

УДК 551.558.3

ВТОРИЧНОЕ ОБВОДНЕНИЕ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОСУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ И СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

© 2023 г. [А. А. Сирин]^а, М. А. Медведева^{а, *}, В. Ю. Иткин^{а, б}

^аЦентр сохранения и восстановления болотных экосистем, Институт лесоведения Российской академии наук, Успенское, Московская область, Россия

^бРоссийский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

*e-mail: eveeza@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Осушенные торфяники являются значительным источником поступления парниковых газов (ПГ) в атмосферу. В случае оставления пользователем, они становятся наиболее вероятными объектами торфяных пожаров. Эффективный путь сокращения эмиссии ПГ и предотвращения торфяных пожаров на неиспользуемых осушенных торфяниках — вторичное обводнение и заболачивание. Это может внести весомый вклад в реализацию Парижского соглашения по климату в рамках сектора “землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство” и, в конечном счете, в смягчение изменений климата. Представлен подход к оценке сокращения выбросов ПГ после вторичного обводнения, применимый для учета на национальном и региональном уровнях, а также для конкретных проектов обводнения. Он включает методику определения эффективно обводненных площадей, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья, приложения к ним коэффициентов эмиссии ПГ, предлагаемых Межправительственной группой экспертов по изменению климата, а также оценку неопределенности. Подход был использован при включении с 2020 г. вторично обводненных торфяников в Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. Представлена оценка сокращения выбросов ПГ на примере участка торфяника площадью 1.5 тыс. га программы обводнения пожароопасных торфяников в Московской области (2010–2013 гг.). Сокращение выбросов CO₂ составило накопительным итогом к 2022 г. 33.4 тыс. т (с учетом потоков закиси азота, выноса растворенного углерода и увеличения эмиссии CH₄ — 20 тыс. т CO₂-экв.) и по прогнозу достигнет почти 113 (68) тыс. т к 2050 г. Отмечены показатели сокращения выбросов ПГ, пока не включенные в рассмотрение, и возможные пути их учета в дальнейшем.

Ключевые слова: изменение климата, смягчение, торфяные болота, мультиспектральные спутниковые снимки, добыча торфа, Парижское соглашение по климату, Национальный кадастр

DOI: 10.31857/S258755662304012X, EDN: BFZXYJ

ВВЕДЕНИЕ

Болота играют особую роль в формировании газового состава атмосферы. Их запас углерода (С) больше углерода биомассы лесов, и во всех природных зонах болота многократно опережают зональные экосистемы по запасу углерода на единицу площади (Joosten et al., 2016). Они лидируют на суше как долговременные накопители углерода, уступая первенство на планете только океаническим осадкам (Assessment ..., 2008). В то же время болота — основной природный источник метана (CH₄) на суше, а некоторые выделяют и закись азота (N₂O) — парниковые газы (ПГ) с более высоким, чем у диоксида углерода (CO₂), потенциалом глобального потепления (ПГП)¹. Время пре-

бывания CH₄ в атмосфере существенно короче, чем CO₂, и в сто- и тысячелетнем масштабе торфяные болота оказывают охлаждающее влияние на глобальный климат (Frolking and Roulet, 2007). В периоды межледниковий они, возможно, способствуют наступлению оледенений (Joosten et al., 2016). Если рассматривать короткие временные интервалы (десятки лет), в том числе влияние хозяйственной деятельности на климат и меры по смягчению его изменений (mitigation), необходим учет метана, как и других ПГ, связанных с ан-

¹ Составляет за 100-летний период для CH₄ и N₂O 25 и 298 соответственно (<https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf>), периодически корректируется в сторону увеличения.

тропогенно-измененными болотами [торфяниками — (Минаева, Сирин, 2011; Сирин, 2022)]. В зависимости от категории осушенных торфяников Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) предполагают учет CO_2 , CH_4 , N_2O и растворенного углерода (dissolved organic carbon — DOC) как климатических агентов, не регулируемых Монреальским протоколом (IPCC, 2014).

Осушение болот для любых целей изменяет водный режим болот и соотношение периодически аэробного (так называемого активного) и постоянно анаэробного (инертного) горизонтов торфа. Меняются потоки ПГ, степень трансформации которых, а также потери углерода зависят от интенсивности дренажа, цели и характера использования (Laine et al., 1996; Laine and Sirin, 2008). Наиболее сильное воздействие оказывает добыча торфа, особенно самым распространенным фрезерным способом. Он предполагает создание каналов по контуру торфяника, его разделение магистральными и валовыми каналами глубиной до 3 м и эксплуатационное осушение картовыми глубиной до 1.5 м, углубляемыми по мере поверхностно-послойной сработки нафрезерованного и высохшего естественным путем торфа. При подготовке к добыче торфяники очищаются от растительности (Сирин, 2022).

Заброшенные без рекультивации нормативно или частично выработанные поля фрезерной добычи торфа годами не зарастают растительностью, выделяя CO_2 , CH_4 , иногда N_2O , теряя углерод при водной и ветровой эрозии. При отсутствии пользователя, заинтересованного и обеспечивавшего обязательные противопожарные мероприятия, они становятся объектами торфяных пожаров, как и заброшенные площади, осушенные для сельского хозяйства (Сирин и др., 2011). Эмиссия CO_2 из осушенных торфяников, используемых в сельском хозяйстве, обычно выше, что связано с подготовкой и обработкой почвы и зависит от характера использования — пашня, сенокосы или пастбища. Удобрение, а также обогащение почвы при выпасе стимулируют разложение органического вещества почвы, появление или усиление эмиссии N_2O . Наибольшие потери С характерны для пахотных земель, где он дополнительно теряется при ветровой и водной эрозии. При этом осушение не прекращает эмиссию CH_4 , которая происходит интенсивно из осушительной сети и в некотором количестве при временном увлажнении почвы (Суворов и др., 2010; Чистотин и др., 2006, 2016). Меньшие потери С и эмиссия ПГ происходят при лесосушении. Сказывается ограниченная интенсивность осушения, отсутствие целенаправленного уничтожения естественного древостоя и увеличение

его продуктивности после осушения. Поэтому выводы о влиянии лесосушения на общий баланс ПГ разнятся, даже по знаку (Escobar et al., 2022; Päivänen and Hanell, 2012; Peatlands ..., 2008; Rydin and Jeglum, 2013).

Значительные потери С и, соответственно, выбросы CO_2 происходят при торфяных пожарах. Они могут происходить в сухие годы и на естественных болотах, однако чаще на осушенных и заброшенных торфяниках (Сирин и др., 2011). При почвенных (торфяных) лесных пожарах происходит массовая гибель древостоя из-за повреждения сосущих корней (Вомперский и др., 2007), а также значительная потеря почвенного С, величина которой растет с интенсивностью осушения (Глухова, Сирин, 2018). Осушенные торфяники выделяются количеством горючих материалов на единицу площади (Huang and Rein, 2017; Sirin et al., 2021a). Из-за сгорания торфа единовременные выбросы CO_2 при лесоторфяном пожаре могут достигать $400 \text{ т } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1}$ и выше, а с учетом потерь фитомассы древостоя — более $600 \text{ т } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1}$ (Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2021a).

Национальные кадастры антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, учитывают несколько категорий земель, которые могут включать осушенные торфяники: лесные, пахотные, пастбища, 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). Уточнение 2019 г. к Руководящим принципам МГЭИК 2006 г. (IPCC, 2019a) внесло дополнения для затопленных земель (flooded lands), которые относятся к категории водно-болотные угодья и могут возникать при обводнении торфяников.

Осушено примерно 10% мировых болот. Занимая ~0.4% поверхности суши, осушенные торфяники выбрасывают в результате микробного окисления торфа и торфяных пожаров ~2 Гт CO_2 . Это ~5% всех антропогенных выбросов ПГ (Joosten et al., 2016), или более 1/4 выбросов, связанных с сектором “землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство” (ЗИЗЛХ) (Tubiello et al., 2016). Есть мнение, что в результате осушения и освоения торфяники планеты уже на рубеже 1960 г. сменили статус глобального поглотителя на источник ПГ. Без принятия соответствующих мер в отношении осушенных торфяников связанная с ними эмиссия ПГ в 2020—2100 гг.

может составить 12–41% объема выбросов ПГ, который необходимо сократить для достижения целей Парижского соглашения по климату (Leifeld et al., 2019).

Наиболее эффективный способ снижения выбросов ПГ из осушенных торфяников – их вторичное обводнение (rewetting) (Leifeld and Menichetti, 2018). В Специальном докладе МГЭИК “Изменение климата и земля” (IPCC, 2019b) отмечено, что восстановление торфяных болот направлено на наиболее богатые углеродом земли. Поэтому требуются меньшие площади, что, соответственно, имеет меньшие последствия для землепользования. Восстановление болот требует в 3 раза меньше азота по сравнению с мерами по сохранению аналогичного количества С в минеральных почвах (Leifeld and Menichetti, 2018). Вторичное обводнение торфяников может значительно сократить выбросы ПГ (Wilson et al., 2016), даже несмотря на увеличение эмиссии CH_4 (Günther et al., 2020), предотвращает торфяные пожары (Granath et al., 2016; Sirin et al., 2020), способствует восстановлению биоразнообразия (Minayeva et al., 2017), гидрологических (Ahmad et al., 2020) и других экосистемных услуг (Bonn et al., 2014). Однако сравнивая различные меры по смягчению изменений климата, МГЭИК (IPCC, 2019b) отметило восстановление болот только средним уровнем достоверности. Позитивный эффект вторичного обводнения а priori очевиден, однако для его подтверждения пока недостаточно научно подтвержденных данных.

Целью работы было рассмотреть вторичное обводнение торфяников в Российской Федерации, разработать подходы к оценке его эффективности с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов, представить их применимость на примере конкретного объекта обводнения и показать возможные пути уточнения этой оценки.

ВТОРИЧНОЕ ОБВОДНЕНИЕ ТОРФЯНИКОВ

Россия лидирует в мире по площади торфяных болот (Global ..., 2023)². Они занимают более 8%, а вместе с мелкоотторфованными землями (торф <30 см) – более 1/5 территории страны (Вомперский и др., 2005). Большинство болот сохранилось в естественном состоянии, однако не менее 8 млн га было осушено для сельского и лесного хозяйства, а также для добычи торфа (A Quick ..., 2009). Осушенные торфяники расположены преимущественно на Европейской территории страны (ЕТР) (Sirin et al., 2017; Tanneberger et al., 2017; 2021), на юге Западной Сибири, юге Дальнего Востока (A Quick ..., 2009). На ЕТР доля осушенных

и освоенных торфяников составляет ~5%, что лишь в 2 раза меньше среднего показателя по Европе (Tanneberger et al., 2021), а в центре и других регионах может достигать и превышать 50% (A Quick ..., 2009; Sirin et al., 2017). Добычей торфа было изменено по одним оценкам 0.85–1.5 млн га (A Quick ..., 2009), а по другим – 0.9 млн га торфяников, 70% из которых приходится на добычу торфа фрезерным способом (Перспективное ..., 2013). Разброс оценок связан с отсутствием упорядоченной статистики, нахождением и переводом в разные категории земель после рекультивации или оставления их пользователем.

В советский период выработанные торфяники подлежали рекультивации, обычно для сельского хозяйства, реже – других целей. Это касалось преимущественно фрезерной добычи. Карьеры и другие объекты, не требующие интенсивного осушения и имевшие чаще небольшую площадь, заболачивались сами, принимая в дальнейшем болотный облик (Vozbrannaya et al., 2023). После развала торфяной промышленности в начале 1990-х годов рекультивация практически прекратилась (Сирин и др., 2011; A Quick ..., 2009). На 01.01.2000 г. площадь торфоразработок в России составила 242.3 тыс. га (Торфяные ..., 2001). Национальный кадастр антропогенных источников и поглотителей парниковых газов основывается на площадях торфоразработок за 2000–2007 гг., которые сокращались с 261 до 219 тыс. га (Романовская и др., 2014). Эти площади относятся преимущественно к фрезерной добыче. Другие способы имеют ограниченный масштаб, используются преимущественно на местном уровне и с большой долей вероятности не попадают в учет. Поэтому из-за недостатка статистических данных приведенные выше оценки ориентировочны. Следует учитывать, что МГЭИК (IPCC, 2014) рассматривает совместно торфоразработки, подготавливаемые к добыче, действующие и заброшенные. В нашей стране многие торфоразработки были переведены без рекультивации в другие категории земель, например, “вернулись” после прекращения аренды в лесной фонд. Поэтому реальная площадь торфоразработок, подлежащих учету согласно РКИК ООН, может быть выше. Зброшенны фрезерныя поля плохo зарастаюa растительностью, подвержены пожарам. В результате микробного окисления (без учета водной и ветровой эрозии, эмиссии CH_4 и N_2O , а также пожаров) они ежегодно теряют С, сопоставимый по величине с 10%, изымаемой при интенсивной добыче торфа (Суворов и др., 2015). Торфоразработки, включая заброшенные, могут выявляться по спутниковым данным, что может быть использовано для актуализации их площадей (Сирин и др., 2014), а также оценки текущего состояния (Медведева и др., 2017; Sirin et al., 2020).

² Global Peatland Database. Greifswald Mire Centre, 2023. <https://greifswaldmire.de/global-peatland-database-en.html> (дата обращения 01.02.2023).

Российская Федерация отмечается как один из крупнейших после Индонезии и Европейского Союза источников парниковых газов из осушенных торфяников (Global ..., 2022). Методика расчета и обоснованность оценок вызывает вопросы, но масштаб проблемы не вызывает сомнения. При этом значительные площади осушенных и заброшенных торфяников обладают очевидным потенциалом вторичного обводнения для сокращения выбросов парниковых газов. Кроме этого, снижается пожарная опасность, повышается экологическая безопасность и потенциал адаптации к изменению климата.

Как и во многих странах, вторичное обводнение торфяников в России начиналось по инициативе экологических неправительственных организаций и других заинтересованных сторон для восстановления болотных экосистем, в первую очередь для восстановления биоразнообразия (A Quick ..., 2009; Sirin et al., 2017). Согласно Водному кодексу Российской Федерации (2006) (Водный ..., 2006) болота являются “водными объектами”, и “после окончания использования болота или его части проводится их рекультивация преимущественно путем обводнения и искусственного заболачивания” (п. 4, Ст. 57, ВК РФ 73-ФЗ). Однако эта норма обязательна только в отношении болот, включенных в реестр водных объектов, а многие из них продолжают находиться в других категориях земель, что усложняет юридическое согласование мероприятий по вторичному обводнению.

В последние два десятилетия основным движущим фактором вторичного обводнения неиспользуемых торфяников в стране стало предотвращение торфяных пожаров (Сирин и др., 2011). Они отличаются от других природных пожаров длительностью, выбросом опасных для человека продуктов горения и потерей углерода (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020). Пионером масштабных работ по обводнению торфяников стал Национальный парк “Мещера” (Владимирская область). При его образовании в 1992 г. в его территорию было включено 14,9 тыс. га осушенных торфяников, в том числе 7,6 тыс. га нарушенных фрезерной добычей торфа (Vozbrannaya et al., 2023). За 2002–2022 гг. было обводнено более 9 тыс. га торфяников (Vozbrannaya et al., 2023), что практически прекратило пожары на их площадях (Сирин и др., 2011).

После катастрофических пожаров 2010 г. в центре ЕТР с осени 2010 по 2013 г. включительно было обводнено 77 осушенных, пожароопасных торфяников площадью 73 049,84 га (рис. 1). С конца 19 столетия торфяники в центральной части ЕТР использовались для добычи торфа, осушения для сельского и лесного хозяйства (A Quick ..., 2009; Sirin et al., 2017). После 1917 г., когда другие топливные ресурсы стали недоступны, торф по-

лучил первостепенное значение, в том числе для реализации плана электрификации ГОЭЛРО. Наиболее масштабная добыча развернулась в восточной части Московской области (Sirin et al., 2017). Во второй половине 20-го столетия стал преобладать фрезерный способ добычи торфа, а заброшенные нерекультивированные торфоразработки, по которым лидирует Московская область, стали впоследствии наиболее пожароопасными объектами также во Владимирской, Нижегородской, Рязанской, Тверской и других областях. Их дополнили неиспользуемые торфяники, осушенные для сельского хозяйства (Сирин и др., 2011). Масштабными торфяными пожарами были отмечены 1972, 2002 и, особенно, 2010 гг. (Sirin et al., 2020), когда сочетание аномальной жары и смога имело катастрофические последствия для здоровья и жизни людей, увеличив избыточную смертность на десятки тысяч человек (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020).

Программа обводнения пожароопасных торфяников Московской области стала самым масштабным вторичным обводнением осушенных торфяников в Северном полушарии (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020). Работы проводились в несколько этапов, что касалось и отдельных объектов. В случае заброшенных торфоразработок планировалось преимущественно восстановление водно-болотных угодий. Для сельскохозяйственных земель была создана или восстановлена инфраструктура двустороннего регулирования водного режима как для предотвращения пожаров, так и для сохранения возможности возвращения этих земель в хозяйственный оборот. Строительство дамб, водосбросных плотин с затворами разной конструкции, водосливных плотин, дорожных переездов и других сооружений финансировалось из федерального бюджета, проектирование — Московской областью. В 2014 г. гидротехнические объекты были переданы специальной организации Московской области (Сирин и др., 2020). Статистика пожаров показала сокращение их числа и пройденной площади после обводнения, в том числе по сравнению с соседними регионами с близкой гидрометеорологической обстановкой (Sirin et al., 2020). Обводнение пожароопасных торфяников начало проводиться в Тверской, Нижегородской, Рязанской и других областях.

МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ОБВОДНЕНИЯ

Для оценки эффективности обводнения пожароопасных торфяников необходим их мониторинг. С учетом сложной проходимости и необходимости проведения минимум ежегодной оценки эффективно использование дистанционных данных. Мультиспектральные спутниковые данные хорошо зарекомендовали себя для анализа состояния торфяников [см. (Сирин и др., 2020)]. При

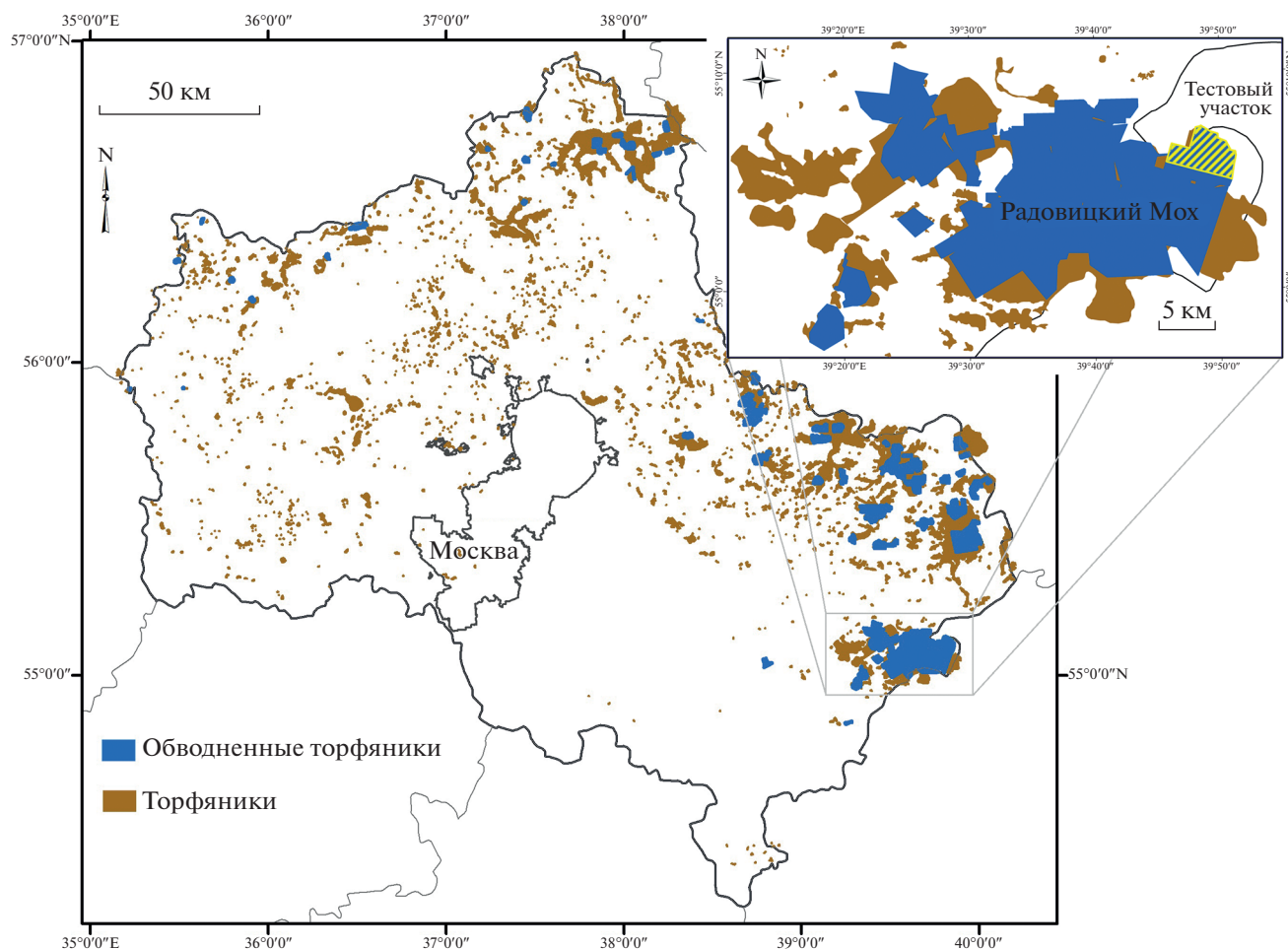


Рис. 1. Торфяники (неосушенные и осушенные) Московской области и вторично обводненные в рамках региональной программы 2010–2013 гг. Показан торфяник Радовицкий Мох с участком тестового расчета сокращения выбросов парниковых газов (заштрихован).

одновременном рассмотрении большого числа объектов со значительной площадью и для минимизации субъективности исследователя предпочтительна автоматизация анализа данных.

Была разработана методика оценки состояния торфяников с выделением 6 классов почвенно-растительного покрова по многоспектральным спутниковым снимкам (изначально Landsat-TM и ETM+) с использованием полос красного, ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного диапазонов (Медведева и др., 2011). Выделяются классы: 1) открытый торф, включая участки с разреженной растительностью; 2) кипрейные, вейниковые и березово-вейниковые сообщества; 3) сообщества с преобладанием сосны различной степени угнетенности; 4) сообщества с преобладанием ивы и березы; 5) гидрофильные сообщества на обводненных участках; 6) водные поверхности. Этот набор классов является компромиссом между возможностями полуавтоматической интерпретации мультиспектральных спутниковых

данных и решаемыми задачами по оценке состояния пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения.

Наземная проверка методики на примере разных объектов с построением матриц ошибок (Медведева и др., 2017, 2019; Сирин и др., 2020; Siringin et al., 2018) показала достаточно высокую (80% и более) точность классификации. Она была улучшена (до 90% и более) дополнительным использованием зимних снимков для уточнения участков с древесной растительностью (Сирин и др., 2020). Апробация показала, что данных одного аппарата недостаточно для анализа больших территорий и длинных временных рядов. Было проведено сравнение результатов использования спутниковых данных Spot-5, Spot-6, Landsat-7, Landsat-8 и Sentinel-2. Установлена критичность наличия коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазона, поэтому данные Spot-6 были признаны неприемлемыми из-за его отсутствия, несмотря на более высокое пространственное разрешение. Вы-

сокая точность результатов классификации данных других аппаратов определила возможность их совместного использования с близкими показателями конечных результатов классификации. Была установлена сходная высокая точность классификации данных методами минимального расстояния Erdas Imagine и объектно-ориентированного ScanEx Image Processor. Поэтому возможен переход от одного метода к другому без потери качества. Сравнимость точности результатов классификации данных разных аппаратов позволяет комбинировать классифицированные изображения и создает дополнительные возможности для анализа временных рядов (Медведева и др., 2017, 2019; Sirin et al., 2018).

Методика была апробирована и используется для оценки состояния пожароопасных осушенных торфяников разных субъектов ЕТР и выявления объектов, требующих вторичного обводнения. Были установлены основные тренды изменения растительного покрова как на отдельных объектах, так и на их совокупности в регионах. Мониторинг обводненных торфяников Московской области показал сокращение площадей открытого торфа и сухолубивой травяной растительности, некоторые изменения площадей, занятых древесной хвойной растительностью, поступательное расширение площади, занятой лиственной растительностью, увеличение после обводнения площади, занятой гидрофильными сообществами и открытой водой (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020). На основе указанной методики мониторинга был предложен подход по установлению эффективно обводненных участков торфяников.

ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Методическую основу количественной оценки выбросов парниковых газов во всех учитываемых секторах экономики, включая ЗИЗЛХ, определяют руководства МГЭИК, утверждаемые РКИК ООН наряду с порядком учета источников и поглотителей ПГ и формой отчетности о связанных с ними выбросах и стоках ПГ. РКИК ООН принят единый порядок подготовки национальной отчетности, который включает табличные формы Общего формата данных (ОФД или Common reporting format, CRF) и текстовую часть — Национальный доклад о кадастре (НДК или National Inventory Report, NIR). ОФД представляет собой унифицированный пакет таблиц, в который вносятся данные расчетов выбросов по каждому сектору, включая ЗИЗЛХ. В НДК описаны исходные данные, примененная методика, выбор параметров расчетов, оценка их достоверности (неопределенности), обсуждение результатов, усовершенствования и меры по повышению качества расчетов, предпринятые в ответ на замечания при проверке кадастров группами независи-

мых экспертов РКИК ООН. Совокупность ОФД и НДК представляет собой базу данных о выбросах каждой страны, начиная с 1990 и по год, предшествующий предыдущему, которая подается и обновляется ежегодно. Единый и унифицированный формат данных обеспечивает их сопоставимость и сравнительную оценку.

Утвержденные РКИК ООН методологии формируют Руководящие принципы представления информации о годовых кадастрах Сторон, включенных в приложение I к Конвенции (список стран, который включает Российскую Федерацию). Принятая РКИК ООН в 1999 г. система учета и отчетности о выбросах пересматривалась по мере разработки МГЭИК новых методологий количественной оценки выбросов и поглощения парниковых газов. В настоящее время в секторе ЗИЗЛХ учитываются 6 категорий земель: (1) лесные земли (forest lands); (2) земли, предназначенные для выращивания сельскохозяйственных культур (croplands); (3) земли с постоянным травянистым покровом — луга и пастбища (grasslands); (4) водно-болотные угодья (wetlands); (5) земли поселений (settlements) и (6) другие земли (other lands) (IPCC, 2003). Учитываются также их переходы из одной категории в другую — так называемая конверсия земель.

Согласно РКИК ООН, Национальная отчетность о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, включает несколько категорий земель с осушенными торфяниками. Это лесные земли, пахотные, пастбища и сенокосы и 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 по национальным инвентаризациям парниковых газов МГЭИК 2006 (IPCC, 2006) уточнило методики учета осушенных торфяников и добавило рекомендации по учету выбросов ПГ вторично обводненными торфяниками. В Уточнении 2019 г. к Руководящим принципам МГЭИК 2006 г. по национальным инвентаризациям парниковых газов (IPCC, 2019a) были внесены дополнения для затопленных земель (flooded lands), которые, как и торфоразработки, входят в главу “водно-болотные угодья” (wetlands) и могут возникать при обводнении торфяников.

Для торфяников, рассматриваемых МГЭИК как источники и поглотители ПГ (IPCC, 2006, 2014, 2019a), оценка проводится на основании данных о занимаемой ими площади и так называемых коэффициентов эмиссии КЭ (emission factors — EF). КЭ — это удельные потоки ПГ с единицы площади за год. Учитываются 4 климатических агента: CO₂, CH₄, N₂O и DOC. Отдельно рассматри-

вается эмиссия CH_4 из осушительных каналов. Предлагается также (IPCC, 2014) учет выбросов парниковых газов при торфяных пожарах в результате сгорания биомассы и торфа.

РКИК ООН предусмотрена система повышения качества, точности и достоверности представляемых данных на основе принципов, предлагаемых МГЭИК (IPCC, 2006). МГЭИК предусматривает систему 3-х уровней (Tier) количественной оценки выбросов ПГ. При наиболее простом (1) достаточно использовать данные из международных не детализированных источников информации (статистика ООН, ФАО и др.) и КЭ по умолчанию (default emission factors), предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2006, 2014, 2019a). Для осушенных и обводняемых торфяников они в большинстве случаев дифференцируются в соответствии с климатическим зонированием МГЭИК (IPCC Climatic Zones). Согласно ему вся ЕТР (кроме крайнего северо-востока), как и большая часть восточной и центральной Европы, юг Западной Сибири и Дальнего востока относятся к зоне холодного умеренного влажного климата (Cool Temperate Moist) (IPCC, 2019). Дополнительно КЭ различаются для так называемых “богатых” (rich) и “бедных” (poor) торфяников, разделяемых МГЭИК (IPCC, 2014) по электропроводности почвенной влаги $\geq 50 \text{ мкСм}^{-1}$ и $\leq 40\text{—}50 \text{ мкСм}^{-1}$ соответственно (Rydin and Jeglum, 2013).

Расчеты по наиболее сложному уровню (3) должны проводиться с использованием данных национальной статистики или других официальных источников, детализированных до уровня отдельных групп объектов, а также национальных КЭ и других параметров, которые были получены непосредственно для этих групп объектов. Промежуточный уровень (2) предусматривает использование национальных данных и параметрической информации, не столь детализированной, как в случае (3). Наиболее точными будут оценки выбросов, полученные при помощи 3-го уровня, однако оценки по 2-му уровню также имеют достаточно высокую степень точности и достоверности, а их получение может быть не столь трудоемким и дорогостоящим, что может быть предпочтительно с точки зрения соотношения затрат и качества оценок. Оригинальные подходы и методы должны быть верифицированы и апробированы посредством раскрытия информации о расчетных алгоритмах и используемых данных путем представления на научных конференциях и симпозиумах, а также публикации в рецензируемых научных журналах (IPCC, 2006).

Для оценки качества и достоверности полученных расчетов МГЭИК разработаны системы контроля и оценки неопределенности (IPCC, 2000). Оценка неопределенности проводится для отдельных категорий, климатических агентов,

инвентаризации в целом. Обеспечение и контроль качества инвентаризации, а также представление оценок неопределенности выбросов и поглощения ПГ обязательно (IPCC, 2006).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНО ОБВОДНЕННЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Официальной статистики вторично обводненных торфяников в России нет (Национальный ..., 2022), поэтому для их учета и включения в Национальный кадастр было необходимо определить площади торфяников, которые можно относить к вторично обводненным. В основу была положена представленная выше методика мониторинга (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021a). К обводненным торфяникам было предложено относить площади двух классов почвенно-растительного покрова: 1) “гидрофильные сообщества” с хвощом, осокой, тростником и другими водно-болотными видами и 2) “водные поверхности”, т.е. площади, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья. Они успешно отделяются от других классов по спектральной яркости (рис. 2).

Этот подход используется для определения обводненных площадей на национальном (Национальный ..., 2022) и региональном уровнях (Сирин и др., 2021). Он применим и для конкретных объектов обводнения, например, для участка торфяника Радовицкий Мох площадью 1535 га в Московской области (см. рис. 1). Мероприятия по обводнению начались здесь практически сразу после пожаров осенью 2010 г. Имевшиеся гидротехнические сооружения не требовали значительной реконструкции, а обильные дожди и талые воды способствовали быстрому подъему уровня воды. По мере задержания воды в первые годы происходило увеличение площадей, занятых “водными поверхностями”, а также поступательное распространение “гидрофильной растительности” (рис. 3).

Для анализа временной динамики обводненных площадей может возникать необходимость использования данных разных спутников (см. рис. 3). Это связано не только с их заменой. Даже для одного периода могут возникать сложности подбора данных из-за облачности, технических сбоев и других ограничений. Например, для оценки состояния торфяников Московской области за 2020 г. объединялись данные Sentinel-2, Landsat-7 и Landsat-8 за разные даты в июне, июле и сентябре 2020 г. и Sentinel-2 за январь 2021 г.

О точности результатов классификации (Olofsson et al., 2014) можно судить по наземной проверке объектов обводнения Московской области, проведенной по данным 2017 г. Для проверки классов “гидрофильная растительность” и “водные поверхности” был использован набор из

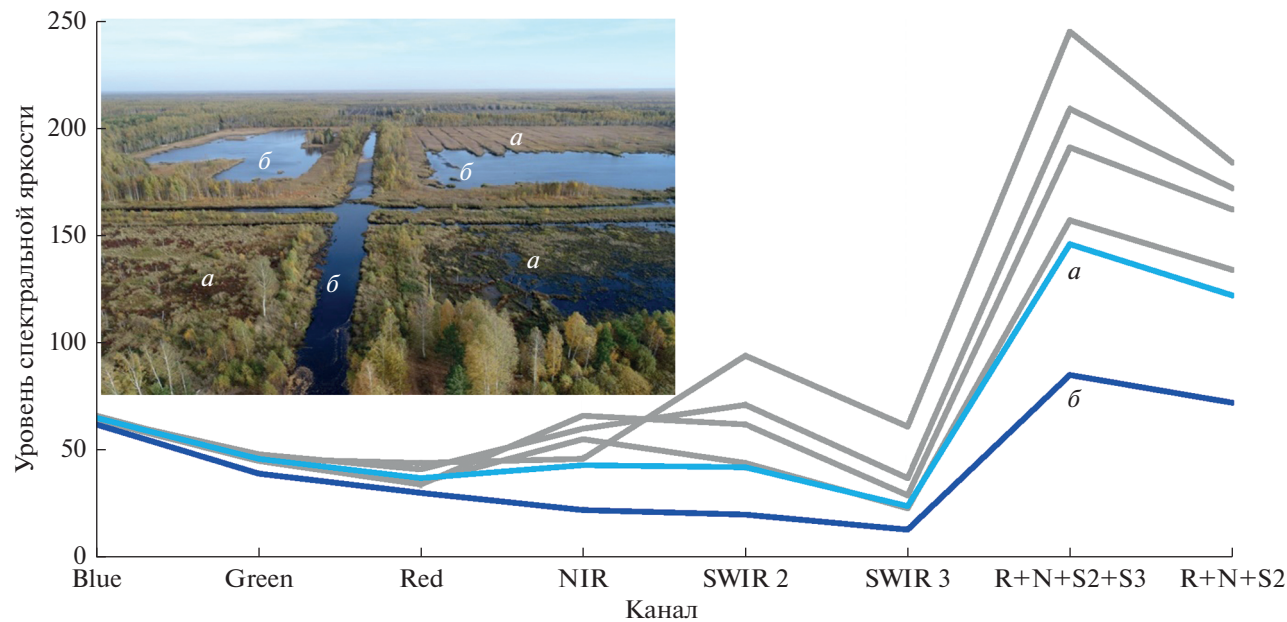


Рис. 2. Средние значения спектральной яркости классов “гидрофильная растительность” (а) и “водные поверхности” (б) на фоне других классов земного покрова. Показаны каналы, доступные от разных аппаратов. На врезке: вид части торфяника Радовицкий Мох, вторично обводненного начиная с конца 2010 г. Съемка 7.10.2020 г., высота 70 м (предоставлена К. Шахматовым).

54 однородных проверочных участков средней площадью $50 \times 50 \text{ м}^2$ с последующим построением полных матриц ошибок (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020), в которых кросс-табуляцией устанавливаются соответствия между значениями одних и тех же классов, полученных по спутниковым и наземным данным. В табл. 1 приведены результаты классов, относимых к эффективно обводненным, вероятность ошибки для которых составила менее 2% (Sirin et al., 2020).

Спутниковые снимки имеют ограниченное разрешение, поэтому была сделана попытка определить точность расчета площади по общей площади пограничных пикселей для каждого рассматриваемого класса. Если предположить, что более 50% площади пикселя принадлежит рассматриваемому классу, то ошибка составит не более 1/2 площади пикселей, расположенных на гра-

нице класса. Для получения 95% доверительного интервала (уровень неопределенности, принятый МГЭИК (IPCC, 2000)), площадь рассматривалась как случайная величина с симметричным треугольным распределением. Доверительными границами площади являются квантили уровней 2.5 и 97.5% соответственно. Проверка для участка торфяника Радовицкий Мох показала, что неопределенность площади класса “водные поверхности” составила около 6% при разрешении 10 м (Sentinel-2) и 17% при 30 м (Landsat-7,8), а “гидрофильная растительность” 20 и 32% соответственно (Sirin et al., 2021b). Несмотря на относительно высокие значения неопределенности, она не оказывает существенного влияния на неопределенность объема выброса ПГ: как будет видно в дальнейшем, неопределенность КЭ принципиально выше.

Таблица 1. Полные матрицы ошибок и точность результатов классификации относительно наземных данных

Данные ДЗЗ/Наземные данные	Гидрофильная растительность	Водные поверхности	Σ	Точность		
				пользователя	производителя	общая
Гидрофильная растительность	26	1	27	96.3	100	98.15
Водные поверхности	0	27	27	100.0	96.4	
Σ	26	28	54			

Примечание. Точность пользователя — вероятность совпадения реального класса с результатами классификации, точность производителя — точность определения расчетных классов.

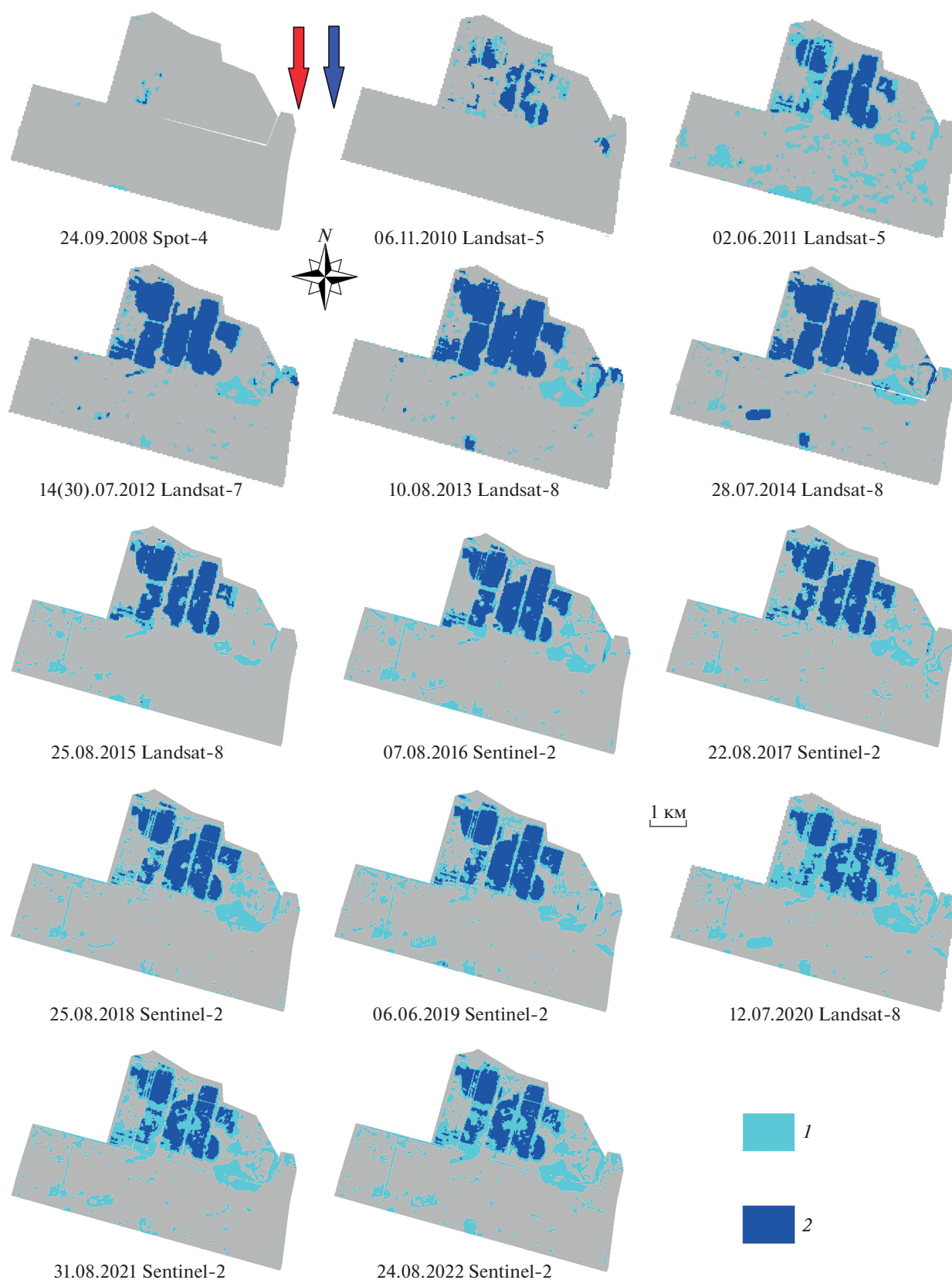


Рис. 3. Площади, занятые “гидрофильной растительностью” (1) и “водными поверхностями” (2), до (2008 г.) и после (2010–2022 гг.) вторичного обводнения на модельном участке площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область). Красная и синяя стрелки — время пожаров и начала вторичного обводнения соответственно.

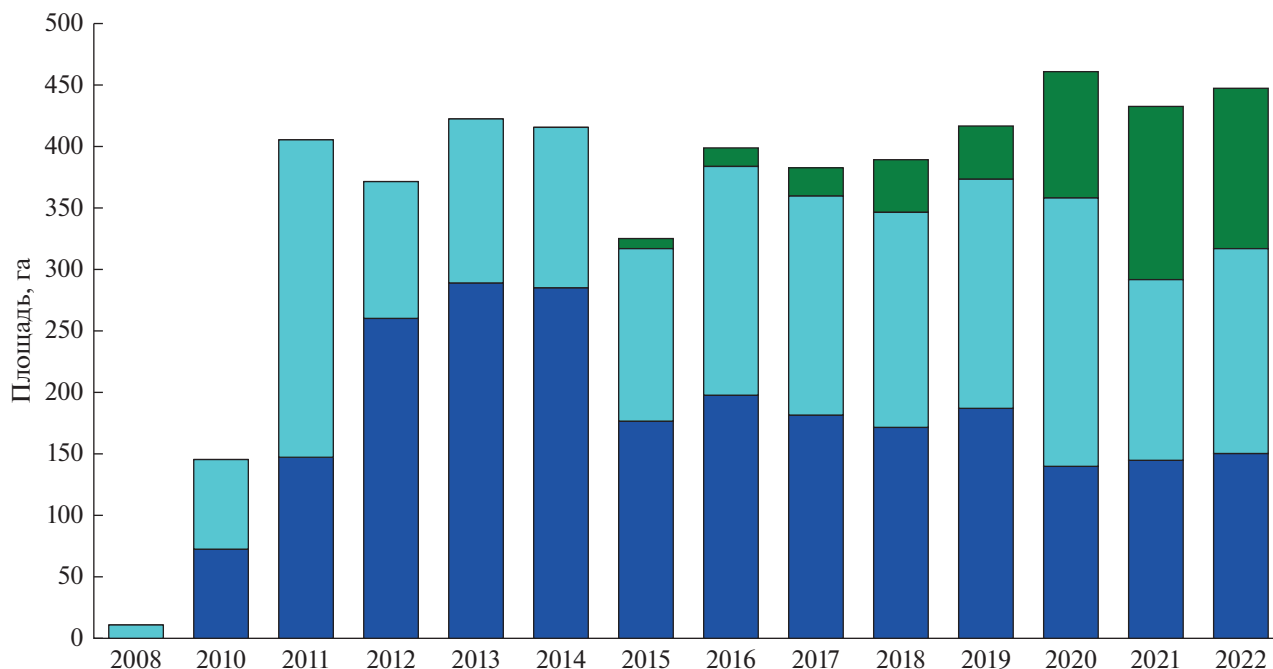


Рис. 4. Изменение площадей, занятых “водными поверхностями” (синий) и “гидрофильной растительностью” (голубой), в том числе заросших древесно-кустарниковой растительностью (зеленый), до (2008 г.) и после (2010–2022 гг.) вторичного обводнения модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область).

Часть площадей, занятых водой и гидрофильной растительностью, может со временем зарастать деревьями и кустарниками, в первую очередь — ивняком. Частично к нему могут “добавляться” участки с тростником, рогозом и другими видами, которые сложно отделяются от кустарников и небольших деревьев даже с использованием данных зимней съемки. Для рассматриваемого участка торфяника Радовицкий Мох эффективно обводненные площади, которые предположительно заросли древесно-кустарниковой растительностью и, соответственно, “попадают” в другой класс растительного/земельного покрова, были определены на основании анализа данных съемки за разные годы (рис. 4). На рис. 3 участки “гидрофильной растительности” включают также площади, которые со временем заросли древесно-кустарниковой растительностью.

Площадь “водных поверхностей” и “гидрофильной растительности” не является фиксированной. После строительства или реконструкции гидротехнических сооружений происходит постепенное накопление талых и дождевых вод. В маловодные годы этот процесс замедляется, возможны потери накопленной влаги, поэтому текущее состояние объектов обводнения может зависеть от гидрометеорологической обстановки конкретного вегетационного периода. Для обводненных торфяников Московской области была выявлена корреляция между площадями “водной поверхности” с количеством осадков за 30 сут, предшествующих

дате съемки (Sirin et al., 2020). На рис. 5 показана зависимость площади, занятой “гидрофильной растительностью” и совокупности “водные поверхности” и “гидрофильная растительность”, от суммы осадков за 60 дней. Использованы данные близкорасположенной метеостанции г. Гусь-Хрустальный. Суммировались значения за часть текущего месяца, предшествующий месяц и части перед ним. Влияние осадков на площадь, занятую гидрофильной растительностью, оказалось незначительным по сравнению с ошибками измерений (значимость $p = 0.1$), однако влияние на суммарную площадь (“водные поверхности” и “гидрофильная растительность”) было более существенным (значимость $p = 0.01$); если $p < 0.05$, влиянием этого фактора пренебречь нельзя.

ОЦЕНКА СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Занятые “гидрофильной растительностью” и “водными поверхностями” участки могут быть отнесены к категориям, определяемым Дополнением по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам по национальным инвентаризациям парниковых газов МГЭИК 2006 (IPCC, 2006) как увлажненные органические почвы (rewetted organic soils) и затопленные земли (flooded lands) соответственно. Для расчета эмиссии ПГ с таких площадей можно применить КЭ, предлагаемые МГЭИК по умолчанию (default fac-

tors) для указанных выше категорий, а для базиса расчета — КЭ исходных (например, торфопоразработок). Такой подход был использован для методики оценки сокращения выбросов парниковых газов в результате вторичного обводнения торфяников и включения последних впервые в 2020 г. для РФ в Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021a). Методика может быть использована для оценки сокращения выбросов парниковых газов при вторичном обводнении торфяников на национальном, региональном и объектном уровнях.

Для рассматриваемого в качестве примера участка торфяника Радовицкий Мох мы исходили из того, что он представляет собой бывшие торфопоразработки. МГЭИК (IPCC, 2006, 2014) не разделяет торфопоразработки на подготовленные к добыче (т.е. осушенные и очищенные от растительности), действующие и заброшенные. Допущение о принадлежности к торфопоразработкам было применено для всех эффективно обводненных площадей Московской области (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021a). Здесь объекты вторичного обводнения включали и пожароопасные участки сельскохозяйственного осушения. Однако на них проводилось преимущественно восстановление систем регулирования водного режима для предотвращения пожаров при сохранении возможности возвращения в хозяйственный оборот. На спутниковых снимках большинства обводненных участков, сделанных до проведения мероприятий, идентифицируются участки открытого торфа, что указывает на проводившуюся ранее торфодобычу.

В этом случае для исходного состояния обводненных площадей можно использовать КЭ, предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2014) для “торфяников, используемых для добычи торфа”. Далее можно получить изменение КЭ после обводнения (табл. 2). Использование КЭ для торфопоразработок в качестве “базовой линии” не завышает оценку, так как КЭ для торфопоразработок в целом ниже чем для торфяников, осушенных для сельского хозяйства (IPCC, 2014). Для “увлажненных органомных почв” мы использовали КЭ, предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2014) для “прохладной умеренной влажной” климатической зоны, для “затопленных земель” — КЭ для агрегированной “прохладной умеренной” зоны (IPCC, 2019a). С учетом имеющихся данных (Чистотин и др., 2006) все обводненные площади были условно отнесены к “богатым” (IPCC, 2014).

При расчете эмиссии CH_4 из осушительных каналов использовали предлагаемое МГЭИК (IPCC, 2014) и соответствующее нашим оценкам (Чистотин и др., 2006) значение доли площади, занятой

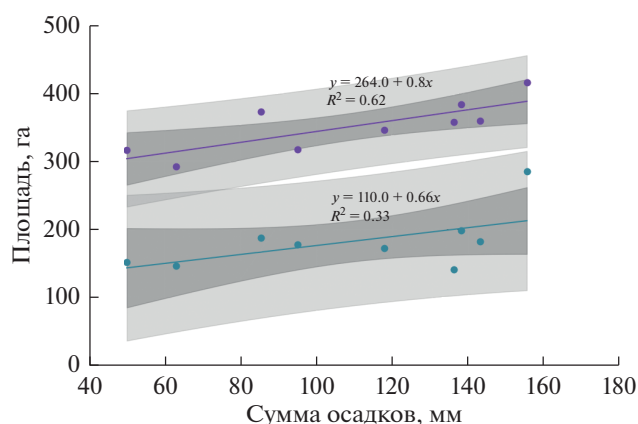


Рис. 5. Изменение площади, занятой “гидрофильной растительностью” (голубой) и “гидрофильной растительностью” вместе с “водными поверхностями” (фиолетовый), за годы после проведения вторичного обводнения модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область), в зависимости от суммы осадков за 2 месяца, предшествующих дате съемки. Темно-серый фон — 95%-й доверительный интервал для линии средних значений, светло-серый фон — 95%-й доверительный интервал для измеренных значений, R^2 — коэффициент детерминации регрессионной модели.

дренажной сетью, равное 5%. Предполагаем, что после обводнения эмиссия CH_4 с площадей, занятых осушительными канавами, становится близкой эмиссии с затопленной площадью. Это относится и к “водным поверхностям”, и к площадям с “гидрофильной растительностью”. Эмиссии CH_4 из дренажной сети способствует турбулентное перемешивание (Сирин и др., 2012). После обводнения сток прекращается, сокращается поступление в канавы свежей органики, необходимой для метаногенеза, а также латеральный принос растворенного и газообразного CH_4 . Были приняты нулевыми вынос DOC с обводненных площадей и, согласно МГЭИК (IPCC, 2014), эмиссия N_2O .

Было рассчитано изменение выбросов ПГ после обводнения участка торфяника Радовицкий Мох до 2022 г., а также сделан прогноз накопительным итогом на период до 2050 г. (рис. 6). Возможные дополнительные изменения состояния торфяника не учитывали. Неопределенности были оценены в соответствии с рекомендациями МГЭИК (IPCC, 2000) с учетом большой асимметричной неопределенности КЭ. Предположили треугольное распределение входных величин (приближенное к нормальному распределению) и использовали метод распространения ошибок. Неопределенности определения площади в конечных расчетах не учитывали. Анализ чувствительности показал, что неопределенность выбросов CO_2 в решающей степени определяется неопределенностью

Таблица 2. Изменение коэффициентов эмиссии, предлагаемых МГЭИК (IPCC, 2014), для торфопоразработок после их вторичного обводнения и перехода в другое состояние

Агент	Единица	Коэффициент эмиссии* среднее (95% доверительный интервал)
Увлажненные органогенные почвы “Rewetted organic soils” (IPCC, 2014)		
CO ₂	tCO ₂ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	–2.3 (–4.4...–0.4)
DOC		–0.07 (–0.25...0.11)
CH ₄ soil	kgCH ₄ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	210 (1...434)
CH ₄ ditch		–457 (–837...172)
N ₂ O	kgN ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹	–0.3 (–0.64...0.03)
Затопленные земли “Flooded lands” (IPCC, 2019a)		
CO ₂	tCO ₂ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	–1.78 (–3.43...–0.41)
DOC		–0.31 (–0.50...0.15)
CH ₄ soil	kgCH ₄ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	78.6 (70.7...86.2)
CH ₄ ditch		–457 (–887.2...–27.4)
N ₂ O	kgN ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹	–0.3 (–0.64...0.03)

Примечание: * – рассчитанное значение; CH₄ soil and CH₄ ditch: эмиссия CH₄ с поверхности торфопоразработок и из канав соответственно.

КЭ (особенно для гидрофильной растительности), а влияние неопределенности площади незначительно (Sirin et al., 2021b).

Основное сокращение выбросов ПГ происходит за счет снижения эмиссии CO₂. Наибольший вклад внесли участки, занятые гидрофильной растительностью, как за счет большей площади, так и большего изменения КЭ. Здесь более активно идет фотосинтез, образуется больше биомассы, часть отпада которой, в конечном счете, может формировать торф. Можно предполагать дальнейшее снижение эмиссии CO₂. Площади, занятые гидрофильной растительностью, будут увеличиваться как за счет распространения подтопления, так и за счет зарастания затопленных участков. Снизились потери с выносом DOC. Возросла эмиссия CH₄, особенно за счет участков с гидрофильной растительностью, однако она сократилась из дренажной сети. Небольшой вклад внесло снижение или прекращение эмиссии N₂O. В итоге сокращение выбросов углерода для участка торфяника Радовицкий Мох площадью 1535 га достигло 33.4 тыс. т CO₂ к 2022 г. и может составить почти 113.4 тыс. т CO₂ к 2050. С учетом всех климатических агентов и, прежде всего, увеличения эмиссии CH₄, сокращение выбросов ПГ составило 20.2 тыс. т CO₂-экв. к 2020 г. и может составить почти 67.6 тыс. т CO₂-экв. к 2050. В среднем сокращение выбросов углерода составляло ~2 т CO₂-экв. га⁻¹ год⁻¹, а с учетом всех климатических агентов – немногим более 1 т CO₂-экв. га⁻¹ год⁻¹.

ПУТИ УТОЧНЕНИЯ ОЦЕНКИ

Представленный подход и полученные оценки сокращения выбросов ПГ после обводнения максимально консервативны. Учитывается вклад только площадей, которые стали участками, покрытыми водой или представленными “гидрофильной растительностью”. Причем возможное изменение их площади при прогнозных оценках не учитывается. На большинстве объектов вторичного обводнения не предусмотрено двустороннее регулирование водного режима и, несмотря на наличие переливных плотин, сбрасывающих избыток воды в период половодья и дождевых паводков, объем накопленной влаги будет расти, распространяя эффект обводнения на большие площади.

Рассмотрение только площадей, занятых гидрофильной растительностью и водой, не учитывает эффект обводнения на частях торфяника, которые характеризуются другим растительным/земельным покровом. Повышение уровня болотных вод на всех площадях будет снижать линейно связанную с ними эмиссию CO₂ (Couwenberg et al., 2011) за счет препятствия аэробному микробному разложению торфа. Одновременно может происходить изменение потоков других ПГ, в том числе увеличение эмиссии CH₄, однако, как было показано ранее, сокращение эмиссии CO₂ будет перекрывать другие последствия обводнения. Включить в учет такие площади непросто: они могут характеризоваться пространственным разнообразием, требующим охвата данными измерений потоков ПГ. Это трудоемко и возникает вопрос о целесообразности и возможной эффективности.

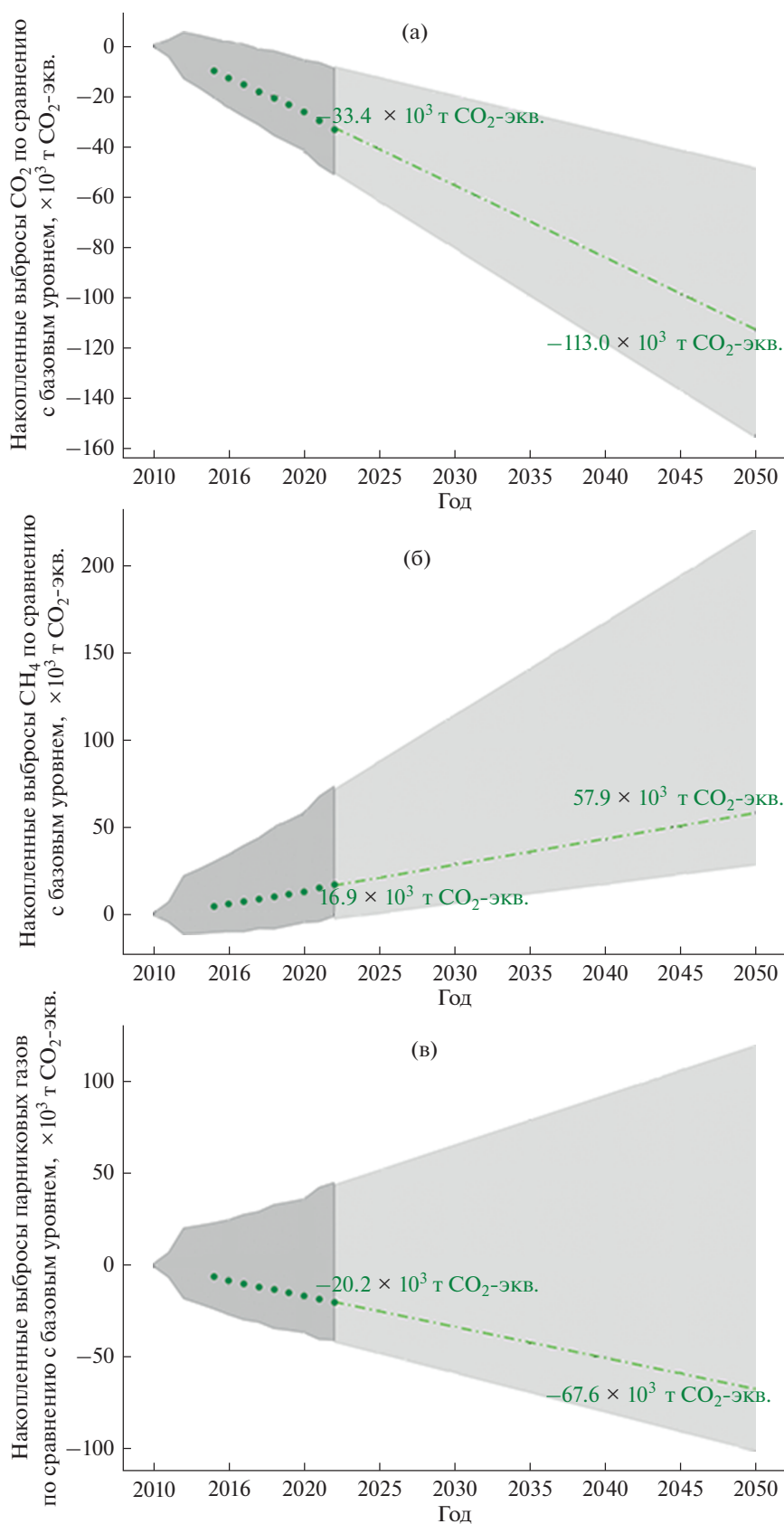


Рис. 6. Изменение выбросов накопительным итогом (а) CO_2 , (б) CH_4 и (в) всех климатических агентов (CO_2 , CH_4 , N_2O , DOC) после вторичного обводнения за 2010–2022 гг. (точки) и прогноз на период до 2050 г. (пунктирная линия) для модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область).

Например, методика GEST (Greenhouse gas emission site type), наиболее известная для оценки проектов обводнения в рамках добровольного рынка “углеродных единиц”, например, для Verified Carbon Standard – VCS (www.v-c-s.org), основана на типизации участков растительного покрова для привязки значений потоков ПГ всего объекта обводнения (Couwenberg et al., 2011). Методика предполагает сбор подробных натурных данных о состоянии объекта обводнения (торфяная залежь, растительность, микрорельеф и пр.) и последующий его мониторинг после проведения мероприятий. Это сложно и затратно, однако не дает непосредственной информации для оценки сокращения выбросов ПГ. Для этого необходимо знать фактически два значения – баланс учитываемых ПГ до и после обводнения. Методика предполагает рассмотрение более 30 классов типов участков (GEST), из которых лишь часть обеспечена оценками потоков ПГ (Углеродные ..., 2011).

В Дополнении по водным угодьям (IPCC, 2014) были обобщены имеющиеся на тот момент данные об эмиссии ПГ из осушенных и обводняемых торфяников. В дальнейшем были обновлены и скорректированы данные для обводненных торфяников (Wilson et al., 2016). Расширение работ по обводнению и их научному обеспечению способствовало проведению измерений, получению и уточнению региональных оценок потоков ПГ с осушенных и обводняемых торфяников (Jagšius et al., 2022). Однако данные о потоках ПГ, полученные в рамках ограниченных временем проектов, характеризуют баланс ПГ за периоды с конкретной гидрометеорологической обстановкой. В то же время на потоки ПГ в болотах влияет широкий спектр сложно взаимосвязанных биологических, физических и химических процессов (Assessment ..., 2008) и их баланс может меняться в зависимости от погодно-климатических условий. Болото, являющееся стоком CO₂ в нормальный год, становится источником CO₂ не только в жаркий и сухой, но и во влажный и прохладный год (Alekseychik et al., 2021). Почти 10-летние измерения потоков ПГ на торфоразработках (Сирин, Суворов, 2022) показали кратное варьирование значений потоков в разные годы. При этом, речь идет о наиболее “простом” объекте: растительность и фотосинтез отсутствуют, основные потоки связаны с разложением торфа.

КЭ, предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2006, 2014, 2019a), определяются экспертным путем группой специалистов на основании учета всех актуальных на момент анализа данных о потоках ПГ с учетом происходящих процессов и явлений. Такой подход, а также объединение в большие группы объектов при их рассмотрении обеспечивает определенную достоверность оценки. Анализ данных измерений потоков ПГ на торфоразра-

ботках показал их в целом согласованность с КЭ, предлагаемых МГЭИК (Сирин, Суворов, 2022). Получить обоснованные оценки КЭ для большого числа разнородных объектов и для регионов с отличными природными условиями представляется малореальным. Кроме трудоемкости это отвлекает от учета более значимых аспектов. В первую очередь, учета сокращения выбросов ПГ путем предотвращения природных пожаров – основной цели вторичного обводнения торфяников, по крайней мере, в нашей стране. Упомянутые выше разработки для добровольного рынка углеродных единиц, предполагающие проведение большого и не очень относящегося к предмету объема работ, не предполагают обязательного учета этого фактора.

Снижение или прекращение природных пожаров на торфяниках после проведения обводнения подтверждено для Национального парка “Мещера” (Сирин и др., 2011), для Московской области (Sirin et al., 2020). Это видно и на примере рассматриваемого участка торфяника Радовицкий Мох (рис. 7). Данные были получены путем анализа тепловых аномалий MODIS с уточнением площадей гарей путем сравнения спектральных характеристик поверхности до и после пожара по данным Landsat-5 TM (Медведева и др., 2020). Не все природные пожары на торфяниках переходят в торфяные пожары. Весной, когда торф насыщен водой после снеготаяния, огонь ограничивается растительностью, а заглубляется существенно реже, чем в летний период (Сирин и др., 2022). Детектирование собственно торфяных пожаров возможно на основании его длительности, температуры и индекса мощности пожара (Fire Radiation Power – FRP) (Сирин и др., 2022; Sirin and Medvedeva, 2022). Это может помочь определить характер пожара и выбросы ПГ, связанные только с горением биомассы или включающие также торфяную почву. Эффект от предотвращения пожаров в результате обводнения можно оценить, например, на основании анализа частоты пожаров до и после проведения обводнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осушенные торфяники являются значительным источником поступления ПГ в атмосферу, а в случае оставления пользователем, становятся также наиболее вероятными объектами торфяных пожаров. Эффективный путь сокращения эмиссии ПГ и предотвращения торфяных пожаров на неиспользуемых осушенных торфяниках – вторичное обводнение и заболачивание.

Был разработан подход к оценке сокращения выбросов ПГ после вторичного обводнения, применимый для учета на национальном и региональном уровнях, а также для конкретных проектов обводнения. Он включает методику определе-

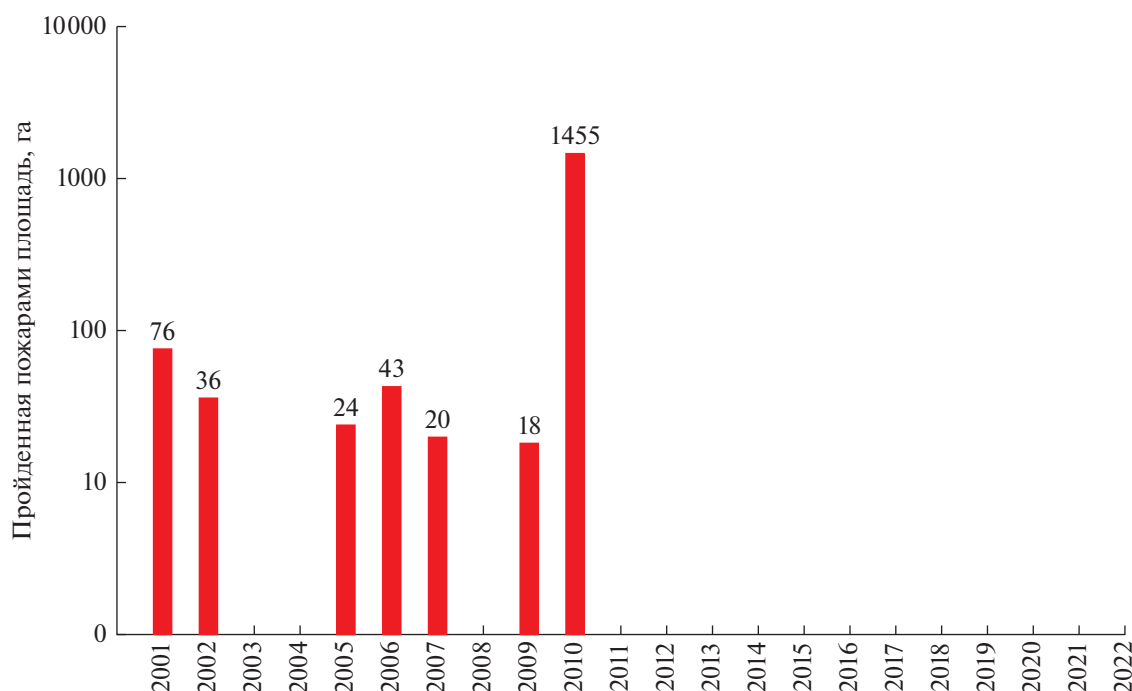


Рис. 7. Изменение площади, пройденной природными пожарами, в пределах модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область).

ния эффективно обводненных площадей, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья (затопленные участки и покрытые гидрофильной растительностью), приложения к ним коэффициентов эмиссии ПГ, предлагаемых МГЭИК, а также оценку неопределенности. Подход был использован при включении с 2020 г. вторично обводненных торфяников в Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом.

Оценка на примере участка торфяника площадью 1,5 тыс. га программы обводнения пожароопасных торфяников в Московской области (2010–2013 гг.) показала сокращение выбросов углерода накопительным итогом к 2022 г. 33,4 тыс. т (с учетом потоков закиси азота, выноса растворенного углерода и увеличения эмиссии CH_4 – 20 тыс. т CO_2 -экв.). Согласно сделанному прогнозу, это сокращение может достигнуть к 2050 г. почти 113 (68) тыс. т соответственно. В среднем сокращение выбросов углерода составляло ~ 2 т CO_2 -экв. га^{-1} год^{-1} , а с учетом всех климатических агентов немногим более 1 т CO_2 -экв. га^{-1} год^{-1} .

Представленный подход и полученные оценки сокращения выбросов ПГ после обводнения консервативны и не учитывают целого ряда аспектов. В первую очередь это касается снижения числа и площади торфяных пожаров и, соответственно,

предотвращения значительных выбросов диоксида углерода в атмосферу и других климатических агентов. Эффект от предотвращения пожаров в результате обводнения можно оценить, например, на основании анализа частоты пожаров до и после проведения обводнения.

Имеющиеся данные показывают, что вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников может внести определенный вклад в снижение выбросов ПГ. Значение этих мероприятий для смягчения изменений климата (mitigation) будет расти по мере сокращения выбросов парниковых газов в других секторах экономики и иных разделах ЗИЗЛХ. Это может внести весомый вклад в реализацию Парижского соглашения по климату в рамках сектора “землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство”.

Вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников не имеет видимых отрицательных последствий. Улучшение среды, повышение экологической безопасности, восстановление водно-болотных угодий и связанных с ними экологических услуг и, конечно, предотвращение природных пожаров, включая торфяные, являются дополнительными, но, возможно, даже более весомыми аргументами в поддержку этих мероприятий. Они могут и должны стать важной составляющей в решении задач по смягчению изменений климата и адаптации к ним.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6) и на стадии доработки при поддержке Российского научного фонда (проект 23-74-00067).

FUNDING

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6) and is being finalized with the support of the Russian Science Foundation (project no. 23-74-00067).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны А.А. Романовской и В.Н. Короткову (Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля) за консультации и помощь по включению вторично обводненных торфяников в Национальный кадастр Российской Федерации. Благодарны К. Шахматову (Тверской государственный технологический университет) за предоставление снимков участка торфяника Радовицкий Мох.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to A.A. Romanovskaya and V.N. Korotkov (Israel Institute for Global Climate and Ecology) for their advice and assistance in incorporation of rewetted peatlands in the National Cadastre of the Russian Federation. We are grateful to K. Shakhmatov (Tver State Technological University) for Radovitski Mokh drone photography.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ.
- Вомперский С.Э., Сири́н 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.
- Глухова Т.В., Сири́н А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сири́н А.А. Оценка состояния заброшенных торфопроизрастков по многоспектральным спутниковым изображениям // Иссл. Земли косм. 2011. № 5. С. 80–88.
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сири́н А.А., Маслов А.А. Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфопроизрастков // Иссл. Земли косм. 2017. № 3. С. 76–84. <https://doi.org/10.7868/S0205961417020051>
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сири́н А.А., Маслов А.А. Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 150–159. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159>
- Медведева М.А., Макаров Д.А., Сири́н А.А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166>
- Минаева Т.Ю., Сири́н А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Усп. соврем. биол. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
- Национальный докл. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. М.: Росгидромет, 2022. Ч. 1. 468 с. <https://unfccc.int/documents/461970>
- Перспективное использование выработанных торфяных болот: Монография / под общ. ред. В.В. Панова. Тверь: Изд-во “Триада”, 2013. 280 с.
- 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. гидр. 2014. № 3. С. 5–18.
- Сири́н А.А. Болота и антропогенно-измененных торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата // Успехи современной биологии. 2022. Т. 142. № 6. С. 560–577. <https://doi.org/10.31857/S0042132422060096>
- Сири́н А.А., Суворов Г.Г. Эмиссия парниковых газов на торфопроизрастках в центре Европейской России // Метеорол. гидр. 2022. № 3. С. 68–80. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-68-80>
- Сири́н А.А., Минаева Т.Ю., Возбранная А.Е., Барталев С.А. Как избежать торфяных пожаров? // Наука в Рос. 2011. № 2. С. 13–21.
- Сири́н 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., Иткин В.Ю. и др. Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // Метеорол. гидрол. 2022. № 10. С. 33–45.
- 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>
- 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>
- 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 Publ., 2011. 221 с.
- Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е. Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2006. № 6. С. 54–62.
- 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.
- A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe / T. Minayeva, A. Sirin, O. Bragg (Eds.). 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. Total Environ. 2020. Vol. 749. P. 141571.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>
- Alekseychik P., Korrensalo A., 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. № 18. P. 4681–4704.
<https://doi.org/10.5194/bg-18-4681-2021>
- Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / F. Parish, A. Sirin, D. Charman et al. (Eds.). Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands Int., 2008. 179 p.
- Bonn A., Reed M., Evans C.D. et al. Investing in nature: developing ecosystem service markets for peatland restoration // Ecosyst. Serv. 2014. Vol. 9. P. 54–65.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Couwenberg J., Michaelis D., Joosten H. et al. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy // Hydrobiologia. 2011. Vol. 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. Vol. 10. P. 834371.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.834371>
- Frolking S., Roulet N.T. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions // Glob. Change Biol. 2007. Vol. 13. № 5. P. 1079–1088.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Global Peatlands Assessment – The State of the World's Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Nairobi: Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, 2022. 418 p.
<https://www.unep.org/resources/global-peatlands-assessment-2022>
- Granath G., Moore P., Lukenbach M., Waddington J.M. Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration // Sci Rep. 2016. № 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. Vol. 11. P. 1644.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: The role of moisture, density and oxygen supply // Int. J. Wildland Fire. 2017. № 26. P. 907–918.
<https://doi.org/10.1071/WF16198>
- IPCC, 2000. IPCC 2000 Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Methodology Report / J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanul, L. Buendia, R. Hoppaus, T. Martinsen, J. Meijer, K. Miwa, K. Tanabe (Eds.). Hayama: IGES Publ., 2000.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Methodology Report / J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kru-

- ger, P. Riitta, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (Eds.). Hayama: IGES Publ., 2003.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use / H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa et al. (Eds.). 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 / T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe (Eds.). Switzerland: IPCC, 2014.
- IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc (Eds.). 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 / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia et al. (Eds.). Switzerland: 2019b. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- 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., Sirin A., Couwenberg J. et al. The role of peatlands in climate regulation // Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice / A. Bonn, T. Allott, M. Evans et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2016. P. 63–76. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Laine J., Silvola J., Tolonen K. et al. Effect of water-level drawdown on global climatic warming: northern peatlands // Ambio. 1996. Vol. 25. № 3. P. 179–184.
- Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies // Nat. Commun. 2018. Vol. 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. Vol. 9. P. 945–947. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity // Mires and Peat. 2017. Vol. 19. P. 1–7. <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Olofsson P., Foody G.M., Herold M. et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // Remote Sens. Environ. 2014. № 148. P. 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Päivänen J., Hanell B. Peatland ecology and forestry – a sound approach. Helsinki: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos, 2012. 267 p.
- Peatlands and climate change / M. Strack (Ed.). Saarijaarvi: Saarijarven Offset Oy, 2008. 223 p.
- Rydin H., Jeglum J. The biology of peatlands. 2nd edition. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013. 382 p.
- Sirin A., Laine J. Peatlands and Greenhouse Gases // Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change. Main Report / F. Parish, A. Sirin, D. Charman (Eds.). Wageningen: Global Environ. Centre, Kuala Lumpur and Wetlands Int., 2008. P. 118–138.
- Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al. Russian Federation (European Part) // Mires and peatlands of Europe: status, distribution and conservation / H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen (Eds.). 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. Vol. 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. Vol. 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. Vol. 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. Vol. 10. P. 1200. <https://doi.org/10.3390/land10112000>
- Sirin A., Medvedeva M. Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: identification among other wildfires // Remote Sens. 2022. Vol. 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. Vol. 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. Vol. 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>
- Wilson D., Blain D., Couwenberg J. et al. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // Mires and Peat. 2016. Vol. 17. P. 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- Vozbrannaya A., Antipin V., Sirin A. After Wildfires and Rewetting: Results of 15+ Years' Monitoring of Vegetation and Environmental Factors in Cutover Peatland // Diversity. 2023. Vol. 15. P. 3. <https://doi.org/10.3390/d15010003>

Rewetting of Disused Drained Peatlands and Reduction of Greenhouse Gas Emissions

A. A. Sirin¹, M. A. Medvedeva¹ *, and V. Yu. Itkin^{1, 2}

¹Peatland Protection and Restoration Center, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, Moscow oblast, Russia

²Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

*e-mail: eveeza@yandex.ru

Drained peatlands are a significant source of greenhouse gas emissions to the atmosphere. When abandoned, they become the most likely sites of peat fires. An effective way to reduce greenhouse gas emissions and prevent peatland fires in disused drained peatlands is through rewetting and wetland restoration. These can make significant contributions to the implementation of the Paris Climate Agreement within the Land Use, Land-Use Change and Forestry sector and, ultimately, to climate change mitigation. An approach for estimating greenhouse gas emission reductions following rewetting, applicable to national and regional accounting, as well as to specific rewetting projects, is presented. It includes a methodology for determining effectively rewetted areas that can be considered wetlands, the application of IPCC greenhouse gas emission factors to said sites, and an uncertainty assessment. Starting from 2020 the Russian Federation National Report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol utilised this approach in its inclusion of rewetted peatlands. An assessment of greenhouse gas emission reductions is presented using the example of a 1500 ha section of a peatland within the Fire Hazardous Peatland Rewetting Programme in Moscow Oblast (2010–2013). CO₂ emission reductions were cumulatively 33.4 thous. t by 2022 (taking into account nitrous oxide fluxes, dissolved organic carbon removal and increased CH₄ emissions—20 thous. t CO₂-eq.) and are projected to reach almost 113 (68) thous. t by 2050. Greenhouse gas emission reductions not yet included as well as possible ways of accounting for them in the future are also noted.

Keywords: climate change, mitigation, peatlands, multispectral space images, peat extraction, Paris Agreement on Climate, National Cadaster

REFERENCES

- A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe.* Minayeva T., Sirin A., Bragg O., Eds. Wageningen: Wetlands Int., 2009. 132 p.
- Ahmad S., Liu H., Günther A., Couwenberg J., Lennartz B. Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function. *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 749, p. 141571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>
- Alekseychik P., Korrensalo A., Mammarella I., Launiainen S., Tuittila E.-S., Korpela I., Vesala T. Carbon balance of a Finnish bog: temporal variability and limiting factors based on 6 years of eddy-covariance data. *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, no. 16, pp. 4681–4704. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4681-2021>
- Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report.* Parish F., Sirin A., Charman D. et al., Eds. Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands Int., 2008. 179 p.
- Bonn A., Reed M., Evans C.D., Joosten H., Bain C., Farmer J., Emmer I., Couwenberg J., Moxey A., Artz R., Tanneberger F., von Unger M., Smyth M.-A., Birnie D. Investing in nature: developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosyst. Serv.* 2014, vol. 9, pp. 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Carbon Credits from Peatland Rewetting. Climate—Biodiversity—Land Use.* Tanneberger F., Wichtmann W., Eds. Stuttgart: E. Schweizerbart Science Publ., 2011. 221 p.
- Chistotin M.V., Sirin A.A., Dulov L.E. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane emission from a peatland in Moscow region drained for peat extraction and agricultural use. *Agrokhimiya*, 2006, no. 6, pp. 54–62. (In Russ.).
- Chistotin M.V., Suvorov G.G., Sirin A.A. The temporal pattern of methane emission from drained peat soil at pot experiment as depended on vegetation and soil moisture. *Agrokhimiya*, 2016, no. 12, pp. 20–33. (In Russ.).
- Couwenberg J., Michaelis D., Joosten H., Augustin J., Bährisch S., Dubovik D., Liashchynskaya N., Michaelis D., Minke M., Skuratovich A., Joosten H. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 2011, no. 674, pp. 67–89. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>
- Escobar D., Belyazid S., Manzoni S. Back to the future: restoring northern drained forested peatlands for climate change mitigation. *Front. Environ. Sci.*, 2022, vol. 10, p. 834371. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.834371>
- Frolking S., Roulet N.T. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Glob. Change Biol.*, 2007, vol. 13, no. 5, pp. 1079–1088. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Global Peatlands Assessment – The State of the World's Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report.* Nairobi: Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, 2022. 418 p.
- Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. *Eurasian Soil Sci.*,

- 2018, no. 51, pp. 542–549.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318050034>
- Granath G., Moore P., Lukenbach M., Waddington J.M. Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration. *Sci Rep.*, 2016, no. 6, p. 28498.
<https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Günther A., Barthelmes A., Huth V., Joosten H., Jurasinski G., Koebisch F., Couwenberg J. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, p. 1644.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: The role of moisture, density and oxygen supply. *Int. J. Wildland Fire.*, 2017, no. 26 (11), pp. 907–918.
<https://doi.org/10.1071/WF16198>
- IPCC, 2000. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Methodology Report*. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanul S., Buendia L., Hop-paus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K., Eds. Hayama: IGES Publ., 2000.
- IPCC, 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Methodology Report*. Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Riitta P., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F., Eds. Hayama: IGES Publ., 2003.
- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. et al., Eds. Hayama: IGES Publ., 2006.
- IPCC, 2014. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K. et al., Eds. Switzerland: IPCC, 2014.
- IPCC 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A. et al., Eds. 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*. Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E. et al., Eds. Switzerland, 2019b.
- Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore*. Jarašius L., Etzold J., Truus L., Purre A.-H., Sendžikaitė J., Strazdiņa L., Zableckis N., Pakalne M., Bociąg K., Ilomets M., Herrmann A., Kirschey T., Pajula R., Pawlaczyk P., Chlost I., Cieśliński R., Gos K., Libauers K., Sinkevicius Ž., Jurema L., Eds. Vilnius: Lithuanian Fund for Nature Publ., 2022. 201 p.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation. In *Peatland Restoration and Ecosystem Services. Science, Policy and Practice*. Bonn A., Allott T., Evans M. et al., Eds. Cambridge: CUP, 2016, pp. 63–76.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Laine J., Silvola J., Tolonen K., Alm J., Nykänen H., Vasander H., Sallantausta T., Savolainen I., Sinisalo J., Martikainen P.J. Effect of water-level drawdown on global climatic warming: northern peatlands. *Ambio*, 1996, vol. 25, no. 3, pp. 179–184.
- Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nat. Commun.*, 2018, no. 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, no. 9, pp. 945–947.
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A., Sirin A.A. Multispectral remote sensing for assessing changes on abandoned peat extraction lands. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2011, no. 5, pp. 80–88. (In Russ.).
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. Capabilities of multispectral remote sensing data in an assessment of the status of abandoned fire hazardous and rewetting peat extraction lands. *Izv., Atmosf. Ocean. Phys.*, 2017, no. 53, pp. 1072–1080.
<https://doi.org/10.1134/S0001433817090201>
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. Possibilities of different multispectral satellite data for monitoring of abandoned fire hazardous peatlands and effectiveness of their rewetting. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 150–159. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159>
- Medvedeva M.A., Makarov D.A., Sirin A.A. Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation. *Sovrem. Prob. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 5, pp. 157–166. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166>
- Minayeva T.Y., Sirin A.A. Peatland biodiversity and climate change. *Biol. Bull. Rev.*, 2012, no. 2, pp. 164–175.
<https://doi.org/10.1134/S207908641202003X>
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity. *Mires Peat*, 2017, no. 19, pp. 1–7.
<https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Natsional'nyi doklad o kadastrе antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtzii poglotitelyami parnikovykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2020 gg. Chast' I* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions from Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Part I]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022. 468 p.
- Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.*, 2014, vol. 148, pp. 42–57.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Peatland ecology and forestry – a sound approach*. Päivänen J., Hännell B., Eds. Helsinki: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos, 2012. 267 p.
- Peatlands and climate change*. Strack M., Ed. Saarijärvi: Saarijärven Offset Oy, 2008. 223 p.

- Perspektivnoe ispol'zovanie vyrabotannykh torfyanykh bolot: monografiya* [Perspective Use of Depleted Peat Bogs: Monograph]. Panova V.V., Ed. Tver': Triad Publ., 2013. 280 p.
- Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Smirnov N.S., Karaban' R.T., Trunov A.A. Land use contribution to the anthropogenic emission of greenhouse gases in Russia in 2000–2011. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, no. 3 (39), pp. 137–145.
<https://doi.org/10.3103/S1068373914030017>
- Rydin H., Jeglum J. The biology of peatlands. 2nd edition. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013. 382 p.
- Sirin A., Laine J. Peatlands and Greenhouse Gases. In *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change. Main Report*. Parish F., Sirin A., Charman D. et al., Eds. Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands Int., 2008, pp. 118–138.
- Sirin A.A., Minaeva T.Yu., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A. How to avoid peat fires? *Nauka v Rossii*, 2011, no. 2, pp. 13–21. (In Russ.).
- Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. Values of methane emission from drainage ditches. *Dinamika Okruzh. Sredy i Glob. Izm. Klimata*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 1–10. (In Russ.).
- Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva N.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V. Mapping of peatlands in the Moscow oblast based on high-resolution remote sensing data. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2014, no. 7, pp. 808–814.
<https://doi.org/10.1134/S1995425514070117>
- Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al. Russian Federation (European Part). In *Mires and peatlands of Europe: status, distribution and conservation*. Joosten H., Tanneberger F., Moen A., Eds. Stuttgart: Schweizerbart Sci. Publ., 2017, pp. 589–616.
- 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, no. 7 (2), 71 p.
<https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I. Depth of peat burning and carbon loss during an underground forest fire. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2020, no. 13, pp. 769–779.
<https://doi.org/10.1134/S1995425520070112>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Joosten H. 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, vol. 158, p. 106044.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Joosten H. Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow oblast. *Vestn. St. Peterb. Gos. Univ., Nauki o Zemle*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 314–336. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Il'yasov D.V., Korotkov V.N., Minaeva T.Yu., Suvorov G.G. Rewetted peatlands in the climate reporting of the Russian Federation. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 84–112. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-84-112>
- Sirin A., Maslov A., Makarov D., Gulbe Y., Joosten H. Assessing Wood and soil carbon losses from a forest-peat fire in the boreo-nemoral zone. *Forests*, 2021a, no. 12 (7), 880 p.
<https://doi.org/10.3390/f12070880>
- Sirin A., Medvedeva M., Korotkov V., Itkin V., Minayeva T., Ilyasov D., Suvorov G., Joosten H. Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting. *Land*, 2021b, no. 10, 1200 p.
<https://doi.org/10.3390/land10111200>
- Sirin A.A. Peatbogs and anthropogenically modified peatlands: carbon, greenhouse gases and climate change. *Biol. Bull. Rev.*, 2022, no. 12 (Suppl. 2), pp. S123–S139.
<https://doi.org/10.1134/S2079086422080096>
- Sirin A., Medvedeva M. Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: identification among other wildfires. *Remote Sens.*, 2022, no. 14, 194 p.
<https://doi.org/10.3390/rs14010194>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Itkin V.Yu., Makarov D.A., Korotkov V.N. Peat fire detection to estimate greenhouse gas emissions. *Meteorolog. i Gidrolog.*, 2022, no. 10, pp. 33–45. (In Russ.).
- Sirin A.A., Suvorov G.G. Greenhouse gas emissions from peat extraction in the center of the European part of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, vol. 47, no. 3, pp. 207–216.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922030062>
- Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. Effect of vegetation and moisture conditions on the emission of methane from drained peat soil. *Agrokhimiya*, 2010, no. 12, pp. 37–45. (In Russ.).
- Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. The carbon losses from a drained peatland in Moscow oblast used for peat extraction and agriculture. *Agrokhimiya*, 2015, no. 11, pp. 51–62. (In Russ.).
- Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S., Barthelmes A., Shumka S., Mariné A.M., Jenderedjian K., Steiner G.M., Essl F., Etzold J., Mendes C., Kozulin A., Frankard P., Milanović D., Ganeva A., Apostolova I., Alegro A., Delipetrou P., Navrátilová J., Risager M., Leivits A., Fosaa A.M., Tuominen S., Muller F., Bakuradze T., Sommer M., Christanis K., Szurdoki E., Oskarsson H., Brink S.H., Connolly J., Bragazza L., Martinelli G., Aleksans O., Priede A., Sungaila D., Melovski L., Belous T., Saveljić D., de Vries F., Moen A., Dembek W., Mateus J., Hanganu J., Sirin A., Markina A., Napreenko M., Lazarević P., Šefferoá-Stanová V., Skoberne P., Pérez P.H., Pontevedra-Pombal X., Lonnstad J., Küchler M., Wüst-Galley C., Kirca S., Mykytiuk O., Lindsay R., Joosten H. The peatland map of Europe. *Mires Peat*, 2017, no. 19, article 22, pp. 1–17.
<https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>
- Tanneberger F., Joosten H., Moen A., Lewis E., Miles L., Sirin A., Tegetmeyer C., Joosten H. Mires in Europe – regional diversity, condition and protection. *Diversity*, 2021, vol. 13, no. 8, 381 p.
<https://doi.org/10.3390/d13080381>
- Torfyanye bolota Rossii: k analizu otraslevoi informatsii* [Peatlands of Russia: to the Analysis of Sectorial Information]. Sirin A.A., Minaeva T.Yu., Eds. Moscow: GEOS Publ., 2001. 190 p.

- Tubiello F.N., Biancalani R., Salvatore M., Rossi S., Conchedda G. A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils. *Sustain.*, 2016, vol. 8, no. 4, no. 371, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8040371>
- Vomperskii S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2005, no. 5, pp. 39–50. (In Russ.).
- Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Koval'ev A.G. The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs. *Lesoved.*, 2007, no. 6, pp. 35–44. (In Russ.).
- Vozbrannaya A., Antipin V., Sirin A. After Wildfires and Rewetting: Results of 15+ Years' Monitoring of Vegetation and Environmental Factors in Cutover Peatland. *Diversity*, 2023, no. 15, 3 p. <https://doi.org/10.3390/d15010003>
- Water Code of the Russian Federation*. The Federal Law no. 74 of June 03, 2006. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102107048> (accessed: 30.04.2023). (In Russ.).
- Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C.D., Murdiyarso D., Page S.E., Renou-Wilson F., Rieley J.O., Sirin A., Strack M., Tuittila E.-S. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires Peat*, 2016, no. 17, pp. 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>