий изменения климата. В них хранится почти 120 гигатонн углерода, связанного в торфе, но это составляет лишь около 20 процентов всего углерода, удерживаемого торфяниками мира.<sup>1</sup> Наибольшие объемы хранятся в самых северных районах нашей планеты, при этом в северном приполярном регионе удерживается почти половина мирового органического углерода почвы, в основном в виде вечномерзлого торфа.<sup>2-5</sup>

Значительная часть грунта в северном полушарии замерзает и оттаивает сезонно, а оставшаяся часть остается замороженной круглый год. В подпочвенном слое примерно 23 миллионов квадратных километров северных территорий лежит вечная мерзлота — грунт, температура которого не менее двух лет подряд является отрицательной. Арктические и субарктические торфяники расположены в зонах вечной мерзлоты на территориях

Дании/Гренландии, Канады, Норвегии, России, Соединенных Штатов Америки, Финляндии и Швеции. Вечномерзлые торфяники с торфяным слоем толщиной более 40 сантиметров занимают более 1,4 миллиона квадратных километров, а еще большая территория покрыта менее толстым слоем торфа.<sup>3,6-8</sup> Обширные залежи вечномерзлого торфа можно также обнаружить далеко за пределами арктического и субарктического регионов, например в Монголии и на Цинхайско-Тибетском плато, где горные хребты препятствуют движению теплого океанического воздуха вглубь страны, а зимние температуры очень низкие.<sup>9,10</sup>

Состояние вечномерзлых торфяников стремительно меняется. В Арктике темпы потепления сейчас вдвое выше среднемировых.<sup>11</sup> За последние десятилетия южные границы вечной мерзлоты отступили к северу на 30–80 км, что привело к значительному сокращению размеров этой зоны.<sup>12-15</sup> Риски, связанные с деградацией вечной мерзлоты, заключаются в том, что мобилизация и микробное разложение ранее захороненного замороженного органического вещества могут привести к высвобождению значительных количеств двуокси углерода

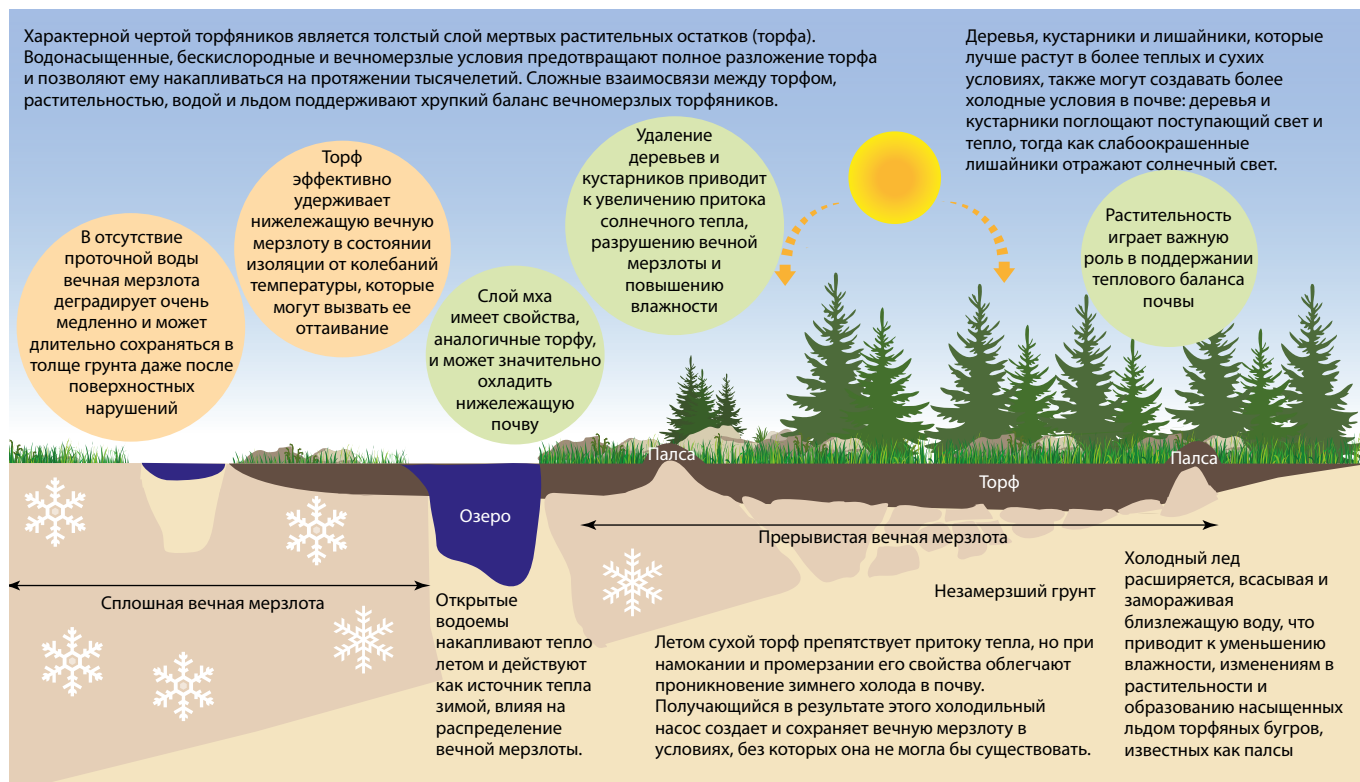
и метана, что, в свою очередь, может значительно усилить глобальное потепление.<sup>16-19</sup> Широкомасштабная деградация вечной мерзлоты также окажет огромное прямое воздействие на экосистемы, гидрологию и инфраструктуру этих регионов.

Хотя вечная мерзлота активно изучается уже более ста лет, для углубления понимания того, как она реагирует на изменение климата и воздействие антропогенных факторов, крайне необходимо провести дополнительные научные исследования ее распределения, характеристик и динамики ее изменений.<sup>20</sup> В том, что касается торфяников, расположенных в зоне вечной мерзлоты, имеющиеся знания еще более ограничены. Поскольку взаимодействие вечной мерзлоты, экосистем и климата является чрезвычайно сложным процессом, до сих пор нет полного понимания того, каким образом вечномерзлые торфяники реагируют на потепление климата, и какова их совокупная роль в глобальном изменении климата.<sup>20-22</sup> Например, хотя замороженные (сухие) и оттаявшие (влажные) участки торфяников могут иметь аналогичные показатели связывания углерода и выступать в качестве поглотителя углерода, на них обычно наблюдаются

совершенно разные показатели потока парниковых газов, и они могут стать чистым источником их выбросов в атмосферу.<sup>23-25</sup> Кроме того, с течением времени условия, способствующие замерзанию торфяников в том или ином месте, могут стремительно измениться, что приведет к их оттаиванию.<sup>23,26</sup>

Оттаивание вечной мерзлоты рассматривается как один из важнейших «переломных моментов» в климатическом равновесии, который может породить безудержный парниковый эффект или неконтролируемое превращение планеты Земля в «теплицу».<sup>27</sup> Чтобы избежать такого разрушительного сценария, крайне важно, чтобы во всем мире вечная мерзлота и ее торфяники оставались замороженными и сохраняли свои углеродные отложения.

## Торфяники и вечная мерзлота: роль торфа, растений и воды



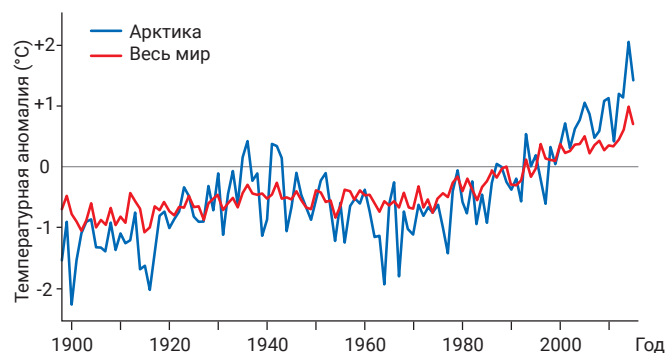
## Оттаивание вечной мерзлоты, разлагающийся торф и сложные взаимодействия

В Арктике любой год последнего десятилетия был теплее, чем самый теплый год XX-го века.<sup>15</sup> В последние десятилетия температура вечной мерзлоты продолжала повышаться по всему миру. Наибольший прирост среднегодовых температур вечной мерзлоты наблюдается в самых холодных районах Арктики, в то время как в «более теплых» зонах вечной мерзлоты и в зонах прерывистой вечной мерзлоты этот прирост значительно меньше. Из-за недавних холодных зим в некоторых местах температура вечной мерзлоты незначительно снизилась.<sup>15,28</sup>

По мере повышения температуры оттаивание насыщенной льдом вечной мерзлоты или таяние грунтового льда приводит к образованию характерных углублений в ландшафте, известных как термокарст. Формирование термокарста в торфяниках на протяжении последних десятилетий, как представляется, ускорило темпы появления зон прерывистой вечной мерзлоты.<sup>29-31</sup> Однако долгосрочные наблюдения в Арктике не позволяют говорить о единообразии тенденций развития термокарста по причине глобального потепления.<sup>15</sup>

Когда замерзшая ранее почва из-за оттаивания распадается, ее оседание создает благоприятные условия для образования новых небольших водоемов, которые позже могут превратиться в озера. Образование термокарстовых озер, в свою очередь, ускоряет оттаивание вечной мерзлоты еще более быстрыми темпами и на большей глубине.<sup>19</sup> С другой стороны, распространение этих озер может также способствовать повышению связности дренажных

Арктика (60–90°с.ш.) и глобальная годовая температура воздуха в нижнем слое атмосферы в сравнении со средней величиной за 1981–2010 годы



Источник: адаптировано на основе «Карты данных по Арктике» за 2018 год (Arctic Report Card 2018), издаваемой Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США.<sup>11</sup>

сетей, что содействует дренированию озер, возрождению растительности, торфообразованию и восстановлению вечной мерзлоты.<sup>32-37</sup> Эти разнонаправленные динамические процессы свидетельствуют о необходимости более глубокого понимания потенциальных последствий тенденции к потеплению.

Изменение климата и повышение температуры приводят к резкому увеличению числа лесных пожаров в Арктике, причем языки пламени уже захватывают пограничные районы тундры и лесотундры. Подпитываемые нижележащими торфяными залежами, пожары высвобождают огромное количество углерода, разрушают растительность и изолирующие слои почвы и уменьшают альбедо (светоотражающую способность) грунта, что приводит к повышению чувствительности к изменению климата и широкому развитию термокарста.<sup>38-44</sup> Даже согласно самым консервативным сценариям прогнозируется, что совокупное воздействие более теплых температур и лесных пожаров будет особенно сильным в зонах прерывистой вечной мерзлоты, но при этом климатические условия станут неблагоприятными и для вечной мерзлоты в целом.<sup>31</sup> Это может привести к изменениям в типах растительности и ее продуктивности, что, в свою очередь, может повлечь за собой более крупные и частые лесные пожары.<sup>45,46</sup>

Еще одним следствием ускоренного потепления по причине изменения климата является то, что оттаивание вечной мерзлоты может высвободить в окружающую среду значительное количество метана — сильнодействующего парникового газа. Хотя оценки выбросов метана в атмосферу Арктики сильно различаются, нынешние глобальные климатические прогнозные модели, как представляется, свидетельствуют лишь о незначительном увеличении выбросов метана в северном регионе вечной мерзлоты.<sup>47,48</sup> Однако адекватного объяснения процессов оттаивания в большинстве моделей не содержится.<sup>8</sup>

### Видеоматериал: Вечная мерзлота – что это такое?



Фотография предоставлена: Hans Joosten

Видеоматериал доступен по адресу:  
<https://www.youtube.com/watch?v=lxixy1u8GjY>

Фотография: Свежеизвлеченный керн вечной мерзлоты,  
Походск, Россия

© Alfred-Wegener-Institut,  
Helmholtz-Zentrum für Polar  
und Meeresforschung



## Термокарст



Фотография предоставлена: Hans Joosten

**Термокарст** — это особенность ландшафта, которая образуется в результате таяния грунтового льда в районах с нижележащей вечной мерзлотой, вызывая оседание грунта на поверхности. Типичные термокарстовые образования включают термокарстовые озера, воронки, ямы и впадины на полигональном рельефе местности.<sup>56,57</sup> Термокарст широко распространен в зонах прерывистой вечной мерзлоты.<sup>58,59</sup> Он также часто встречается в гораздо более холодных зонах сплошной вечной мерзлоты, где ледяные клинья становятся причиной нестабильности вечной мерзлоты.<sup>60,61</sup>

Вода, накапливающаяся вследствие термокарстовых процессов, первоначально усиливает приток тепла и деградацию вечной мерзлоты в силу положительной обратной связи. И, напротив, распространение растительности и накопление органических веществ постепенно ограничивает дальнейшее оттаивание в нисходящем направлении. Из-за нового и стремительного накопления торфа в термокарстовых впадинах оттаивание вечной мерзлоты не обязательно превращает торфяники в источник углерода.<sup>22,23,62</sup> Однако увлажнение почвы, скорее всего, станет причиной высвобождения метана.

В рамках одного из недавних модельных исследований была проведена оценка долгосрочных климатических последствий деградации вечной мерзлоты с учетом резких процессов оттаивания, связанных с недавно образовавшимися термокарстовыми озерами. В результате было высказано предположение о том, что в течение этого столетия выбросы

углерода в атмосферу в форме метана ( $\text{CH}_4$ ) могут составить лишь небольшую долю от общего объема высвобождения углерода из вновь оттаившей вечной мерзлоты, однако за счет вновь оттаившей вечной мерзлоты это может дать до 40 процентов увеличения темпов потепления.<sup>49</sup>

Изменение климата является лишь одним из многих факторов, непосредственно влияющих на изменения в вечномерзлых торфяниках. Любое нарушение поверхностного слоя почвы может привести к деградации вечной мерзлоты и возникновению таких природных явлений, как лесные или тундровые пожары. Вечная мерзлота может пострадать и в связи с антропогенными факторами, такими как развитие промышленной и городской инфраструктуры и строительства, горной добычи, туризма и сельского хозяйства.<sup>50,51</sup> При осуществлении различных форм деятельности в области развития в зоне вечномерзлых торфяников уникальные особенности этих районов зачастую не принимаются во внимание, что становится причиной фрагментации ландшафта и нарушения круговорота воды в природе.<sup>14,52</sup> В России 15 процентов территории тундры было разрушено в результате транспортной деятельности, что привело к оттаиванию вечной мерзлоты, эрозии, оседанию грунта и развитию термокарстов.<sup>53</sup> Около 45 процентов месторождений нефти и природного газа, разрабатываемых в российской Арктике, расположены в наиболее экологически уязвимых районах, часто на торфяниках, включая Печорский регион, Полярный Урал и северо-западную и центральную части Сибири.<sup>54,55</sup> Растущий спрос на природные ресурсы и возросшая доступность районов мерзлоты в связи с потеплением климата в будущем могут привести к активизации промышленной и инфраструктурной деятельности, что усугубит нарушение целостности торфяников и вечной мерзлоты. Эти изменения также скажутся на жизни коренных народов, которые традиционно зависели от использования таких земель, как торфяники, в качестве источников продовольствия, корма для северных оленей, дичи и рыбы.<sup>14</sup>



Оттаивание и разрушение вечной мерзлоты в Монголии

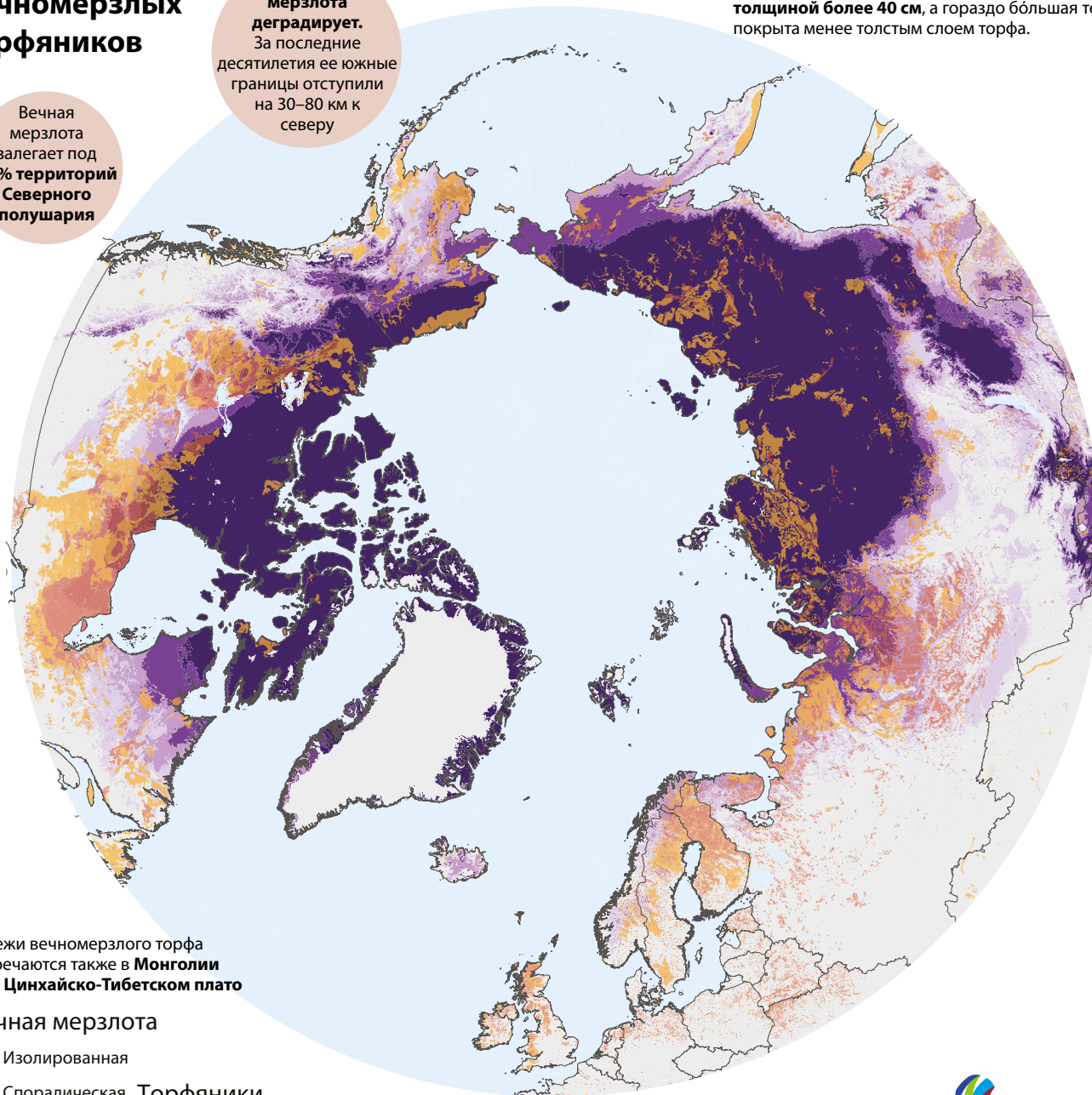
Фотография предоставлена: Hans Joosten

# Распределение вечномерзлых торфяников

Вечная мерзлота залегает под **25% территорий Северного полушария**

**Вечная мерзлота деградирует.** За последние десятилетия ее южные границы отступили на 30–80 км к северу

**Торфяники** расположены на обширных территориях в зонах вечной мерзлоты. По меньшей мере **1,4 млн км<sup>2</sup>** вечномерзлых торфяников имеют слой **торфа толщиной более 40 см**, а гораздо большая территория покрыта менее толстым слоем торфа.



Залежи вечномерзлого торфа встречаются также в **Монголии** и на **Цинхайско-Тибетском плато**

## Вечная мерзлота

- |               |                  |
|---------------|------------------|
| Изолированная |                  |
| Спорадическая | <b>Торфяники</b> |
| Прерывистая   | Покрыто >50%     |
| Сплошная      | Покрыто 20–50%   |

 GREIFSWALD  
MIRE  
CENTRE

**Источники геопространственных данных:**  
Данные по торфяникам предоставлены Грайфсвальдским центром по изучению болот (Грайфсвальд, Германия)  
Данные о вечной мерзлоте предоставлены Институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (AWI) (Бремерхафен, Германия), являющимся членом Объединения немецких научно-исследовательских центров им. Гельмгольца. 90

Температура в Арктике повышается в два раза быстрее среднемировой

Торфяники являются крупнейшими долгосрочными хранилищами органического углерода всех наземных экосистем

Климатические модели дают основания предположить, что к 2050 году будет утрачено 35% приповерхностного слоя вечной мерзлоты

Кустарники, деревья и лишайники могут сохранять пониженную температуру почвы благодаря своей способности поглощать или отражать солнечный свет. Удаление защитной растительности может вызвать быструю деградацию вечной мерзлоты

Пожары уничтожают изолирующую растительность, торф и почвенные слои, повышая уязвимость торфяников перед лицом изменения климата

Совокупное воздействие потепления климата и лесных пожаров сильнее проявляется в зоне прерывистой вечной мерзлоты

Потепление климата в Арктике повысило пожароопасность в тундровых и лесотундровых районах, что привело к значительному снижению содержания углерода в почве

Когда в результате оттаивания вечной мерзлоты лед, находящийся в торфе, тает, микроорганизмы-деструкторы становятся активными и разлагают органические материалы, что приводит к выбросам  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосферу

Более глубокие водоемы накапливают тепло летом и становятся источником тепла зимой, оказывая влияние на локальное распределение вечной мерзлоты

Термокарст — это характерная впадина в ландшафте, образовавшаяся в результате оттаивания вечной мерзлоты или таяния грунтового льда

В отсутствие потоков поверхностных или подземных вод вечная мерзлота деградирует очень медленно и на глубине может сохраняться в течение длительного времени

Термокарст широко распространен в зоне прерывистой вечной мерзлоты

**Торфяники** — это территории, на поверхности которых присутствует слой мертвых растительных остатков (торфа). Водонасыщенные и бескислородные условия предотвращают полное разложение торфа.

Приполярные почвы содержат 50% общемировых запасов почвенного углерода, и этот углерод в основном хранится в торфяниках и нередко консервируется в вечной мерзлоте

Согласно прогнозам специалистов к 2100 году зона вечной мерзлоты станет источником углерода

Вечномерзлые почвы, включая торфяные залежи, содержат в два раза больше ртути, чем остальные почвы, атмосфера и океаны всего мира вместе взятые

Оттаивание вечной мерзлоты может высвободить в окружающую среду значительное количество ртути

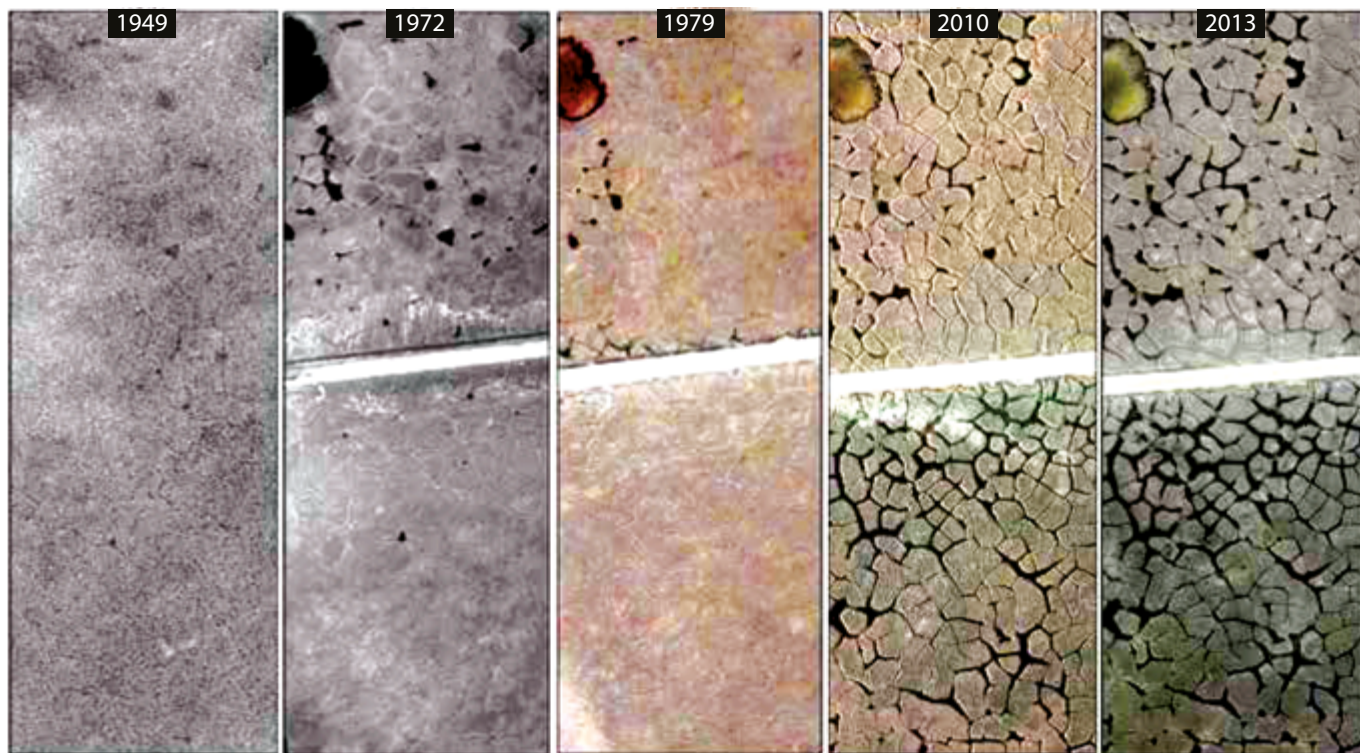
Накопленный в почве органический углерод бывает разного вида ( $\text{CO}_2$  или  $\text{CH}_4$ ) и высвобождается при выбросе газа в атмосферу или переносе растворенного органического углерода или его частиц в реки

## Повышение осведомленности о вечномёрзлых торфяниках

На протяжении более чем столетия и все чаще в течение последних десятилетий регионы вечной мерзлоты становятся объектом научных исследований и технологических разработок, направленных на решение специфических научно-технических задач, связанных с их освоением. Несмотря на усилия участников Международной ассоциации мерзловедения и Глобальной наземной сети наблюдений за вечной мерзлотой, в знаниях по конкретным регионам и ареалам обитания сохраняются значительные пробелы, не в последнюю очередь из-за экстремальных климатических условий, ограниченной доступности и сложной геополитической обстановки. Недавний обзор показал, что более 30 процентов всех цитат в научной литературе, связанных с полевыми экспериментами в Арктике, относятся к работам, проведенным на территориях, прилегающих всего к двум исследовательским станциям: близ озера Тулик на Аляске, США, и в национальном парке Абиску в Швеции.<sup>63</sup> Это может подорвать научный консенсус и привести к неточным прогнозам последствий изменения климата в Арктике.

Учитывая рост осведомленности об изменении климата и таянии арктических льдов, в последних оценках все чаще предпринимаются попытки охватить такие аспекты, как социально-экологические изменения, смена режимов деятельности человека и их влияние на процессы адаптации и трансформации.<sup>64,65</sup> Разрабатываются крупномасштабные исследовательские проекты по изучению последствий оттаивания и деградации вечной мерзлоты. К их числу относится инициатива «Освоение Арктики и адаптация к условиям вечной мерзлоты в переходный период» (ADAPT), участники которой ведут совместную работу с 15 лабораториями, расположенными в различных районах Канады, и другими группами исследователей в целях создания комплексной базы научных исследований по системам Земли в канадской Арктике. Специальные законы, такие как закон провинции Онтарио «О Крайнем Севере» 2010 года, сочетаются с новыми инициативами в области планирования в целях открытия и защиты Крайнего Севера посредством процесса планирования землепользования в консультациях с «первыми нациями».<sup>66</sup>

Арктический совет, который среди прочего в 2017 году опубликовал доклад о роли снега, воды, льда и вечной мерзлоты



Прогрессирующее развитие термокарста по причине оттаивания вечной мерзлоты в период 1949–2013 годов на исследовательском объекте, расположенном в заливе Прадхо, Аляска, Соединенные Штаты Америки. Белой линией отмечена автомагистраль Спайн-Роуд, проложенная в 1969 году.

Источник: Walker et al. (2014)<sup>52</sup>



в Арктике, является примером активного международного сотрудничества, играющего чрезвычайно полезную роль в генерировании и накоплении знаний, необходимых для разработки национальной и международной политики.<sup>15,67</sup> Хотя и признается, что арктические государства играют ключевую роль в процессе освоения этого региона, усилия других субъектов, призванные обеспечить охрану вечномерзлых торфяников и повышение осведомленности о них, также необходимы. Ряд международных организаций, таких как Межправительственная группа экспертов по изменению климата (опубликовавшая Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях изменяющегося климата), Всемирная метеорологическая организация и Международный научный совет в лице Международного арктического научного комитета, принимают все более активное участие в этой работе, содействуя повышению уровня осведомленности и понимания последствий экологических изменений в Арктике.



Фотография предоставлена: Hans Joosten

Оттаивание вечной мерзлоты привело к возникновению термокарстовых образований на торфяниках близ Нарьян-Мара, Ненецкий автономный округ, Россия



### Закон провинции Онтарио «О Крайнем Севере» и роль «первых наций» в защите вечномерзлых торфяников

На территории между 50–57°с.ш. и 79–94°з.д. расположен **Крайний Север канадской провинции Онтарио** — динамично меняющийся ландшафт, образующий среду обитания биомов арктического, бореального и умеренного пояса. Доминирующей особенностью ландшафта в этом районе являются торфяники, которые покрывают 47 процентов или 21 миллион гектаров территории Крайнего Севера и являются хранилищем около 36 гигатонн углерода в виде торфа.<sup>68</sup> Это эквивалентно четверти объема углерода, накопленного во всех торфяниках Канады.

В принятом в октябре 2010 года **законе провинции Онтарио «О Крайнем Севере»** признается важная роль районов Крайнего Севера в накоплении и связывании углерода и предусматривается планирование землепользования на уровне общин в качестве одной из стратегий активного противодействия изменению климата.<sup>66,69</sup> Основное внимание в этом законе уделяется значительной роли «первых наций» — коренных народов Канады, которые не являются метисами или инуитами, — в планировании землепользования, включающем культурные, социальные, экологические и экономические аспекты.

В соответствии с этим законом **стратегия землепользования на Крайнем Севере** предусматривает оказание помощи в подготовке общинных планов землепользования при одновременном учете вопросов, выходящих за рамки отдельных областей планирования, таких как традиционные знания коренных народов. Четыре цели, изложенные в стратегии, предусматривают:

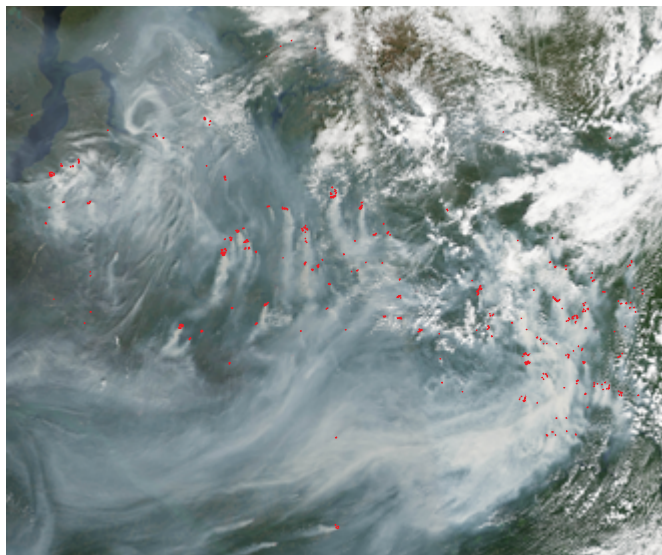
1. обеспечение значимого участия «первых наций» в процессе планирования;
2. охрану экологических систем и мест, имеющих культурную ценность, на Крайнем Севере посредством включения не менее 225 000 км<sup>2</sup> территории региона во взаимосвязанную сеть охраняемых природных территорий, определенных в планах землепользования на уровне общин;
3. поддержание биологического разнообразия, экологических процессов и функций, включая хранение и связывание углерода на Крайнем Севере;
4. обеспечение устойчивого экономического развития на благо «первых наций».

Разработку этой стратегии планировалось завершить в 2016 году, но этот процесс все еще продолжается при ведущей роли заинтересованных представителей «первых наций», которые работают в тесном контакте с Министерством природных ресурсов и лесного хозяйства провинции Онтарио. Часть общинных планов землепользования уже утверждена, часть находится в процессе разработки, а остальные либо уже осуществляются, либо к их реализации пока еще не приступили.<sup>70</sup> Несмотря на достигнутый прогресс, сохраняется неопределенность в отношении путей достижения некоторых целей закона, в том числе в области государственного управления, и особенно в части накопления научных знаний. С тем чтобы разработать надлежащие политические установки и меры реагирования в области государственного управления, абсолютно необходимо обеспечить понимание того, каким образом изменение климата сказывается на процессах связывания и хранения углерода в торфяниках Крайнего Севера, а также отражается на сопутствующих экологических процессах.

## Первоочередные задачи в области накопления знаний и расширения сетей взаимодействия

В отношении того, как быстро вечномерзлые торфяники будут претерпевать определенные изменения и каковы будут последствия этих изменений как на местном, так и на глобальном уровне, сохраняется значительная степень неопределенности. Для финансирования дальнейших исследований в долгосрочной перспективе и разработки работоспособных стратегий уменьшения уязвимости требуется наладить международное сотрудничество. Странам необходимо вести совместную работу по реализации ряда практически осуществимых мер, обеспечивающих признание и применение традиционных и местных знаний, способствующих взаимодействию с заинтересованными сторонами и созданию эффективных сетей наблюдения за состоянием окружающей среды.<sup>15</sup> В то же время реализация образовательных программ и просвещение общественности в отношении рисков, вероятных последствий и возможных вариантов адаптации будут иметь ключевое значение для разработки обоснованных методов государственного управления и политики.

Хотя в настоящее время существует сеть наблюдательных станций, предоставляющих информацию об общих тенденциях изменения вечной мерзлоты, распределены они по поверхности Земли весьма неравномерно. В частности, отмечаются крупные пробелы в сети по всей центральной части канадской и среднесибирской Арктики, в Гренландии, на Крайнем Северо-Востоке России, Тибетском плато



Фотография предоставлена: NASA Earth Observatory/Jesse Allen and Joshua Stevens  
Спутниковый снимок от 19 июля 2016 года показывает плотные клубы дыма над вечномерзлыми торфяниками северных районов центральной части России. Красные разграничительные линии указывают на высокие температуры поверхностного слоя, вероятно, вызванные торфяными пожарами.

и в субарктическом регионе.<sup>30,63</sup> Своевременная оценка состояния вечной мерзлоты в мировом масштабе потребует расширения существующих исследовательских сетей для формирования более всеобъемлющей сети мониторинга. В идеале эту расширенную сеть следует организовать таким образом, чтобы она была удобной в использовании для всех заинтересованных сторон — от ученых-климатологов до широкой общественности и основанной на использовании результатов стандартизированных измерений и легкодоступных баз данных.<sup>15,64</sup> Страны с обширными зонами вечной мерзлоты только выиграют от подготовки планов адаптации, основанных на результатах оценки потенциальных рисков и включающих стратегии смягчения последствий в том, что касается ущерба и издержек, связанных с деградацией вечной мерзлоты.<sup>64</sup>

В качестве объектов повышенного внимания вечномерзлые торфяники, хранящие и высвобождающие углерод, представляют собой особую, весьма разнообразную и динамично меняющуюся среду, которая охватывает сложные взаимосвязи между углеродом, накопленным в почве, гидрологией, вечной мерзлотой, растительностью и деятельностью человека. Основные пробелы в знаниях обусловлены ограниченным пониманием того, как эти процессы взаимосвязаны, а также в нехватке современных исследований и моделей. Требуется провести дополнительные исследования для определения точного месторасположения вечномерзлых торфяников, причин их изменения и потенциала высвобождения углерода. Необходимо, чтобы климатические модели включали прогноз выбросов углерода в атмосферу в результате мобилизации углерода, связанного в вечной мерзлоте. Чтобы лучше описать реакцию вечномерзлых торфяников на изменение климата и реакцию климата на изменение торфяников,



**Видеоматериал: Восстановление торфяников в России в целях предотвращения пожаров и смягчения последствий изменения климата**



Фотография: Пожар в зарослях карликовой березы в тундре в Республике Коми, Россия  
Видеоматериал доступен по адресу:  
[https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu\\_nPHYM](https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu_nPHYM)

Фотография предоставлена:  
Hans Joosten  
© Wetlands International

▶ **Видеоматериал: Торфяники — регулирование климата и биоразнообразие**



Плоские палсы в Республике Коми, Россия  
Видеоматериал доступен по адресу:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ZcxZ9gvNfSU>

Фотография предоставлена:  
Hans Joosten  
© Naturstyrelsen

крайне важно перейти к проведению междисциплинарных исследований. Это потребует осуществления интеграции полевых наблюдений и ретроспективных, или палеоэкологических, исследований, дистанционного зондирования и динамического моделирования.<sup>22,30</sup> Физическая и многокомпонентность вечномерзлых торфяников и значительные потенциальные риски их деградации и разрушения также требуют принятия в большей степени целостного подхода к планированию землепользования и управлению им, что, в свою очередь, предполагает необходимость углубления комплексных знаний, которыми располагают специалисты по вопросам планирования и директивные органы.

В Арктике уже наблюдаются существенные изменения. Даже при условии полного осуществления Парижского соглашения в соответствии с Рамочной конвенцией Организации Объединенных Наций об изменении климата пока еще сохраняется вероятность того, что к концу нынешнего столетия окружающая среда Арктики будет совершенно иной, чем сегодня.<sup>15</sup> Почти неизбежное ускорение воздействия усиливает настоятельную необходимость в местных и региональных стратегиях адаптации, нацеленных на эти северные экосистемы с высокой плотностью углерода. Осмотрительный подход к управлению вечномерзлыми торфяниками будет иметь ключевое значение для ограничения выбросов парниковых газов в атмосферу, уменьшения уязвимости человека и окружающей среды, а также для создания долгосрочной устойчивости к изменению климата.



Фотография предоставлена: Franziska Tanneberger  
Вечномерзлая топь с палсами близ Ноябрьска, Западная Сибирь, Россия

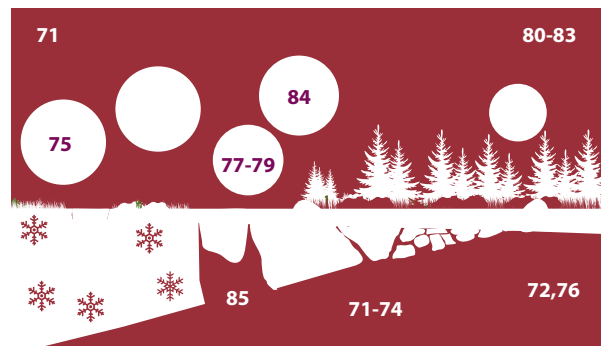
## Список использованной литературы

- Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L. et al. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J. et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Strauss, J., Schirmer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C. et al. (2017) Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172, 75–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
- Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Version 2*. Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. [https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa\\_browse.html](https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html)
- Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D., Hugelius, G., Kuhry, P. et al. (2016). Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nature Communications* 7, 13043. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13043>
- Brown, R.J.E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the USSR. *Arctic* 13(3), 163–177. <http://pubs.aina.ucalgary.ca/arctic/Arctic13-3-163.pdf>
- Gravis, G.F., Melnikov, E.S., Guo, D., Li, S., Li, S., Tong, B. et al. (2003). Principles of classification and mapping of permafrost in Central Asia. *8th International Conference on Permafrost 2003*. Arenson, L.U., Springman, S.M. and Phillips, M. (eds.). AA Balkema Publishers. 297–302
- Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.J., Walsh, J.E., Wang, M. et al. (2017). Surface Air Temperature. Arctic Report Card: Update for 2017. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/Surface-Air-Temperature>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Park, H., Kim, Y. and Kimball, J.S. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment* 175, 349–358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.046>
- Minayeva, T., Sirin, A., Kershaw, P. and Bragg, O. (2018). Arctic peatlands. In *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. by Finlayson, C.M., Milton, G.R., Prentice, R.C. and Davidson, N.C. (eds.). Dordrecht, NL: Springer 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3\\_109](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_109)
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017a). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost-in-the-Arctic-SWIPA-2017/1610>
- Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.R., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G. et al. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change* 119(2), 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
- Koven, C.D., Schuur, E.A.G., Schädel, C., Bohn, T.J., Burke, E.J., Chen, G. et al. (2015). A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140423. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
- Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P. et al. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6, 950–953. <https://www.nature.com/articles/nclimate3054>
- Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R. et al. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9(1), 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
- Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V.E. and Schuur, E.A.G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters* 11, 040201. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
- Shur, Y.L. and Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
- Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, E., Roland, T.P. et al. (2015). The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Nature Scientific Reports* 5, 17951. <https://doi.org/10.1038/srep17951>
- Gao, Y. and Couwenberg, J. (2015). Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Global Change Biology* 21(2), 803–815. <https://doi.org/10.1111/gcb.12742>
- Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. and Christensen, T.R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00655.x>
- Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., Evans, R.J. and Scott, K.D. (2007). The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13(9), 1922–1934. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01381.x>
- De Klerk, P., Donner, N., Karpov, N. S., Minke, M. & Joosten, H. 2011. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca. 1250 years. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3013–3031. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.016>

27. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252–8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
28. Hartfield, G., Blunden, J. and Arndt, D.S. (eds.) (2018). State of the climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), Si–S332. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
29. Baltzer, J.L., Veness, T., Chasmer, L.E., Sniderhan, A.E. and Quinton, W.L. (2014). Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. *Global Change Biology* 20(3) 824–834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>
30. Carpino, O.A., Berg, A.A., Quinton, W.L. and Adams, J.R. (2018). Climate change and permafrost thaw-induced boreal forest loss in northwestern Canada. *Environ. Res. Lett.* 13, 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad74e>
31. Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications* 9(1), 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
32. Jones, B.M., Grosse, G., Arp, M.C., Jones, K.M., Walter, A. and Romanovsky, V.E. (2011). Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 116, G00M03. <https://doi.org/10.1029/2011JG001666>
33. Jones, M.C., Grosse, G., Jones, B.M. and Walter Anthony, K.M. (2012). Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 117, G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011JG001766>
34. Jones, B.M. and Arp, C.D. (2015). Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 119–128. <https://doi.org/10.1002/ppp.1842>
35. Van Huissteden, J., Berrittella, C., Parmentier, F.J.W., Mi, Y., Maximov, T.C. and Dolman, A.J. (2011). Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change* 1, 119–123. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1101>
36. Roach, J., Griffith, B., Verbyla, D. and Jones, J. (2011). Mechanisms influencing changes in lake area in the Alaskan boreal forest. *Global Change Biology* 17, 2567–2583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02446.x>
37. Jepsen, S.M., Voss, C.I., Walvoord, M.A., Minsley, B.J. and Rover, J. (2013). Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA. *Geophysical Research Letters* 40, 882–887. <https://doi.org/10.1002/grl.50187>
38. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15(3), 549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
39. Jones, B.M., Kolden, C.A., Jandt, R., Abatzoglou, J.T., Urban, F. and Arp, C.D. (2009). Fire behavior, weather, and burn severity of the 2007 Anaktuvuk river tundra fire, North Slope, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41, 309–316. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.3.309>
40. Hu, F.S., Higuera, P.E., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Duffy, P.A., Brubaker, L.B. et al. (2010). Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, G04002. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001270>
41. Hu, F.S., Higuera, P.E., Duffy, P.A., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(7), 369–377. <https://doi.org/10.1890/150063>
42. Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.N., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et al. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire. *Nature* 475, 489–492. <https://www.nature.com/articles/nature10283>
43. Kelly, R., Chipman, M.L., Higuera, P.E., Stefanova, I., Brubaker, L.B. and Hu, F.S. (2013). Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, 13055–13060. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305069110>
44. Rupp, T.S., Duffy, P., Leonawicz, M., Lindgren, M., Breen, A., Kurkowski, T. et al. (2016). Climate scenarios, land cover, and wildland fire. In Zhu, Z. and McGuire, A.D. (eds.), *Baseline and projected future carbon storage and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of Alaska*. USGS Professional Paper 1826, 17–52
45. Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al. (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120490. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
46. Arctic Climate Impact Assessment (2005). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
47. Riley, W.J., Subin, Z.M., Lawrence, D.M., Swenson, S.C., Torn, M.S., Meng, L. et al. (2011). Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences* 8, 1925–1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
48. Gao, X., Schlosser, C.A., Sokolov, A., Walter Anthony, K., Zhuang, Q. and Kicklighter, D. (2013). Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environmental Research Letters* 8(3), 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035014>
49. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirmermeister, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S. et al. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12(11), 3469–3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
50. Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camilli, P., Tarnocai, C. et al. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
51. Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrestalev, L.N., Ladanyi, B. et al. (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *ACIA: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 908–944.
52. Walker, D.A., Reynolds, M.K., Buchhorn, M. and Peirce, J.L. (eds.) (2014). *Landscapes and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*. Alaska Geobotany Center Publication AGC 14-01. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks. [https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014\\_agc14-01.pdf](https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf)

53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *Cold Regions Science and Technology* 131, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.004>
55. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B. and Kokorev, V.A. (2017). Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical Review* 107, 125–142. <https://doi.org/10.1111/gere.12214>
56. Jorgenson, T., Shur, Y.L. and Osterkamp, T.E. (2008). Thermokarst in Alaska. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost* 1, 869–876. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks
57. Kokelj, S.V. and Jorgenson, M.T. (2013). Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24, 108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
58. Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. and Osterkamp, T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change* 48, 551–579. <https://doi.org/10.1023/A:100566742>
59. Halsey, L.A., Vitt, D.H. and Zoltai, S.C. (1995). Initiation and expansion of peatlands in Alberta, Canada. *Climate, landscape and vegetation change in the Canadian Prairie Provinces Proceedings* 45–53. Edmonton, Alberta: Canadian Forestry Service. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/18992.pdf>
60. Jorgenson, M.T., Shur, Y.L. and Walker, H.J. (1998). Evolution of a permafrost-dominated landscape on the Colville River Delta, northern Alaska. *Proceedings of Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 523–529.
61. Fortier, D. and Allard, M. (2004). Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(8), 997–1012. <https://doi.org/10.1139/e04-031>
62. Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. and Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31, L18208. <https://doi.org/10.1029/2004GL020358>
63. Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., Becker, M., Berggren, M., Björk, R. G. et al. (2018). Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution* 2, 1443–1448. <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0612-5>
64. United Nations Environment Programme (2012). *Policy implications of warming permafrost*. UNEP : Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8533>
65. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017b) *Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Barents area*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604>
66. Chetkiewicz, C. and Lintner, A. (2014). *Getting it right in Ontario's Far North: the need for a regional strategic environmental assessment in the Ring of Fire [Wawagajing]*. Canada: Wildlife Conservation Society Canada and Ecojustice Canada. [https://www.wcsCanada.org/Portals/96/Documents/RSEA\\_Report\\_WCSCanada\\_Ecojustice\\_FINAL.pdf](https://www.wcsCanada.org/Portals/96/Documents/RSEA_Report_WCSCanada_Ecojustice_FINAL.pdf)
67. Koivuova, T. (2016). Arctic resources: Exploitation of natural resources in the Arctic from the perspective of international law. In *Research Handbooks on International Law and Natural Resources*. Morgera, E. and Kulovesi, K. (eds.) Cheltenham/Northampton: Edward Elgar Publishing. Chapter 17. 349–366. <https://www.elgaronline.com/view/9781783478323.00031.xml>
68. McLaughlin, J.W. and Webster, K. (2013). *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's Far North*. Climate Change Research Report CCCR-34. Canada: Ontario Ministry of Natural Resources. <http://www.ontla.on.ca/library/repository/mon/27008/323518.pdf>
69. Legislative Assembly of Ontario (2010). Ontario House Bill 191 2010. An Act with respect to land use planning and protection in the Far North. Ontario. <https://www.ola.org/en/legislative-business/bills/parliament-39/session-2/bill-191>
70. Government of Ontario (2018). Land use planning process in the Far North. Ontario. <https://www.ontario.ca/page/land-use-planning-process-far-north#section-1>

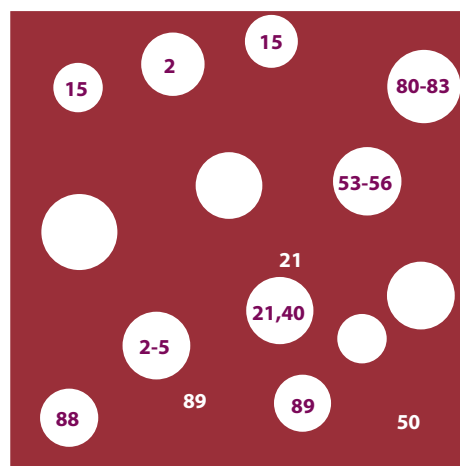
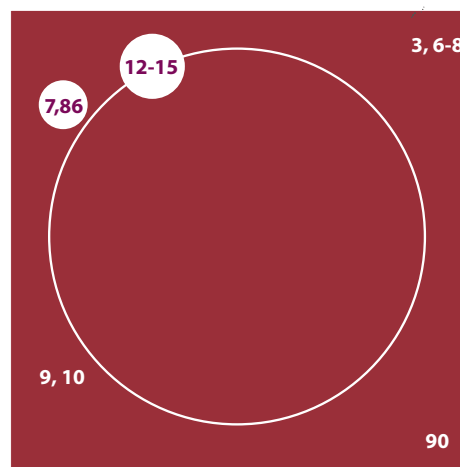
Список использованных графических материалов



71. Washburn, A.L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. London: Edward Arnold.
72. Kujala, K., Seppälä, M. and Holappa, T. (2008). Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology* 52, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
73. Vasil'chuk, Y.K. (2013). Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(1), 82–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.1764>
74. Harris, S.A., Brouchkov, A. and Cheng, G. (2018). *Geocryology: Characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms*. Leiden, NL: CRC Press/Balkema.
75. Burn, C.R. (1998). The response (1958–1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2), 184–199. <https://doi.org/10.1139/cjes-35-2-184>
76. Routh, J., Hugelius, G., Kuhry, P., Filley, T., Kaislahti, P., Becher, M. et al. (2014). Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European

Russian Arctic. *Chemical Geology* 368, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.022>

77. Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M. and Cornelissen, H.C. (2013). Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology* 27, 1442–1454. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
78. Porada, P., Ekici, A. and Beer, C. (2016). Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *Cryosphere* 10, 2291–2315. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2291-2016>
79. Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P.Y., Iijima, Y. and Fedorov, A.N. (2018). Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
80. Chapin III, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A. et al. (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310(5748), 657–660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
81. Blok, D., Heijmans, M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. and Berendse, F. (2010). Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Global Change Biology* 16(4), 1296–1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
82. Briggs, M.A., Walvoord, M.A., McKenzie, J.M., Voss, C.I., Day-Lewis, F. D. and Lane, J.W. (2014). New permafrost is forming around shrinking Arctic lakes, but will it last? *Geophysical Research Letters* 41(5), 1585–1592. <https://doi.org/10.1002/2014GL059251>
83. Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Peregon, A. et al. (2017). Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development* 10, 4693–4722. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4693-2017>
84. Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A. et al. (2015). Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5, 67–70. <https://www.nature.com/articles/nclimate2446>
85. Johansson, M., Christensen, T.R., Åkerman, H.J., and Callaghan, T.V. (2006). What determines the current presence or absence of permafrost in the Torneträsk region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio* 35, 190–197. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[190:WDTCP0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[190:WDTCP0]2.0.CO;2)
86. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. and Armstrong, R.L. (2003). Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds), *Permafrost, Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21–25 July 2003, Volume 2.
87. Joosten, H. and Couwenberg, J. (2008) Peatlands and Carbon. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. (eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99–117. [http://www.imcg.net/media/download\\_gallery/books/assessment\\_peatland.pdf](http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf)



88. Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. III, Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., et al. (2016) Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11: 034014. doi: 10.1088/1748-9326/11/3/034014
89. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., et al. (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 45, 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
90. Brown, J., O. Ferriani, J. A. Heginbottom, and E. Melnikov. 2002. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/nsidc.org/data/GGD318/versions/2>