

УДК 581.524:556.56:551:583

## БОЛОТА И АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫЕ ТОРФЯНИКИ: УГЛЕРОД, ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ, ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

© 2022 г. А. А. Сирин\*

*Институт лесоведения РАН, с. Успенское, Московская обл., Россия*

*\*e-mail: sirin@ilan.ras.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 22.09.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Болота играют особую роль в накоплении углерода, формировании газового состава атмосферы и влиянии на климат. Рассмотрены особенности болотных экосистем, их распространение, разнообразие и современное состояние, реакция на изменение климата, их роль в качестве резервуара углерода, источника и поглотителя парниковых газов и изменение этой роли при воздействии человека. Показаны возможности сокращения выбросов парниковых газов из антропогенно-измененных торфяников, эффективность их обводнения и восстановления болот для смягчения изменения климата, адаптации к изменению климата и обеспечения устойчивости.

*Ключевые слова:* болота, торфяники, изменение климата, углерод, смягчение, адаптация, парниковые газы

**DOI:** 10.31857/S0042132422060096

### ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата принимает все более критические масштабы (IPCC, 2021), наиболее остро проявляясь в высоких широтах и оказывая разную степень воздействия на всей территории России (Второй оценочный..., 2014). Изменение температур сопровождается различными изменениями количества атмосферных осадков в регионах. Усиливается несбалансированность климата, растет статистика экстремальных явлений (сильная жара/холод, засуха, ливни, ураганы и пр.). Помимо прямого влияния, экстремумы способствуют возникновению опасных природных явлений (лесные, торфяные и другие так называемые природные пожары, наводнения и пр.) и оказывают особенно негативное воздействие на экосистемы, хозяйство и здоровье человека. Наблюдаемый аномальный рост содержания диоксида углерода в атмосфере в так называемый индустриальный период (с 1850 г.) свидетельствует о преобладающей роли антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ) в современном потеплении климата (IPCC, 2021), что подтверждается и пространственной согласованностью потепления (Neukom et al., 2019). Однако нельзя не учитывать естественные периоды потепления разного временного масштаба – тысячелетий (межледниковый период), столетий и десятилетий. Необычное потепление последних десятилетий может быть обусловлено

сочетанием естественных и антропогенных факторов (PAGES, 2019).

Принятое в 2015 г. Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (РКИК ООН) Парижское соглашение ([https://unfccc.int/documents?search2=&search3=paris\\_agreement\\_russian\\_.pdf](https://unfccc.int/documents?search2=&search3=paris_agreement_russian_.pdf)) предполагает удержание прироста глобальной средней температуры намного ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней и приложение усилий в целях ограничения роста температуры до 1.5°C, а также повышение способности адаптироваться к неблагоприятным воздействиям изменения климата (ст. 2). По мере смягчения изменений климата путем сокращения выбросов ПГ, прежде всего в энергетике, которая играет ключевую роль в поступлении ПГ в атмосферу (Клименко и др., 2022), возрастающее значение будет приобретать сектор ЗИЗЛХ (землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство), где принимаемые меры будут иметь наибольший экономический эффект (IPCC, 2021).

Сектор ЗИЗЛХ учитывает выбросы и поглощение ПГ, связанных с деятельностью человека (<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/glossary-of-climate-change-acronyms-and-terms>). Природные резервуары углерода как таковые не рассматриваются (<https://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a01.pdf>, <https://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a01.pdf#page=56>), однако без

понимания их специфики и климатической роли сложно оценить последствия антропогенного воздействия. Помимо CO<sub>2</sub>, необходим учет других ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом и обладающих значительно более сильным, чем CO<sub>2</sub>, потенциалом глобального потепления (ППП): метана CH<sub>4</sub> и закиси азота N<sub>2</sub>O, а также выноса растворенного углерода – DOC (dissolved organic carbon) – источника образования углеродсодержащих ПГ (IPCC, 2006).

Особое значение в секторе ЗИЗЛХ могут иметь антропогенные изменения торфяных болот – крупнейшего на суше и второго на планете (после океанических осадков) резервуара долговременного накопления атмосферного углерода, ведущего на суше природного источника метана и в ряде случаев источника закиси азота (Assessment..., 2008). Занимая 0.3% суши, осушенные торфяники<sup>1</sup> выделяют в результате микробного окисления торфа и торфяных пожаров ~2 Гт CO<sub>2</sub>, что составляет ~5% всех антропогенных эмиссий ПГ (Joosten et al., 2016). Эмиссия ими CO<sub>2</sub> в атмосферу может составлять более четверти выбросов ПГ, связанных с сектором ЗИЗЛХ (Tubiello et al., 2016). Из-за осушения болота планеты уже на рубеже 1960-х гг. могли превратиться из нетто-поглотителя в нетто-источник ПГ. Без принятия мер в отношении осушенных торфяников их эмиссия ПГ в 2020–2100 гг. может составить 12–41% объема выбросов ПГ, который необходимо сократить для достижения задач Парижского соглашения по климату (Leifeld et al., 2019).

Соглашение объединяет страны с целью борьбы с изменением климата и адаптации<sup>2</sup> к нему. Оно направлено на принятие решений на базе имеющихся научных данных и на основе национальных планов по борьбе с изменением климата – Определяемых на национальном уровне вкладов (ОНУВ), предполагающих действия по сокращению выбросов ПГ и по устойчивому развитию с целью адаптации к меняющемуся климату. Устанавливается комплексность подхода, не ограниченного задачей сокращения выбросов ПГ. В отношении суши Земли это было показано в Специ-

альном докладе МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) “Изменение климата и земля” (Семенов и др., 2019; Изменение..., 2020; IPCC, 2019b). Его полное название “Об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении земельными ресурсами, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах” отражает необходимость комплексного рассмотрения проблемы изменения климата.

Нами сделана попытка проанализировать специфику болотных экосистем в связи с проблемой изменения климата, их значение в качестве резервуара и накопителя углерода, источника и поглотителя ПГ, влияние использования болот, вопросы учета и возможные меры по сокращению выбросов ПГ, а также другие аспекты, требующие внимания. Чрезвычайно большое количество публикаций по данной проблематике затрудняет их обзор. Поэтому для иллюстрации отдельных аспектов были использованы преимущественно ранее опубликованные нами работы, в которых уже содержится определенный анализ публикаций по конкретным вопросам.

## ЭКОСИСТЕМЫ БОЛОТ

Постоянное или длительное избыточное увлажнение, наличие болотной растительности и отложений торфа – неотъемлемые условия существования торфяного болота. Избыток влаги способствует появлению болотных растений и препятствует разложению их остатков, которые формируют торф. Торф обеспечивает среду обитания этих растений и поддерживает баланс влаги в маловодные периоды. Благодаря физическим свойствам торф способен удерживать влагу, в десятки раз превышающую вес его скелетной части.

Накопление торфа и вертикальный рост торфяной залежи происходят благодаря превышению поступления растительных остатков над разложением в верхнем периодически ненасыщенном (аэробном) слое залежи. Не успевая полностью разложиться, они переходят в насыщенный водой (анаэробный) горизонт. Деление на активный и инертный горизонты (Иванов, 1953), за рубежом: acrotelm и catotelm (Ingram, 1979), широко распространено в экологии болот (Rydin, Jeglum, 2013). Предложенное изначально для гидрологии болот (преимущественно верховых) деление не столь однозначно (Сирин, 1999; Joosten, Clarke, 2002). Изотопные и другие данные показали, что для низинных болот напорного питания водообмен происходит во всей залежи, а для верховых, по крайней мере во всей выпуклой части – минимум до 2–3 м (Сирин и др., 1997). Это способствует микробиологической (Кравченко, Сирин, 2007) и в целом биогеохимической активности (Сирин и др., 1998; Rydin, Jeglum, 2013) этих слоев. Изотоп-

<sup>1</sup> Термин *торфяное болото* используется в отношении болот в естественном состоянии или близком к нему; термин *торфяник* относится ко всем объектам, имеющим или сохранившим торфяную залежь или ее часть, но утратившим болотный растительный покров в результате воздействия человека или других причин (Минаева, Сирин, 2011). Это соответствует международной практике использования терминов  *mire* в первом случае и *peatland* – во втором (Rydin, Jeglum, 2013).

<sup>2</sup> Адаптация к изменению климата (adaptation) означает приспособление природных, социальных или экономических систем в ответ на фактические или ожидаемые климатические изменения, а также их последствия, а смягчение изменения климата (mitigation) заключается в принятии мер по снижению выбросов парниковых газов и увеличению их поглощения.

ные и гидрохимические данные (Sirin et al., 1998; Rydin, Jeglum, 2013) подтвердили известные ранее сведения о наличии водопроводящих слоев в глубине залежей. Образование метана в анаэробных слоях торфа, вероятно, подпитывается молодой органикой (Кравченко, Сирин, 2007; Charman et al., 1994), поступающей сверху благодаря водообмену и термической конвекции. Сезонные колебания температуры даже на верховых болотах достигают глубины 3–4 м и более (Сирин и др., 1998). Корни некоторых осок могут проникать на глубину нескольких метров за минеральным питанием и поставлять благодаря аэренхиме метан на поверхность болота (Jeglum, Rydin, 2013). Процессы разложения в глубоких слоях учитываются в классической модели роста болота (Слуту, 1984), и было бы ошибочно считать эти слои биогеохимически инертными.

Избыточное увлажнение на начальном этапе образования болот создается не только за счет атмосферных осадков, но и других источников: напорных вод (подземные и грунтовые), поемных вод в долинах рек и склоновых, стекающих в понижения рельефа с окружающих пространств. Их сочетание определяет водно-минеральное питание и структурно-функциональные особенности болот (Сирин, 1999), которые меняются по мере накопления торфа. Представленная в стратиграфии смена низинных торфов переходными и верховыми отражает последовательное изменение водно-минерального питания болотной экосистемы.

По мере роста торфяной залежи сокращается поступление грунтовых вод в корнеобитаемый слой, ограничивается минеральное питание, меняется растительный покров. При стабильном поступлении грунтовых вод болота могут не менять свою экологию сколь угодно долго, вне зависимости от роста залежи и поступления атмосферной влаги (Сирин, 1999). В ином случае с ростом залежи наступает момент, когда единственным источником питания остается атмосфера (осадки и пыль). Задействуются механизмы поглощения азота и минеральных веществ: выделение феноловых кислот для их растворения, насекомоедение, симбиоз с почвенными нитрофицирующими микроорганизмами (Минаева, Сирин, 2011). Недостатку влаги верховые болота противопоставляют механизмы защиты. При снижении уровней болотных вод в сухие периоды происходит разрыв капиллярной каймы в рыхлом поверхностном слое торфа, что резко сокращает испарение. Осветление (отмирание гиалиновых клеток) сфагновых мхов повышает альбедо поверхности, при затяжном недостатке осадков распространяются лишайники — потери влаги снижаются. При длительных засухах торфяная залежь может сжиматься, поддерживая таким образом уровень болотных вод относительно корнеобитаемой зоны, а в благоприятный период возвращаться обратно. Фено-

мен дыхания верховых болот был отмечен еще в 1902 г. (С.А. Weber and..., 2002).

Наиболее активные процессы происходят в верхнем корнеобитаемом слое залежи. Поэтому оправдано установление границы в 30 см для разделения торфяных болот и заболоченных мелкоотторфованных земель, как это принято в нашей (Торфяные..., 2001) и большинстве других стран, кроме Северной Америки, где граница полагается на уровне 40 см (Jeglum, Rydin, 2013). Верхний слой торфяной залежи болот определяет текущие условия обитания болотных растений, особенности биологического разнообразия (Минаева, Сирин, 2011). Большинство болот страны формировалось в голоцене после освобождения территории от покровного оледенения или морских вод, и их современное распространение и разнообразие — результат влияния условий среды на протяжении всей истории их развития.

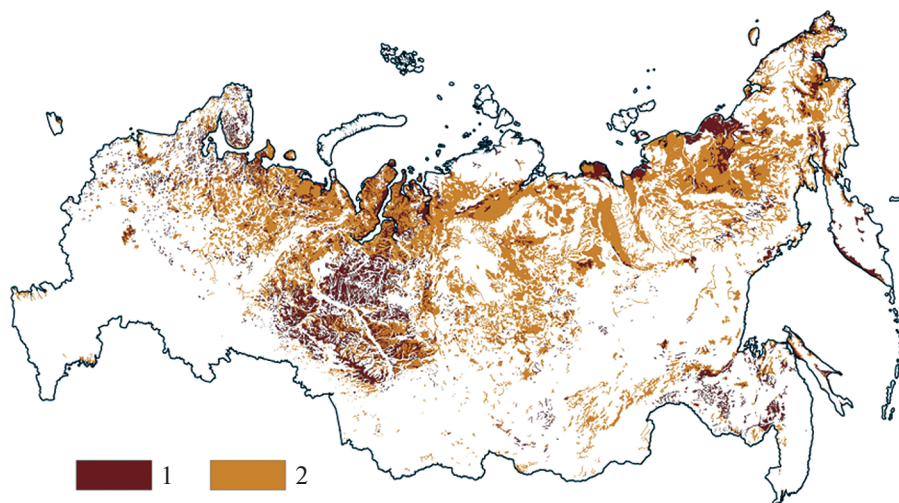
## РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАЗНООБРАЗИЕ БОЛОТ

Торфяные болота<sup>3</sup> — одни из наиболее представленных экосистем на территории РФ (Болота..., 2017). Они занимают 1.39 млн км<sup>2</sup>, а вместе с мелкоотторфованными (мощность торфа менее 30 см) заболоченными землями — 3.69 млн км<sup>2</sup> (рис. 1), или более 1/5 территории страны (рис. 1) (Вомперский и др., 1994, 2005, 2011). Заболоченность районов Европейского Севера или Западной Сибири может достигать 40% и более (Торфяные..., 2001). В европейской части России болота покрывают около 6% территории (~23 млн га), а вместе с мелкоотторфованными землями — 17.5% (~68 млн га) (Sirin et al., 2017). Заболоченность Российской Арктики, включая болота и мелкоотторфованные земли, превышает 30% (Болота..., 2019), и, вероятно, эта оценка занижена.

Болота в России традиционно относятся к разным категориям земель (Торфяные..., 2001), что затрудняет их инвентаризацию и учет<sup>4</sup>. Нами используются данные геоинформационной системы “Болота России” ИЛАН РАН, где интегриро-

<sup>3</sup> Большинство областей знания и отраслей ссылается на закрепленное ГОСТом (Гидрология суши, 1973) определение болота: “природное образование, занимающее часть земной поверхности и представляющее отложения торфа, насыщенные водой и покрытые специфической растительностью”. В ботанике наличие торфа не является обязательным атрибутом болота (Нищенко, 1967), и для исключения семантических разночтений все шире используется термин *торфяное болото*, отраженный еще в Декрете СНК РСФСР от 17.05.1922 “О торфяных болотах”.

<sup>4</sup> Водный кодекс РФ (Водный кодекс, 2006) относит болота к особым водным объектам, однако потребуется значительное время для внесения их в реестр, и одинаковые по типу болотные массивы (например, верховые) могут относиться к разным категориям земель с отличным, как следствие, законодательно-нормативным регулированием.



**Рис. 1.** Торфяные болота (торф >30 см) и заболоченные мелкоотторфованные земли (торф <30 см) в Российской Федерации. ГИС “Болота России” ИЛАН РАН (по Вомперский и др., 2011, с изменениями).

вана различная информация на основе данных почвенного картографирования (Вомперский и др., 1994, 2005). Проблема инвентаризации болот существует повсеместно (Joosten, Clarke, 2002; Assessment..., 2008), включая страны Европы (Tanneberger et al., 2017). Необходимы наземные данные, трудоемкие в получении и не совпадающие для разных стран, регионов, типов земель, что затрудняет интеграцию. Дистанционное зондирование Земли не позволяет достоверно определить наличие торфа, однако может быть эффективно применено для анализа растительного покрова болот, включая древесный (Вомперский и др., 2011), для оценки состояния болот (Медведева и др., 2011), для привязки наземных данных (Сирин и др., 2014). Особые сложности возникают при инвентаризации лесных болот (Вомперский и др., 2011) там, где болотная растительность утратила характерные черты, например при недостатке увлажнения и воздействии выпаса (Ильясов и др., 2018; Minayeva et al., 2005), а также в тундре из-за сходства растительности на участках с торфом и без него (Экологическая..., 2016).

Болота занимают примерно 3% суши планеты. В нашей стране находится более трети площади болот мира (Global..., 2022) и почти 40% болот Европы (Tanneberger et al., 2017). Более 20% площади болот страны – мерзлые (полигональные и бугристые), переходные болота – около 30%, верховые и низинные – по 18%, остальные площади заняты грядово-мочажинными и грядово-озерковыми комплексами (Вомперский и др., 2005). 62% болот – открытые, 21% – покрыты редколесной, а 17% – лесной растительностью (Вомперский и др., 2011). Разнообразие болот многократно шире и представлено на разных пространственных уровнях: болотных систем (комплексов болот), массивов (болот), микроландшафтов (фаций), микроформ (кочка, гряда, мочажина), элементов мозаики растительности (Минаева, Сирин, 2011; Rydin, Jeglum, 2013). На всех уровнях многообразие болот отражает различия в экологических условиях, в воздействии на внешнюю среду, на процессы и явления. Локальное воздействие может иметь более масштабные последствия (Minayeva et al., 2017). Важность сохранения целостности болот была закреплена на законодательном уровне (Водный кодекс, 2006, ст. 57), где предписано: “Осушение либо иное использование болот или их частей не должно приводить к ухудшению состояния неиспользуемых частей этих болот...”.

АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫЕ ТОРФЯНИКИ

#### АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫЕ ТОРФЯНИКИ

Значительная часть болот сохранилась в естественном состоянии, однако более 8 млн га болот страны были осушены для сельского и лесного хозяйства, добычи торфа: оценки приблизительны из-за неполной инвентаризации и специфики отраслевого учета (A quick scan..., 2009). Основные площади осушенных торфяников расположены в европейской части страны (Сирин et al., 2017; Tanneberger et al., 2017, 2021), на юге Западной Сибири и Дальнего Востока. В некоторых областях и республиках Центра европейской части России и Поволжья была осушена и освоена большая часть болот (A quick scan..., 2009).

Наибольшее воздействие на болота оказала добыча торфа, особенно фрезерным способом – самым распространенным в России и многих странах промышленным методом, который предполагает интенсивное осушение торфяного массива. По одним оценкам, торфоразработками бы-

ло изменено 0.85–1.5 млн га, по другим – 0.9 млн га болот, 70% которых – фрезерной добычей (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021b). После выработки они подлежали рекультивации преимущественно для сельского хозяйства, реже – других целей. Нерекультивированные, частично или планомерно выработанные площади накапливались, особенно в 1990-х гг. (Сирин и др., 2011; A quick scan..., 2009). По статистическим данным, площадь торфопроизводства снижалась с 2000 г. по 2007 г. с 261 до 219 тыс. га (Романовская и др., 2014). Эти данные включают как действующие, так и заброшенные месторождения, текущее состояние которых требует оценки. Зброшенныя поля фрезерной добычи плохо зарастают растительностью и могут годами сохранять открытые участки торфа, выявляемые по спутниковым данным (Медведева и др., 2011, 2017; Сирин и др., 2020).

Торфяники, осушенные и используемые в сельском хозяйстве, могут занимать площадь до 5 млн га. Точно оценить сложно, поскольку статистика не делит осушенные площади с торфяными, торфянистыми и переувлажненными минеральными почвами (Торфяные..., 2001). Много болот было осушено для сельского хозяйства в долинах рек, в том числе в лесостепной зоне, по причине доступности и хозяйственного интереса к органическим почвам. Значительные площади используются в сельском хозяйстве после рекультивации частично выработанных фрезерным способом торфяных месторождений. Многие торфяники, осушенные и используемые ранее под пропашные культуры и сенокосы, были брошены в последние десятилетия и зарастают рудеральной и древесно-кустарниковой растительностью. В более южных районах, например в лесостепной зоне, они могли настолько деградировать, что идентифицируются только по положению в рельефе и вскрытием сохранившихся под антропогенными почвами торфяных отложений (Ильсов и др., 2018).

Более 4 млн га болот было осушено для лесного хозяйства в центре, на северо-западе и западе европейской территории России, на юге Западной Сибири и в других регионах (Торфяные..., 2001). Чтобы избежать дефицита влаги при недостатке осадков, для лесного хозяйства применяется шадящее осушение, а с учетом сохранения исходного древостоя это определяет меньшее воздействие на торфяник, по сравнению с другими видами использования. При правильном выборе объектов, проведении гидромелиоративных и лесохозяйственных работ здесь могли сформироваться продуктивные древостои, однако во многих случаях ожидаемого существенного эффекта для лесного хозяйства не было.

Осушение и освоение болот для любого использования сопровождалось строительством дорожной

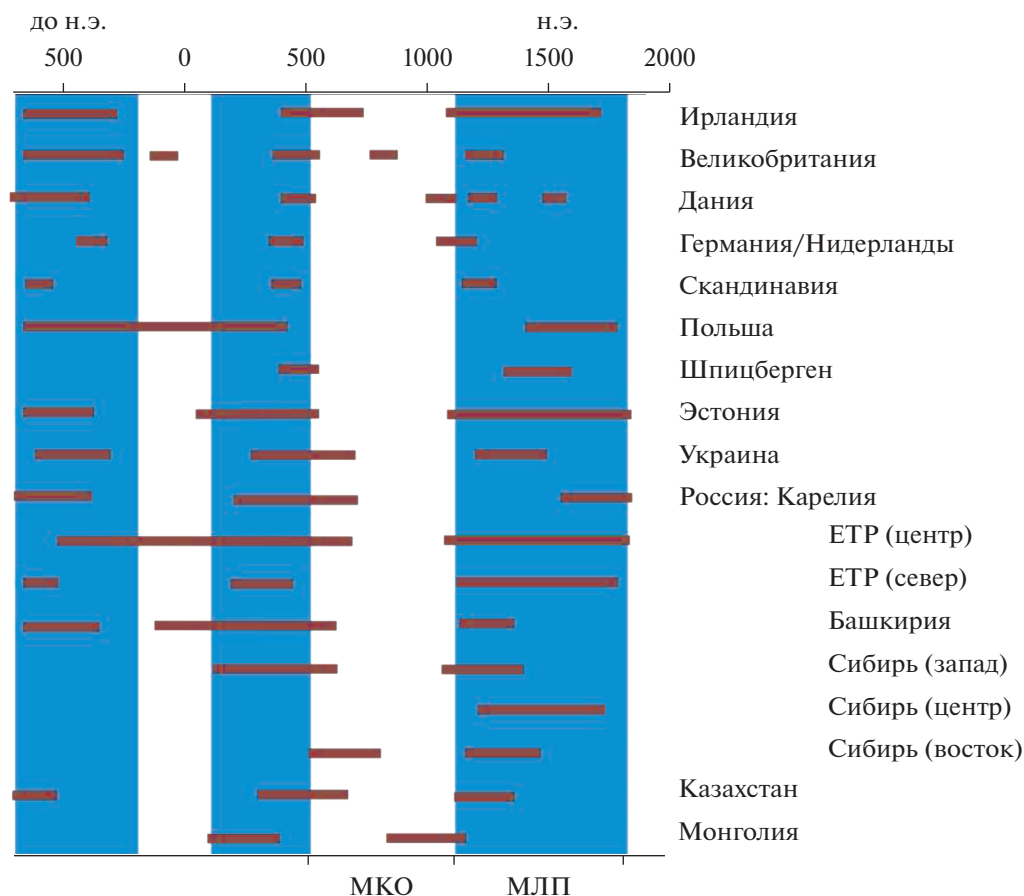
сети. Создание транспортной (дороги, нефте- и газопроводы) и иной инфраструктуры в заболоченных регионах без хозяйственного интереса непосредственно к болотам также приводит к изменению водного режима, растительности и экологического состояния прилегающих площадей болот. С учетом протяженности данных объектов суммарные площади таких воздействий могут быть очень значительными.

## БОЛОТА И КЛИМАТ

Термический режим и осадки определяют возможность образования торфа: необходимы достаточная первичная продукция и препятствие ее полному разложению. Этим объясняется то, что болота в основном приурочены к умеренной зоне и влажным тропикам (Charman, 2002). С климатическим фактором связано современное разнообразие болот. Некоторые болота (черноольховые, тростниковые и др.) могут встречаться в разных природных зонах, другие – климатически детерминированы. Такими являются мерзлые болота (полигональные и бугристые), морфология которых обязана сочетанию мерзлотного протаивания, выпучивания и растрескивания (Minayeva et al., 2019).

Болота сохраняют в торфяных отложениях информацию как об изменении климата прошлого (споры и пыльца растений окружающих пространств), так и о своем текущем состоянии (Barber, 1981; Charman, 2002; Rydin, Jeglum, 2013). Ботанический состав, степень разложения, другие характеристики торфа, угли, прослойки пепла и минеральные включения информируют о растительном покрове, водном режиме и экологическом состоянии болота (Barber, 1981; Charman, 2002; Rydin, Jeglum, 2013). Это позволяет оценить его реакцию на изменение климата в прошлом (Barber, 1981; Charman, 2002; Assessment..., 2008; Peatlands and climate..., 2008; Rydin, Jeglum, 2013) и делать прогнозы на будущее.

Имеется много данных о развитии болот на фоне палеоклиматических условий (Charman, 2002; Peatlands and climate..., 2008), в некоторых случаях возможно получение информации в столетнем масштабе (Клименко и др., 2001). Свидетельством резких, возможно, климатически обусловленных изменений могут быть следы пожаров, смыва отдельных горизонтов и т.д. Особый интерес представляет реакция болот на изменение климата последних тысячелетий, когда они находились на близкой современной стадии развития. Для всей Евразии прослеживается рост болот в холодные и его сокращение в теплые термические фазы (рис. 2) (Климанов, Сирин, 1997; Klimanov, Sirin, 1997), в том числе в малый климатический оптимум (900–1200 лет назад) и малый ледниковый период (1300–1850 гг.) – характерные палеоклима-



**Рис. 2.** Периоды активного роста болот в Евразии в субатлантический период голоцена (по: Климанов, Сирина, 1997; Klimanov, Sirin, 1997, с изменениями). ЕТР – европейская территория России; МКО – малый климатический оптимум; МЛП – малый ледниковый период.

тические периоды прошлого тысячелетия (Fagan, 2000). Эти фазы состоят из разновременных термических колебаний (PAGES, 2019) и свидетельствуют об общих тенденциях реакции болот, которые могут быть намного сложнее (Rydin, Jeglum, 2013). Моделирование с учетом динамики болот в прошлом прогнозирует (при значительной неопределенности) сокращение площади болот и запаса в них углерода с усилением этой тенденции при росте климатических изменений (Müller, Joos, 2021).

Устойчивость болот определяется их гидрологией (Иванов, 1975). Низинные болота – более субсидируемые системы (Lugo et al., 1990): дополнительный приток влаги обеспечивает их независимость от изменений атмосферного увлажнения. Сравнение расположенных рядом верховых и низинных болот в центре европейской территории России показало большую стабильность последних на протяжении трех тысячелетий. Реакция верховых болот отличалась в зависимости от условий стока с них воды, определяемых характером залегания – на суглинках или песках (Сирина,

1999). Более детальное рассмотрение выявило различия в их реакции и на менее длительные изменения климата (Rauber, 2002).

Суточное и в пределах сезона изменение погодно-климатических условий влияет на физиологические процессы в живых организмах, круговорот вещества и энергии. В масштабах года могут меняться сроки фенологических явлений. За десятилетие и более возможны изменения видовой структуры, состава и доминирования видов. В масштабе столетия и более возможно смещение границ биомов. Ввиду высокой специфичности экологических условий видовой состав обитателей болот достаточно устойчив, их присутствие будет зависеть от сохранения данного местообитания. Состояние болот и их пространственная структура определяют видовое разнообразие болотной растительности. При деградации и потере болотных местообитаний наиболее угрожаемыми будут облигатные гелофиты (Минаева, Сирина, 2011).

Современное изменение климата уже сказывается на болотах. Параллельно с распространением древесной растительности в тундре и подня-

тия верхней границы леса в горах (IPCC, 2019b) отмечается рост облесенности болот (Lachance et al., 2005). Потепление усиливает таяние мерзлоты, однако реакция мерзлых болот разнонаправлена и ее значительность не подтверждается (Heffernan et al., 2020). Увеличивается частота торфяных пожаров (Turetsky et al., 2015), которые могут возникать от тундры до степей (Minayeva et al., 2012). Растет уязвимость болот южных регионов, степи и лесостепи. Усиливающаяся засушливость климата (Lu et al., 2009) и снижение продуктивности пастбищ дренированных местообитаний смещает выпас на более влажные, торфяные почвы, менее устойчивые к его воздействию (Minayeva et al., 2005). Антропогенный фактор увеличивает уязвимость болот к изменению климата. Дорожная сеть способствует протаиванию мерзлых болот (Экологическая..., 2016), неиспользуемые осушенные болота лесной зоны наиболее подвержены торфяным пожарам (Sirin et al., 2020), перевыпас нарушает растительный покров более южных торфяников, способствуя деградации торфяных почв, водной и ветровой эрозии. Это ведет к потере углерода, увеличивает эмиссию ПГ и, в конечном счете, оказывает обратное воздействие болот на климат.

#### УГЛЕРОД И ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ

Болота играют особую роль в формировании газового состава атмосферы. Запас углерода болот составляет  $500 \pm 100$  Гт С (Yu, 2012), и существующие оценки варьируют: только для северных болот в диапазоне 300–600 Гт С (Qiu et al., 2021). Это более 20% почвенного углерода, 60% атмосферы и больше углерода биомассы лесов (Joosten et al., 2016). На нашу страну может приходиться от 1/5 (Вомперский и др., 1994) до 1/3 (Botch et al., 1995) углерода болот мира. Во всех природных зонах болота многократно опережают зональные экосистемы по запасу углерода на единицу площади: в тундре в 3.5 раза, а в таежной зоне в 7 раз (Assessment..., 2008).

Болота лидируют на суше и занимают второе место на планете после океанических осадков как долговременные накопители углерода атмосферы. Большая часть угля и значительная доля нефти и газа являются результатом преобразования отложений болот прошлых геологических эпох (Assessment..., 2008). Есть мнение, что связывание углерода в торфяниках в период межледниковий — основная причина снижения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и возможный спусковой механизм для наступления оледенений (Joosten et al., 2016). Значения долговременного относительного накопления углерода (long-term apparent rate of carbon accumulation — LARCA или LORCA), определяемые по датировкам торфа по  $^{14}\text{C}$  и запасу углерода в вышележащем слое, составляют для северных болот 25–35 г  $\text{м}^{-2}$  год $^{-1}$  (Rydin, Jeglum,

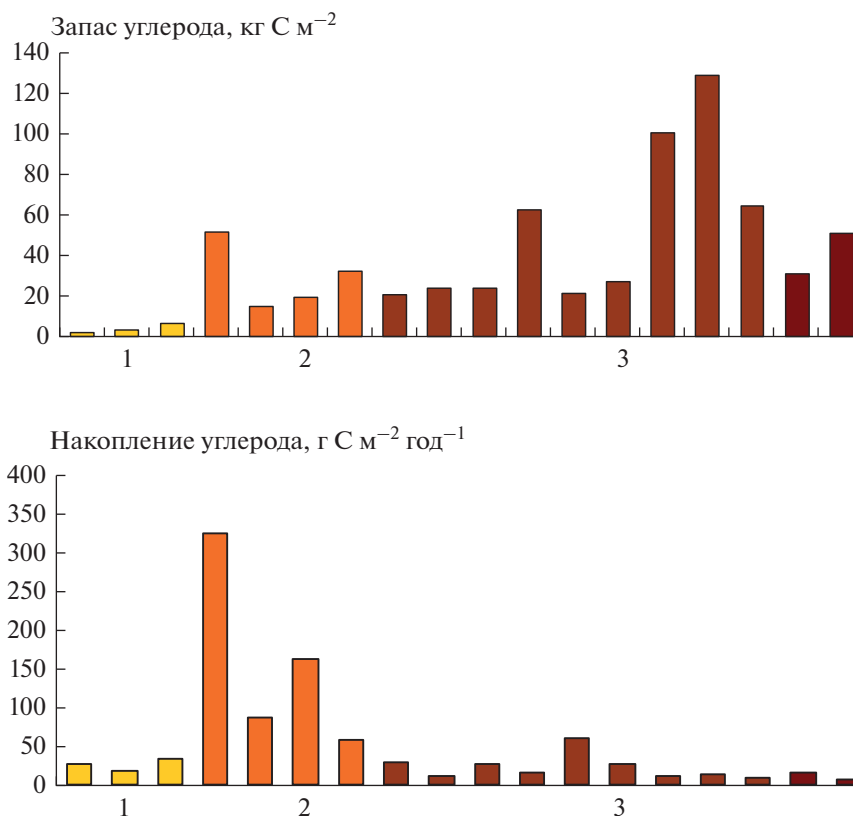
2013). Намного выше они могут быть для мелкоотторфованных земель (рис. 3) (Минаева и др., 2008), роль которых с учетом их площадей в стране (Вомперский и др., 1994, 2005, 2011) явно недооценивается.

Поглощая  $\text{CO}_2$  из атмосферы в результате фотосинтеза и накапливая его в торфе, болота выделяют метан и в некоторых случаях закись азота (рис. 4) — парниковые газы с более высоким, относительно  $\text{CO}_2$ , ПГП. Периодически корректируемый в сторону увеличения он сейчас составляет за 100-летний период 25 и 298 соответственно (<https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf>). Результирующее влияние болот на парниковый эффект будет зависеть прежде всего от соотношения величин  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Болота — основной источник метана на суше, а вклад северных болот может составлять в зависимости от оценки их площади 31–38 Тг  $\text{CH}_4$  год $^{-1}$  (Peltola et al., 2019). Время пребывания  $\text{CH}_4$  в атмосфере существенно короче, чем  $\text{CO}_2$ , и в долгосрочной перспективе торфяники оказывают охлаждающее влияние на климат (Frolking, Roulet, 2007). На коротких интервалах при рассмотрении влияния хозяйственной деятельности и мер по смягчению изменения климата необходим учет всех связанных с болотами ПГ.

На потоки ПГ в болотах влияет широкий спектр сложно взаимосвязанных биологических, физических и химических процессов (Assessment..., 2008), их баланс может меняться в зависимости от погодно-климатических условий. Болото, являющееся стоком  $\text{CO}_2$  в нормальный год, становится источником  $\text{CO}_2$  не только в жаркий и сухой, но и во влажный и прохладный год (Aleksyuchik et al., 2021). Разные болота и в разных регионах могут действовать асинхронно. Это затрудняет общие оценки и прогноз влияния естественных болот на изменение климата. Расчеты по разным моделям предполагают скорее нейтральную роль болот в балансе парниковых газов в перспективе, но и смещение в сторону их отрицательного влияния при потеплении климата (Qiu et al., 2021). Последнее согласуется и с другими прогнозами, сопровождаемыми справедливым, на наш взгляд, заключением о сложности анализа, недоучете роли болот и недостатке знаний для понимания взаимосвязи болот, углерода и климата (Loisel et al., 2021).

#### АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ

Осушение болот для любых целей изменяет водный режим болот и соотношение периодически аэробной активной и постоянно анаэробной инертной зон (рис. 4) (Laine et al., 1996). Меняются процессы и, как следствие, потоки ПГ, степень



**Рис. 3.** Запас и накопление углерода в минеральных почвах суходольных местообитаний (1); в торфянисто и торфяно-глебовых почвах мелкоотторфованных местообитаний и мелкозалежных болот (2); в торфяных почвах верховых и низинных болот (3) (по: Минаева и др., 2008, с изменениями).

трансформации которых, а также дополнительные потери углерода биомассы и торфа зависят от интенсивности дренажа, цели и характера предполагаемого использования.

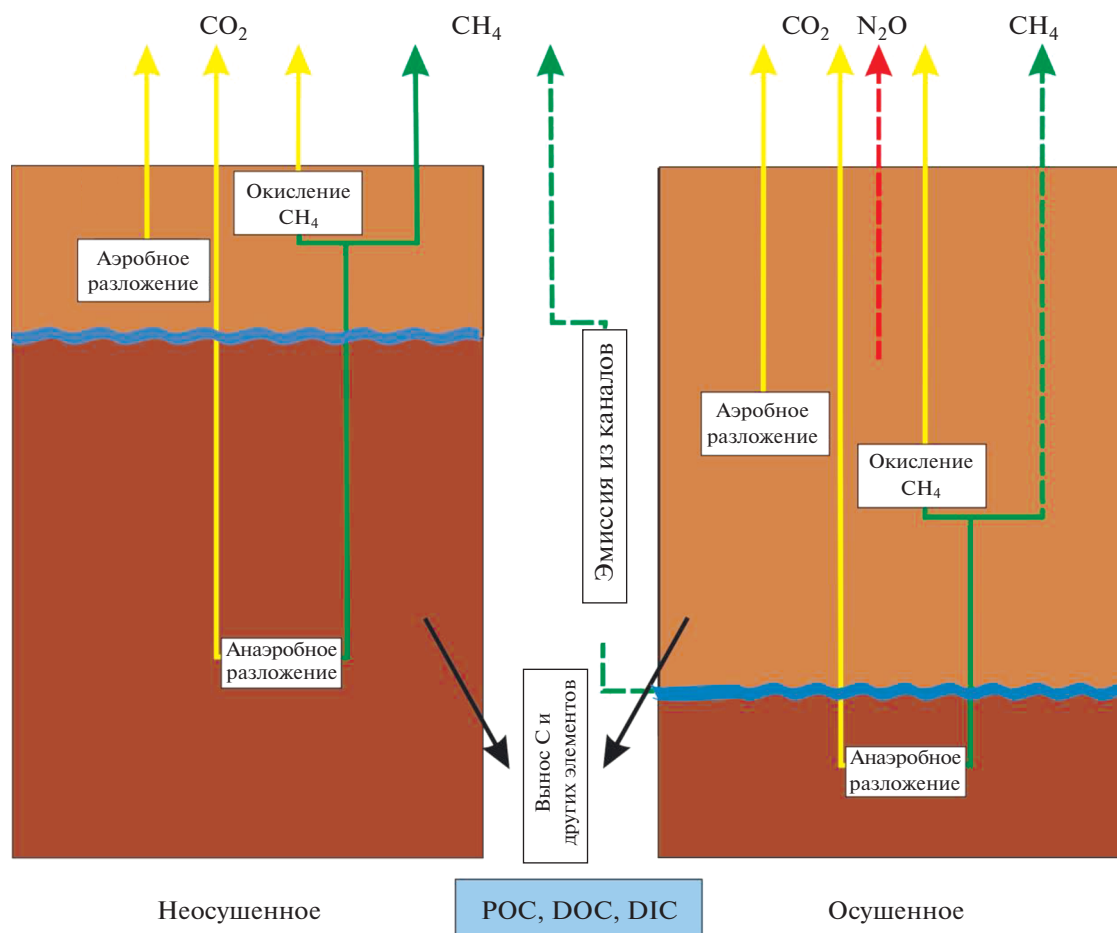
Наиболее сильное воздействие оказывает добыча торфа, особенно фрезерным способом. Он включает в себя предварительное осушение на горно-ловчими каналами по контуру торфяного массива для перехвата внешних поверхностных и грунтовых вод, далее осушение магистральным и валовыми каналами глубиной до 3 м и последующее эксплуатационное – картовыми каналами глубиной до 1.5 м, углубляемыми по мере поверхностно-послойной сработки нафрезерованного и высушенного непосредственно на месте торфа. Ширина карт (межканавных пространств) определяется свойствами залежи и обычно составляет ~40 м, для верховых торфов – меньше (Сирин, Суворов, 2022).

На стадии подготовки площадей к добыче торфа проводится очистка от растительности. В случае верхового облесенного болота потери углерода фитомассы составили ~20 т С га<sup>-1</sup>. При добыче торфа изымалось 25–32 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Эмиссия CO<sub>2</sub> на заброшенном участке торфодобычи и, видимо, близкая ей на разрабатываемых фрезерных

полях в зависимости от условий года составляет 1.6–4.7 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> (Суворов и др., 2015). Таким образом, за счет разложения осушенного торфа потери углерода могут составлять 10% и более от изымаемого при интенсивной добыче торфа. Это без учета потерь при водной и, неизбежной для разрыхленного для уборки торфа, ветровой эрозии. Теряется углерод, накопленный столетиями и тысячелетиями назад, со скоростью, характеризующейся LORCA, в 0.14–0.17 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>, что медленнее потерь с эмиссией CO<sub>2</sub> в 10 раз и с добычей торфа – в 100 раз (Суворов и др., 2015). Происходит эмиссия CH<sub>4</sub> с основных площадей при кратковременном увлажнении (Суворов и др., 2010; Чистотин и др., 2016), а также в значительных количествах из хорошо прогреваемой осушительной сети (Сирин, Суворов, 2022).

Заброшенные без рекультивации поля фрезерной добычи торфа годами не зарастают растительностью, теряют углерод, выделяя CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, а также N<sub>2</sub>O. Из-за потери контроля со стороны пользователя, обеспечивавшего обязательные затраты на противопожарные мероприятия, такие площади становятся объектами торфяных пожаров (Сирин и др., 2011). Их высокая горимость





**Рис. 4.** Изменение основных потоков парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$ ) после осушения торфяного болота (по: Laine et al., 1996, с изменениями). POC (particulate organic carbon) – частицы органического углерода; DOC (dissolved organic carbon) – растворенный углерод; DIC (dissolved inorganic carbon) – растворенный неорганический углерод.

обусловлена не осушением, а отсутствием пользователя, заинтересованного и обеспечивающего защиту от торфяных пожаров. Это касается также площадей, осушенных для сельского и лесного хозяйства.

Эмиссия  $\text{CO}_2$  из осушенных торфяников, используемых для сельского хозяйства, обычно выше, что связано с подготовкой и последующей обработкой почвы, и зависит от характера использования – под пашню, сенокосы или пастбища. Удобрения, а также обогащение почвы при выпасе стимулируют разложение почвы, появление и усиление эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$ . Более интенсивная, по сравнению с сенокосами, эмиссия  $\text{CO}_2$  характерна для пропашных культур, где углерод теряется также из-за ветровой и водной эрозии. Интенсивно выделяется  $\text{CH}_4$  из осушительной сети и в некотором количестве при временном увлажнении почвы. Может происходить эмиссия  $\text{N}_2\text{O}$  (Peatlands and climate..., 2008).

Наименьшие потери углерода происходят при лесоосушении. Сказывается меньшая интенсивность осушения и увеличение продуктивности лесных насаждений. Из-за различий объектов и сложности оценки текущего баланса  $\text{CO}_2$  выводы о влиянии лесоосушения на баланс углерода торфяников разнятся – они могут быть как стоком, так и источником  $\text{CO}_2$  (Peatlands and climate..., 2008; Päivänen, Hännell, 2012; Rydin, Jeglum, 2013; Escobar et al., 2022). Происходит эмиссия  $\text{CH}_4$  из каналов (Сирин и др., 2012), вынос растворенного и взвешенного углерода со стоком, возможное выделение  $\text{N}_2\text{O}$  в случае богатых почв.

Согласно РККК ООН, Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, включает несколько категорий земель, в которые входят осушенные торфяники: лесные земли; пахотные; пастбища и сенокосы; в разделе водно-болотные угодья (wetlands) – торфяники, осушенные для

добычи торфа – подготовленные, разрабатываемые и неиспользуемые (IPCC, 2006). Дополнение по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК (IPCC, 2006) уточнило методики учета осушенных торфяников и добавило рекомендации по учету выбросов из вторично обводненных торфяников (rewetted peatlands). В Уточнение 2019 г. к Руководящим принципам МГЭИК 2006 г. по национальным инвентаризациям парниковых газов (IPCC, 2019a) были внесены дополнения для затопленных земель (flooded lands), которые входят в категорию водно-болотных угодий и могут возникать при обводнении торфяников.

Значительные потери углерода и, соответственно, выбросы  $\text{CO}_2$  происходят при торфяных пожарах. Пожары могут возникать в сухие годы и на естественных болотах (Сирин и др., 2011), однако чаще на осушенных и заброшенных после добычи торфа или сельскохозяйственного использования торфяниках. Человеческий фактор – основная причина пожаров, а для осушенных торфяников, расположенных в населенных районах, эта причина очевидна. При торфяных пожарах происходит наибольшая гибель древостоя из-за повреждения сосущих корней (Вомперский и др., 2007), значительная потеря почвенного углерода, которая растет с интенсивностью осушения (Глухова, Сирин, 2018). Единовременные выбросы  $\text{CO}_2$  при лесоторфяном пожаре составили в результате сгорания торфа  $400 \text{ т } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1}$ , а с учетом потери фитомассы древостоя более  $600 \text{ т } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1}$  (Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2021a). Выделить торфяные среди других природных пожаров сложно (Sirin et al., 2022), как и оценить связанные с ними потери углерода. Поэтому, несмотря на понимание значимости влияния последствий пожаров на выбросы  $\text{CO}_2$  и климат, методики их учета остаются недоработанными (IPCC, 2014).

### СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

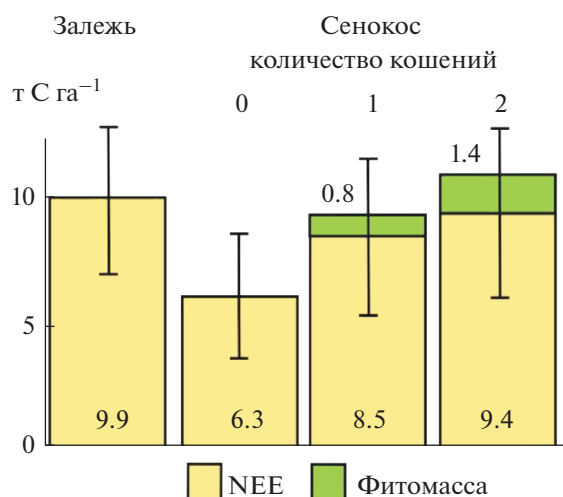
Возможные пути снижения потерь углерода, выбросов ПГ из антропогенно-измененных торфяников – ограничение осушения и освоения (переустройства) болот, улучшение управления используемыми торфяниками и их восстановление (IPCC, 2019b). Осушение и освоение новых площадей для добычи торфа, сельского и лесного хозяйства в нашей стране в последнее время практически не ведутся. Хозяйственное воздействие на болота при строительстве транспортной и иной инфраструктуры затрагивает сравнительно ограниченные площади и носит в большинстве случаев вынужденный характер. При слож-

ности работ на болотах будет выбран, по возможности, альтернативный вариант.

Улучшение управления осушенными лесами, с учетом задачи сокращения потерь углерода и выбросов ПГ, касается проведения рубок и, в первую очередь, снижения пожарной опасности. Проведение рубок в осушенных лесах требует мер по ограничению нарушения почв, их эрозии и выносу растворенной и взвешенной органики по дренажной сети. Несмотря на понижение уровня болотных вод на осушенных лесных площадях, в целом лесосушение повышает их противопожарную защиту. Дренажная сеть ограничивает распространение низового и торфяного (подземного) пожара, а созданные проезды, переходы, противопожарные водоемы повышают возможность осуществления оперативных мер при возникновении очагов огня. Необходимы поддержание, ремонт и, при необходимости, реконструкция этой инфраструктуры.

Первоочередная мера в улучшении управления осушенными сельскохозяйственными землями – отказ от использования их под пашню с заменой на сенокосы. Смена категории земель с *пахотные* (croplands) на *сенокосы* (grasslands) позволяет учесть, в соответствии с методиками МГЭИК (IPCC, 2006, 2014), изменение баланса парниковых газов и потерь углерода. Перевод в сенокосы снизит также потери углерода при ветровой эрозии и других факторах. Значительные площади осушенных земель, ранее использовавшиеся под сенокосы и пастбища, в настоящее время заброшены, зарастают древесно-кустарниковой и рудеральной растительностью. Сухая трава весной и потеря контроля со стороны пользователя – причины частых травяных пожаров, нередко переходящих в торфяные. Эффективный путь повышения пожарной безопасности, снижения потерь углерода и сокращения выбросов ПГ – возвращение использования таких площадей. Одно-двухразовое кошение за сезон без применения удобрений не увеличивает эмиссию  $\text{CO}_2$  (рис. 5) и позволяет получить экологически чистый сенаж (Молчанов и др., 2020; Piyasov et al., 2021). Сенокосение почти двукратно увеличивает подземную фитомассу (Молчанов и др., 2020; Piyasov et al., 2021), а плотность корневой системы улучшает защиту торфяных почв от эрозии и потерь углерода. Снижение количества сухой травы весной и контроль пользователя снижают вероятность возникновения неконтролируемых пожаров.

Наиболее эффективный путь снижения выбросов ПГ из осушенных торфяников – их вторичное обводнение для восстановления водно-болотных угодий (Leifeld, Menichetti, 2018). В первую очередь это касается заброшенных полей фрезерной добычи торфа и сельскохозяйственных земель при отсутствии экономического инте-



**Рис. 5.** Нетто-экосистемный обмен  $\text{CO}_2$  осушенного торфяника с заброшенным сенокосом и с сенокосом, используемым с разной частотой косов за сезон (по: Pyasov et al., 2021, с изменениями). NEE (net ecosystem  $\text{CO}_2$ -exchange) — чистый экосистемный  $\text{CO}_2$ -газообмен, фитомасса, изымаемая при косовании.

реса возвращения последних в хозяйственный оборот. Согласно Водному кодексу РФ (Водный кодекс, 2006), рекультивация торфоразработок должна проводиться преимущественно путем обводнения и искусственного заболачивания. Участки влаголюбивой растительности характеризуются поглощением  $\text{CO}_2$ , которое становится стабильнее при повышении уровня грунтовых вод (рис. 6). После вторичного обводнения (2017 г.) торфяника Берказан-Камыш в Природном парке Аслы-Куль, Республика Башкортостан (Природные условия..., 2017) увеличивается площадь болотной растительности, что сокращает эмиссию  $\text{CO}_2$  с достижением в дальнейшем его поглощения, которое в перспективе перекроет и возросшую эмиссию  $\text{CH}_4$ .

### УЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБВОДНЕНИЯ ТОРФЯНИКОВ

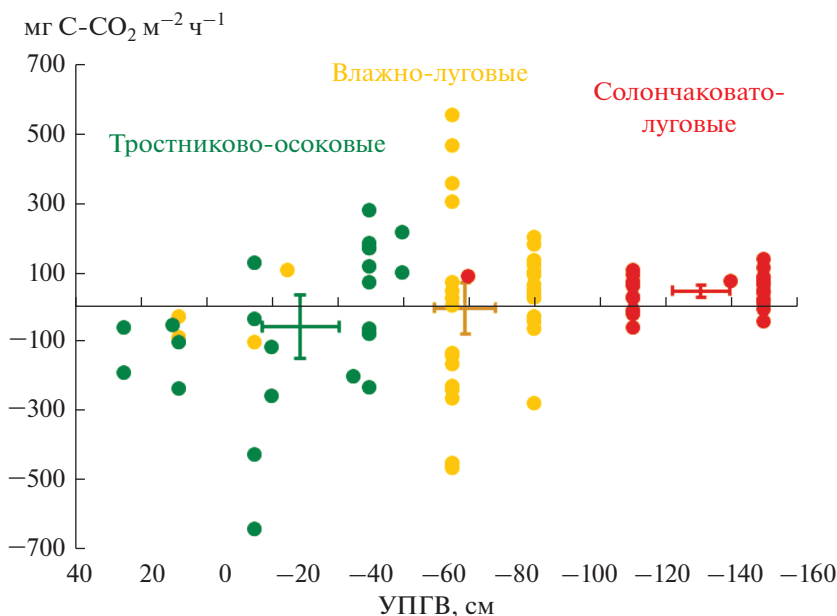
Вторично обводненные торфяники — объект национальной отчетности об антропогенных источниках и поглотителях ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом. Официальной статистики обводненных торфяников в РФ нет. В таких случаях МГЭИК (IPCC, 2006, 2014, 2019a) предусматривает возможность перехода на 2-й и 3-й уровни сложности (Tier 2 и 3). Могут использоваться оригинальные методики определения площадей рассматриваемых категорий земель и специфичные для страны или даже региона коэффициенты эмиссии ПГ (emission factors) — годовые удельные потоки ПГ, для валидации которых тре-

буется их опубликование в рецензируемых научных журналах.

Была разработана, верифицирована по наземным данным и апробирована методика дистанционного мониторинга состояния пожароопасных и обводняемых торфяников (Медведева и др., 2011, 2017; Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2018, 2020). На ее основе была предложена методика учета эффективно обводненных площадей торфяников для Национального кадастра антропогенных источников и поглотителей парниковых газов (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021b). В границах объектов обводнения предложено учитывать площади, занятые гидрофильной растительностью, а также покрытые водой. Такие участки могут быть отнесены к категориям, определяемым Дополнением по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам по национальным инвентаризациям парниковых газов МГЭИК (IPCC, 2006), *увлажненных органических почв* (rewetted organic soils) и *затопленных земель* (flooded lands) соответственно.

Сокращение выбросов в результате обводнения торфяников включено с 2021 г. в Национальный доклад РФ о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, представляемый в Секретариат РКИК ООН (Russian..., 2021). Расчеты проводятся для эффективно обводненных площадей с использованием коэффициентов эмиссии (КЭ), данных МГЭИК (IPCC, 2006, 2014, 2019a) по умолчанию (default factors), то есть уровень 1. Используется допущение о принадлежности обводненных площадей в 1990 базовом году к торфоразработкам, используемым или заброшенным. Значения КЭ, полученные по многолетним измерениям на торфоразработках в центре европейской территории России (Сирин, Суворов, 2022), были выше по ряду показателей КЭ МГЭИК (IPCC, 2014). Переход на специфичные для страны (региона) КЭ скорректирует получаемые оценки сокращения, как предполагаем, в сторону увеличения.

После катастрофических пожаров 2010 г. в Московской обл. было обводнено в 2010–2013 гг. более 73 тыс. га пожароопасных торфяников — наиболее масштабный проект в Северном полушарии (Сирин и др., 2020). Оценка на 2020 г. установила наличие 8.3 тыс. га эффективно обводненных площадей — 5.7 тыс. га, занятых гидрофильной растительностью, и 2.6 тыс. га — водными объектами. Сокращение выбросов ПГ составило 32 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв год<sup>-1</sup>, а без учета увеличения эмиссии  $\text{CH}_4$  — почти 72 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв год<sup>-1</sup> (Russian..., 2021). Это соответствует сокращению выбросов  $\sim 0.44$  т  $\text{CO}_2$ -экв га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> из расчета на всю площадь обводнения (73 тыс. га) и 3.9 т  $\text{CO}_2$ -экв га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> на образовавшиеся вод-



**Рис. 6.** Нетто-экосистемный обмен в растительных сообществах осушенного торфяника в лесостепной зоне. Показано среднее  $\pm$  стандартное отклонение для УПГВ и потоков диоксида углерода (по: Ильясов, 2019, с изменениями). УПГВ – уровень почвенно-грунтовых вод.

но-болотные угодья – гидрофильная растительность и водные объекты (8.3 тыс. га).

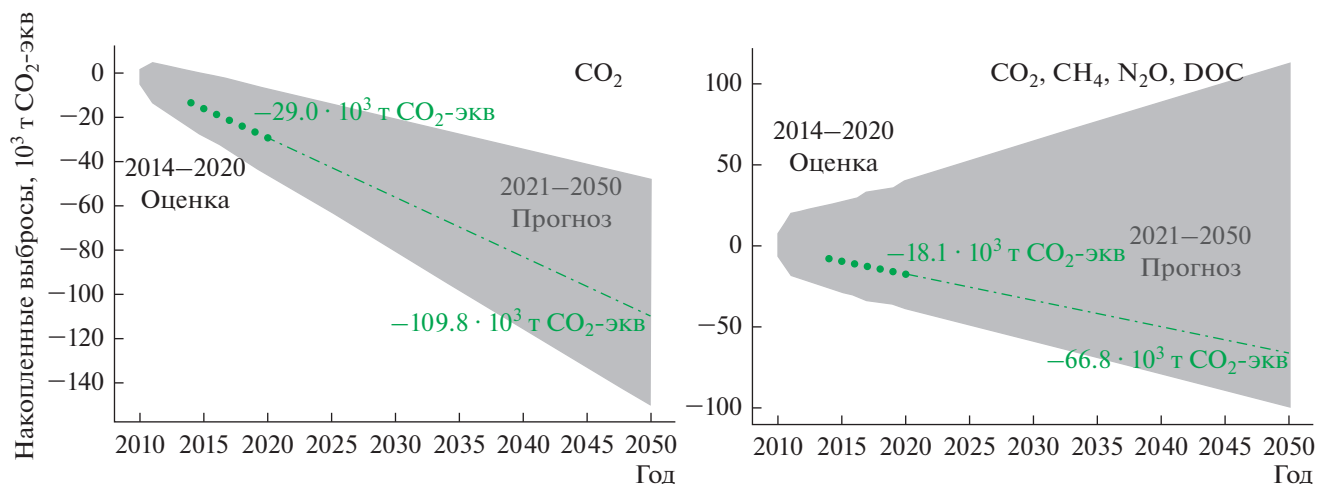
Данный подход может быть использован и для оценки снижения выбросов ПГ в результате вторичного обводнения конкретных объектов (рис. 7). Например, для участка торфяника Радовицкий Мох площадью 1.5 тыс. га в Шатурском р-не Московской обл. сокращение выбросов  $\text{CO}_2$  составило на 2020 г. 29 тыс. т (или 1.9 тыс. т га<sup>-1</sup>), а с учетом всех ПГ и выноса растворенного углерода – DOC (dissolved organic carbon) – 18 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв (или 1.2 тыс. т га<sup>-1</sup>). К 2050 г. сокращение выбросов накопительным итогом может составить по прогнозу ~110 и ~67 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв соответственно (Sirin et al., 2021b). Оценки консервативны (то есть минимальны), не учитывают эффекта обводнения для всей площади объектов обводнения и для снижения выбросов ПГ от торфяных пожаров. Их учет, а также переход, по данным натурных измерений, на КЭ регионального уровня могут в перспективе уточнить и, скорее всего, повысить оценку сокращения выбросов ПГ.

Особенно важен учет снижения числа и площади возможных торфяных пожаров и связанных с ними потерь углерода и выброса  $\text{CO}_2$ . Площадь, пройденную пожарами на торфяниках, можно определить путем наложения границ гарей на контуры торфяников, однако не все лесные и травяные пожары, особенно весной, когда торф влажный, заглубляются и переходят в разряд торфяных. Их можно идентифицировать по длительности пожара и пожарной радиационной мощности (Sirin et al.,

2022). Сложность представляет также оценка потерь углерода биомассы и особенно торфа (Глухова, Сирин, 2018; Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2021). Решение этих задач может помочь более обоснованной оценке эффективности обводнения с точки зрения сокращения потерь углерода и выброса ПГ. Данные по Национальному парку “Мещера” во Владимирской обл. (Сирин и др., 2011) или по Московской обл. свидетельствуют (рис. 8) о сокращении числа и площади пожаров после проведения обводнения пожароопасных торфяников (Sirin et al., 2020).

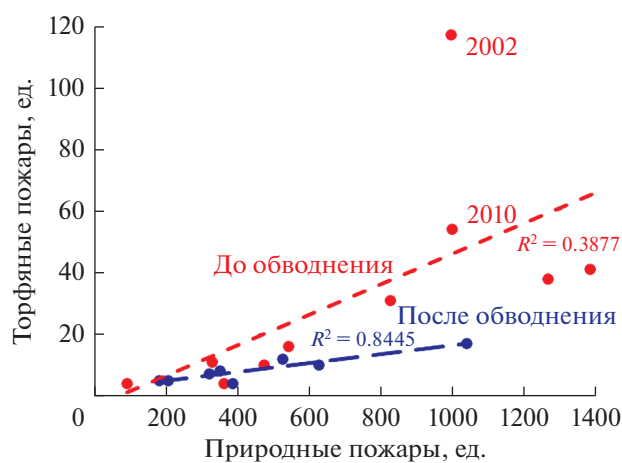
### СМЯГЧЕНИЕ, АДАПТАЦИЯ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Анализ имеющихся данных показывает, что восстановление болот путем вторичного обводнения торфяников значительно сокращает выбросы ПГ в атмосферу (Wilson et al., 2016), даже несмотря на возможное увеличение эмиссии  $\text{CH}_4$  (Günther et al., 2020), что обычно отмечается оппонентами этих мероприятий. Помимо учета в национальных кадастрах антропогенных источников и поглотителей парниковых газов в рамках РКИК ООН, эти мероприятия активно включаются в схемы добровольного сокращения выбросов ПГ (Углеродные кредиты..., 2011; Carbon credits..., 2011). Предлагаются стандарты – GEST (Greenhouse gas emission site type) – для оценки эффективности проектов обводнения для добровольного рынка, например VCS (verified carbon standard,



**Рис. 7.** Изменение после обводнения выбросов  $\text{CO}_2$  (слева) и всех агентов (справа) с учетом их ППП нарастающим итогом для тестового участка торфяника Радовицкий Мох (1535 га) в Московской обл. Оценка на 2020 г. и прогноз до 2050 г. Серым цветом показан 95%-ный доверительный интервал (по: Sirin et al., 2021b, с изменениями). DOC (dissolved organic carbon) – вынос растворенного углерода.

www.v-c-s.org) на основе типизации участков растительного покрова для привязки значений потоков ПГ (Couwenberg et al., 2011). Это привлекает финансирование к обводнению торфяников и способствует получению и уточнению региональных оценок потоков ПГ с осушенных и обводняемых торфяников (Jarašius et al., 2022). В этом аспекте есть отставание даже от стран Восточной Европы и Балтии, в том числе по причине несоответствия проводимых научных исследований практическим задачам по обеспечению сокращения выбросов ПГ в сфере землепользования, включая торфяники.



**Рис. 8.** Количество торфяных пожаров в границах объектов обводнения относительно количества всех природных пожаров в Московской обл. до и после обводнения 2010–2013 гг. (по: Sirin et al., 2020, с изменениями).

Сокращение выбросов ПГ и смягчение изменения климата часто рассматриваются узконаправлено без учета возможности решения задач адаптации к происходящим изменениям климата и обеспечения устойчивости (sustainable management), которое должно включать в себя выбор наилучших практик рационального природопользования. Комплексный подход позволяет минимизировать ошибки, которые могут возникать при решении задач по сокращению выбросов ПГ и переходу к низкоуглеродной экономике, особенно в многофакторной сфере ЗИЗЛХ, а также более объективно оценить эффективность проводимых мероприятий.

Изменение управления сельскохозяйственными землями (замена пахотных земель сенокосами, возвращение использования заброшенных сенокосных угодий) может дать сокращение выбросов ПГ и потерь углерода. Это сокращение вряд ли будет значительным для стимулирования таких мероприятий за счет углеродного рынка. Получение экологически чистой продукции, снижение воздействия на окружающую среду за счет сокращения водной и ветровой эрозии, снижение вероятности пожаров, а также повышение привлекательности территории может увеличить общие выгоды от проведенных мероприятий.

В Специальном докладе МГЭИК “Изменение климата и земля” (Изменение..., 2020; IPCC, 2019b) было отмечено, что восстановление болот направлено на наиболее богатые углеродом земли, поэтому такие мероприятия требуют меньших площадей и, соответственно, оказывают меньшее воздействие на структуру землепользования, по сравнению с другими мерами в секторе ЗИЗЛХ. Восстановление болот требует в 3 раза меньше

азота, по сравнению с аналогичными по эффективности мерами по накоплению углерода в минеральных почвах (Leifeld, Menichetti, 2018), способствует восстановлению биоразнообразия (Minaeva et al., 2017), гидрологических (Ahmad et al., 2020) и других экосистемных функций болот (Bonn et al., 2014).

Восстановление болот снижает вероятность торфяных пожаров (Granath et al., 2016; Sirin et al., 2020), предотвращение которых – основной аргумент и движущий фактор обводнения торфяников в нашей стране. Обводнение не только сокращает значительные потери углерода и выброс  $\text{CO}_2$  в атмосферу, связанные с пожарами. Предотвращается выброс черного углерода (сажи), который из-за атмосферного переноса имеет значительные отрицательные последствия для окружающей среды, включая климат. Из-за низкой температуры горения торфяные пожары – источник поступления в атмосферу крайне опасных для здоровья человека мелкодисперсных частиц. Смог во время пожаров 2010 г. в Московском регионе (Kovalov et al., 2011) на фоне аномально высокой температуры воздуха (Baggiopetro et al., 2011) стал причиной увеличения показателя избыточной смертности более чем на 10 тыс. человек (Ревич и др., 2015); экономический ущерб мог превысить 100 млрд руб. (Порфирьев, 2013). Необходимость предотвращения таких последствий очевидна и является эффективной мерой адаптации к изменениям климата, которые усиливают вероятность такого рода катастрофических явлений. Комплексный подход позволяет объективно оценить эффективность мероприятий по смягчению изменений климата, а также согласовать их с задачами адаптации к этим изменениям и обеспечения устойчивости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Торфяные болота – важнейший компонент глобального цикла углерода, лидер на суше и второй на планете накопитель углерода в геологическом масштабе времени. Занимая 3% суши, они в несколько раз опережают другие экосистемы по запасу углерода на единицу площади. Болота – ключевой природный источник эмиссии в атмосферу метана, они также могут выделять закись азота, с ними связано поступление органики в водные объекты.

Болота отличает от других экосистем превышение продукции растений над разложением их остатков, накапливаемых в виде торфа в условиях избыточного увлажнения. Скорость накопления углерода варьирует для разных болот, природных и погодно-климатических условий. Болота отличается пространственная неоднородность, с которой связаны значительные различия в потоках ПГ.

Торфяные болота – одни из наиболее представленных экосистем, и вместе с заболоченными мелкоотторфованными местообитаниями занимают более 1/5 территории страны. Они расположены в различных природных зонах и крайне разнообразны. 10% мировых болот было осушено для сельского и лесного хозяйства, добычи торфа. В России эта цифра примерно в 2 раза ниже, однако в ряде регионов европейской территории России было осушено 50% и более. Много болот было изменено в результате строительства дорог, других линейных объектов и иных воздействий. Неиспользуемые осушенные торфяники – наиболее частые объекты торфяных пожаров.

Осушенные торфяники планеты могут выделять при окислении торфа и пожарах ~5% всех антропогенных эмиссий ПГ, или более 25%, связанных с землепользованием, сельским и лесным хозяйством (ЗИЗЛХ). После осушения продолжается эмиссия метана, нередко происходит эмиссия закиси азота, теряется углерод с водной и ветровой эрозией. Значительные потери углерода и, соответственно, выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу происходят при торфяных пожарах. Эмиссия ПГ осушенными торфяниками составляет значительную часть объема выбросов, которые необходимо сократить для удержания глобального потепления и для выполнения задач Парижского соглашения по климату.

Основные пути снижения выбросов ПГ антропогенно-измененными торфяниками для смягчения изменений климата: ограничение осушения и освоения (переустройства) болот, улучшение управления используемыми торфяниками (перевод пашни в сенокосы, возвращение последних в оборот), восстановление болот. Наиболее эффективный путь снижения выбросов ПГ из осушенных торфяников – их вторичное обводнение для восстановления водно-болотных угодий. Обводненные торфяники были включены в национальную отчетность РФ об антропогенных источниках и поглотителях парниковых газов, результаты научных исследований и разработок используются для научного сопровождения мероприятий по восстановлению водно-болотных угодий в разных регионах страны, разработки предложений для ОНУВ и Стратегий по адаптации к изменению климата.

Восстановление болот снижает вероятность торфяных пожаров, предотвращение которых – основной аргумент и движущий фактор обводнения торфяников в нашей стране, способствует восстановлению биоразнообразия, других экосистемных услуг, связанных с болотами, повышает экологическую безопасность. Эти и другие мероприятия по сокращению выбросов парниковых газов для смягчения изменений климата вносят дополнительный вклад в адаптацию к ним и обеспечение устойчивости.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен сотрудникам Лаборатории лесного болотоведения и Центра сохранения и восстановления болотных экосистем Института лесоведения РАН за помощь в работе.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-74-20185), а на стадии доработки в рамках государственного задания ИЛАН РАН в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 сентября 2022 г. № 2515-р в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов изучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болота // Экологический атлас России / Ред. Н.С. Касимов, В.С. Тикунов. М.: Феория, 2017. С. 118–121.
- Болота // Российская Арктика: пространство, время, ресурсы. Атлас / Агафонова С.А., Айбулатов Д.Н., Бабурин В.Л. и др. М.: Феория, 2019. С. 344–345.
- Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ.
- Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П. и др. Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.
- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П. и др. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 39–50.
- Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.
- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А. и др. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Ред. В.В. Ясюкевич, В.А. Говоркова, И.А. Корнева и др. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Гидрология суши. Термины и определения. ГОСТ 19179-73. М.: Государственный Комитет СССР по стандартам, 1973. 34 с.
- Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>
- Иванов К.Е. Гидрология болот. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 299 с.
- Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
- Изменение климата и земля. Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении земельными ресурсами, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах. Резюме для политиков / Ред. V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, J. Skea et al. М.: МГЭИК, 2020. 39 с.
- Ильясов Д.В. Современное состояние осушенного болотного массива в условиях лесостепи (на примере урочища Берказан-Камыш, Республика Башкортостан): Автореф. дис... канд. биол. наук. М.: ИЛАН РАН, 2019. 24 с.
- Ильясов Д.В., Сирин А.А., Суворов Г.Г. и др. Почвы и растительность антропогенно-измененного торфяника в степной зоне (на примере массива Берказан-Камыш, Башкирия) // Агрохимия. 2018. № 12. С. 46–59.
- Климанов В.А., Сирин А.А. Динамика торфонакопления болотами Северной Евразии за последние 3000 лет // Докл. АН. 1997. Т. 354. № 5. С. 683–686.
- Клименко В.В., Климанов В.А., Сирин А.А., Слепцов А.М. Изменения климата на западе европейской части России в позднем голоцене // ДАН. 2001. Т. 376. № 5. С. 679–683.
- Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Сможет ли энергопереход остановить глобальное потепление и почему так сильно ошибаются климатические прогнозы? // Теплоэнергетика. 2022. № 3. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0040363622030067>
- Кравченко И.К., Сирин А.А. Активность и метаболический контроль образования метана в глубоких слоях торфа бореальных болот // Микробиология. 2007. Т. 76. № 6. С. 888–895.
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сирин А.А. Оценка состояния заброшенных торфоразработок по многоспектральным спутниковым изображениям // Иссл. Земли Косм. 2011. № 5. С. 80–88.
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сирин А.А., Маслов А.А. Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфоразработок // Иссл. Земли Косм. 2017. № 3. С. 76–84. <https://doi.org/10.7868/S0205961417020051>
- Минаева Т.Ю., Сирин А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи соврем. биол. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
- Минаева Т.Ю., Трофимов С.Я., Чичагова О.А. и др. Накопление углерода в почвах лесных и болотных экосистем Южного Валдая в голоцене // Изв. РАН. Сер. биол. 2008. № 5. С. 607–616.
- Молчанов А.Г., Суворов Г.Г., Ильясов Д.В., Сирин А.А. Потоки диоксида углерода при разном режиме использования сенокоса на осушенной торфяной почве // Агрохимия. 2020. № 9. С. 48–64. <https://doi.org/10.31857/S00021881200900>
- Ниценко А.А. О терминологии основных понятий болотоведения // Бот. журн. 1967. Т. 52. № 11. С. 1692–1696.

- Порфирьев Б.Н. Экономическая оценка людских потерь в результате чрезвычайных ситуаций // *Вопр. эконом.* 2013. № 1. С. 46–68.
- Природные условия и биота Природного парка “Аслы-Куль” / Ред. Б.М. Миркин, В.Б. Мартыненко. Уфа: Башк. энцикл., 2018. 456 с.
- Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Периаген Г. Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // *Профилактикт. мед.* 2015. Т. 18. № 5. С. 29–33.  
<https://doi.org/10.17116/profmed201518529-33>
- Романовская А.А., Коротков В.Н., Смирнов Н.С. и др. Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России в течение 2000–2011 гг. // *Метеорол. гидрол.* 2014. № 3. С. 5–18.
- Семенов С.М., Гладыльщикова А.А., Дмитриева Т.М. Антропогенные нарушения взаимодействия суши и атмосферы: оценки МГЭИК // *Фунд. прикл. климатол.* 2019. Т. 3. С. 5–31.  
<https://doi.org/1021513/2410-8758-2019-3-05-31>
- Сирин А.А. Водообмен и структурно-функциональные особенности лесных болот: на примере европейской тайги: Автореф. дис... докт. биол. наук. М.: ИЛАН, 1999. 44 с.
- Сирин А.А., Суворов Г.Г. Эмиссия парниковых газов на торфоразработках в центре Европейской России // *Метеорол. гидрол.* 2022. № 3. С. 68–80.  
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-68-80>
- Сирин А.А., Шумов Д.Б., Власова Л.С. Изучение водообмена в болотных водах с помощью результатов анализа  $^3\text{H}$  // *Вод. рес.* 1997. № 6. С. 679–687.
- Сирин А.А., Нильсон М., Шумов Д.Б. и др. Сезонные изменения растворенного метана в вертикальном профиле болот Западнорусской низины // *ДАН* 1998. Т. 361. № 2. С. 280–283.
- Сирин А.А., Минаева Т.Ю., Возбранная А.Е., Бартаев С.А. Как избежать торфяных пожаров? // *Наука в России.* 2011. № 2. С. 13–21.
- Сирин А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // *Динам. окр. среды глоб. измен. клим.* 2012. Т. 3. № 2. С. 1–10.
- Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А. и др. Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // *Лесоведение.* 2014. № 5. С. 65–71.
- Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И. и др. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // *Лесоведение.* 2019. № 5. С. 410–422.  
<https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>
- Сирин А.А., Медведева М.А., Макаров Д.А. и др. Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области // *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле.* 2020. Т. 65. № 2. С. 314–336.  
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>
- Сирин А.А., Медведева М.А., Ильясов Д.В. и др. Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации // *Фунд. прикл. климатол.* 2021. Т. 7. № 3. С. 84–112.  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-84-112>
- Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // *Агрохимия.* 2010. № 12. С. 37–45.
- Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // *Агрохимия.* 2015. № 11. С. 51–62.
- Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Ред. А.А. Сирин, Т.Ю. Минаева. М.: ГЕОС, 2001. 190 с.
- Углеродные кредиты и заболачивание деградированных торфяников. Климат – Биоразнообразие – Землепользование / Ред. Ф. Таннебергер, В. Вихтманн. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2011. 221 с.
- Чистотин М.В., Суворов Г.Г., Сирин А.А. Динамика эмиссии метана из осушенной торфяной почвы в зависимости от растительности и режима увлажнения (результаты вегетационного опыта) // *Агрохимия.* 2016. № 12. С. 20–33.
- Экологическая реставрация в Арктике: обзор международного и российского опыта / Ред. Т.Ю. Минаева. Сыктывкар–Нарьян-Мар: Триада, 2016. 288 с.
- A quick scan of peatlands in Central and Eastern Europe / Eds T. Minayeva, A. Sirin, O. Bragg. Wageningen: Wetlands Int., 2009. 132 p.
- Ahmad S., Liu H., Günther A. et al. Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function // *Sci. Tot. Environ.* 2020. V. 749. P. 141571.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>
- Alekseychik P., Launiainen S., Mammarella I. et al. Carbon balance of a Finnish bog: temporal variability and limiting factors based on 6 years of eddy-covariance data // *Biogeosciences.* 2021. V. 18. P. 4681–4704.  
<https://doi.org/10.5194/bg-18-4681-2021>
- Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / Eds F. Parish, A. Sirin, D. Charman et al. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 2008. 179 p.
- Barber K.E. Peat stratigraphy and climatic change. A paleoecological test of the theory of cyclic peat bog regeneration. Rotterdam: A.A. Balkema, 1981. 219 p.
- Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J. et al. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // *Science.* 2011. V. 332. P. 220–224.  
<https://doi.org/10.1126/science.1201224>
- Bonn A., Reed M., Evans C.D. et al. Investing in nature: developing ecosystem service markets for peatland restoration // *Ecosyst. Serv.* 2014. V. 9. P. 54–65.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // *Glob. Biogeochem. Cycles.* 1995. V. 1 (9). P. 37–46.
- C.A. Weber and the raised bog of Augstuma / Eds J. Couwenberg, H. Joosten. Tula: Grif & K, 2002. 278 p.
- Carbon credits from peatland rewetting. Climate – biodiversity – land use / Eds F. Tanneberger, W. Wichtmann. Stuttgart: E. Schweizerbart Science Publishers, 2011. 223 p. [www.schweizerbart.com/9783510652716](http://www.schweizerbart.com/9783510652716)
- Charman D. Peatlands and environmental change. Chichester: Wiley, 2002. 320 p.
- Charman D.J., Aravena R., Warner B.G. Carbon dynamics in a forested peatland in north-eastern Ontario, Canada // *J. Ecol.* 1994. V. 82. P. 55–62.
- Clymo R.S. The limits to peat bog growth // *Philos. Trans. R. Soc. B.* 1984. V. 303. P. 605–654.



- Couwenberg J., Michaelis D., Joosten H. et al.* Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy // *Hydrobiologia*. 2011. V. 674. P. 67–89.
- Escobar D., Belyazid S., Manzoni S.* Back to the future: restoring northern drained forested peatlands for climate change mitigation // *Front. Environ. Sci.* 2022. V. 10. P. 834371.  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.834371>
- Fagan B.* The little ice age: how climate made history, 1300–1850. N.Y.: Basic Books, 2000. 246 p.
- Frolking S., Roulet N.T.* Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions // *Glob. Change Biol.* 2007. V. 13 (5). P. 1079–1088.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Global Peatland Database. Greifswald Mire Centre, 2022.  
<https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html>
- Granath G., Moore P., Lukenbach M., Waddington J.M.* Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 28498.  
<https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Günther A., Barthelmes A., Huth V. et al.* Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 1644.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Heffernan L., Estop-Aragonés C., Knorr K.-H. et al.* Long-term impacts of permafrost thaw on carbon storage in peatlands: deep losses offset by surficial accumulation // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2020. V. 125. P. e2019.  
<https://doi.org/10.1029/2019JG005501>
- Ilyasov D.V., Molchanov A.G., Suvorov G.G. et al.* Net ecosystem exchange of carbon dioxide on hayland with drained peat soil in central European Russia: mowing scenario analysis // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2021. P. 1–16.  
<https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1982135>
- Ingram H.A.P.* Soil layers in mires: function and terminology // *J. Soil Sci.* 1979. V. 29. P. 224–227.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. V. 4. Agriculture, forestry and other land use / Eds H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa et al. Hayama: IPCC, 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- IPCC, 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe et al. Switzerland: IPCC, 2014.
- IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Eds E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc et al. Switzerland: IPCC, 2019a.
- IPCC, 2019. Climate Change and Land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / Eds P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia et al. Switzerland: 2019b. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021.
- Jarašius L., Etzold J., Truus L. et al.* Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore. Vilnius: Lithuanian Fund for Nature, 2022. 201 p.
- Joosten H., Clarke D.* Wise use of mires and peatlands – background and principles including a framework for decision-making. Saarijarvi: Saarijarven Offset Oy, 2002. 303 p.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al.* The role of peatlands in climate regulation // *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice* / Eds A. Bonn, T. Allott, M. Evans et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2016. P. 63–76.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Klimanov V.A., Sirin A.A.* The dynamics of peat accumulation by mires of Northern Eurasia during the last three thousand years // *Northern forested wetlands: ecology and management*. Ch. 22 / Eds C.C. Trettin, M.F. Jurgensen, D.F. Grigal et al. Boca Raton, N.Y., L., Tokyo: Lewis Publ., 1997. P. 313–324.
- Konovalov I.B., Beekmann M., Kuznetsova I.N. et al.* Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region // *Atmosph. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 10031–10056.  
<https://doi.org/10.5194/ACP-11-10031-2011>
- Lachance D., Lavoie C., Desrochers A.* The impact of peatland afforestation on plant and bird diversity in south-eastern Québec // *Écoscience*. 2005. V. 12. P. 161–171.
- Laine J., Silvola J., Tolonen K. et al.* Effect of water-level drawdown on global climatic warming: northern peatlands // *Ambio*. 1996. V. 25 (3). P. 179–184.
- Leifeld J., Menichetti L.* The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. P. 1071.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
- Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S.* Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100 // *Nat. Clim. Change*. 2019. V. 9. P. 945–947.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- Loisel J., Gallego-Sala A.V., Amesbury M.J. et al.* Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink // *Nat. Clim. Change*. 2021. V. 11. P. 70–77.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
- Lu Y., Zhuang Q., Zhou G. et al.* Possible decline of the carbon sink in the Mongolian Plateau during the 21st century // *Environ. Res. Lett.* 2009. V. 4. P. 045023.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045023>
- Lugo A.E., Brinson M.M., Brown S.* Synthesis and search for paradigms in wetland ecology // *Ecosystems of the World. Forested Wetlands* / Eds A.E. Lugo, M. Brinson, S. Brown. Amsterdam: Elsevier, 1990. P. 447–460.
- Minayeva T., Sirin A., Dorofeyuk N. et al.* Mongolian mires: from taiga to desert // *Stapfia*. 2005. V. 85. P. 335–352.
- Minayeva T., Sirin A.A., Stracher G.B.* The peat fires of Russia // *Coal and peat fires: a global perspective* / Eds G.B. Stracher, A. Prakash, E.V. Sokol. Amsterdam, Waltham: Elsevier, 2012. P. 375–394.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59412-9.00019-3>
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A.* Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity // *Mires Peat*. 2017. V. 19. P. 1–7.  
<https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Minayeva T., Sirin A., Kershaw P., Bragg O.* Arctic peatlands // *The wetland book* / Eds C. Finlayson, G. Milton, R. Prentice, N. Davidson. Dordrecht: Springer, 2019. P. 275–288.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5\\_109-2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5_109-2)

- Müller J., Joos F. Global peatlands under future climate – seamless model projections from the last glacial maximum // *Biogeosciences*. 2021. V. 18. P. 3657–3687. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3657-2021>
- Neukom R., Steiger N., Gómez-Navarro J.J. et al. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era // *Nature*. 2019. V. 571. P. 550–554. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1401-2>
- PAGES 2k Consortium. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era // *Nat. Geosci.* 2019. V. 12. P. 643–649. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0400-0>
- Päivänen J., Hännell B. Peatland ecology and forestry – a sound approach. Helsinki: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos, 2012. 267 p.
- Peatlands and climate change / Ed. M. Strack. Saarijaarvi: Saarijarven Offset Oy, 2008. 223 p.
- Peltola O., Vesala T., Gao Y. et al. Monthly gridded data product of northern wetland methane emissions based on upscaling eddy covariance observations // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. V. 11. P. 1263–1289. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1263-2019>
- Qiu C., Ciais P., Zhu D. et al. A strong mitigation scenario maintains climate neutrality of northern peatlands // *One Earth*. 2021. V. 5. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.008>
- Rauber C. Stability of raised bogs to climate change – a case study. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2002. 168 p.
- Russian Federation. 2021 National Inventory Report (NIR) // The United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/documents/273477>
- Rydin H., Jeglum J. The biology of peatlands. 2nd edition. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013. 382 p.
- Sirin A., Köhler S., Bishop K. Resolving flow pathways in a headwater forested wetland with multiple tracers // *IASH Publ.* 1998. V. 248. P. 337–342.
- Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al. Russian Federation (European Part) // *Mires and peatlands of Europe: status, distribution and conservation* / Eds H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen. Stuttgart: Schweizerbart Sci. Publ., 2017. P. 589–616. <https://doi.org/10.1127/mireseurope/2017/0001-0049>
- Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A. Assessing the land and vegetation cover of abandoned fire hazardous and rewetted peatlands: comparing different multispectral satellite data // *Land*. 2018. V. 7 (2). P. 71. <https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A. et al. Multispectral satellite-based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow region (Russia) // *Ecol. Engin.* 2020. V. 158. P. 106044. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>
- Sirin A., Maslov A., Makarov D. et al. Assessing wood and soil carbon losses from a forest-peat fire in the boreonemoral zone // *Forests*. 2021a. V. 12 (7). P. 880. <https://doi.org/10.3390/f12070880>
- Sirin A., Medvedeva M., Minayeva T. et al. Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting // *Land*. 2021b. V. 10. P. 1200. <https://doi.org/10.3390/land10111200>
- Sirin A., Medvedeva M. Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: identification among other wildfires // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 194. <https://doi.org/10.3390/rs14010194>
- Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al. The peatland map of Europe // *Mires and Peat*. 2017. V. 19. Art. 22. P. 1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>
- Tanneberger F., Joosten H., Moen A. et al. Mires in Europe – regional diversity, condition and protection // *Diversity*. 2021. V. 13 (8). P. 381. <https://doi.org/10.3390/d13080381>
- Tubiello F.N., Biancalani R., Salvatore M. et al. A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils // *Sustainability*. 2016. № 8. Art. 371. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8040371>
- Turetsky M.R., Benscoter B., Page S. et al. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // *Nat. Geosci.* 2015. V. 8. P. 11–14.
- Wilson D., Blain D., Couwenberg J. et al. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // *Mires Peat*. 2016. V. 17. P. 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- Yu Z.C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. P. 4071–4085. <https://doi.org/10.5194/bg-9-4071-2012>

## Peatbogs and Anthropogenically Modified Peatlands: Carbon, Greenhouse Gases and Climate Change

A. A. Sirin\*

*Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoye, Moscow Region, Russia*

\*e-mail: [sirin@ilan.ras.ru](mailto:sirin@ilan.ras.ru)

Peatlands play a special role in carbon sequestration, the formation of the gas composition of the atmosphere and related impacts on the climate. The features of peatland ecosystems, their distribution, diversity and current state, responses to climate change, their role as carbon reservoirs, as sources and sinks of greenhouse gases, and their changes in response to human impacts are considered. Opportunities for reducing greenhouse gas emissions from anthropogenically modified peatlands, the effectiveness of peatland rewetting and peatland restoration for climate change mitigation, and adaptation and sustainable management are shown.

*Keywords:* mires, peatlands, climate change, carbon, mitigation, adaptation, greenhouse gases