

Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации

А.А. Сирин^{1)*}, *М.А. Медведева*¹⁾, *Д.В. Ильясов*¹⁾, *В.Н. Коротков*²⁾,
*Т.Ю. Минаева*¹⁾, *Г.Г. Суворов*¹⁾

¹⁾ФГБУН Институт лесоведения РАН,
Россия, 143030, Московская область, с. Успенское, ул. Советская, 21;

²⁾ФГБУ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

*адрес для переписки: *sirin@ilan.ras.ru*

Реферат. Осушенные торфяники выделяют при микробном окислении торфа и торфяных пожарах ~5% всех антропогенных эмиссий парниковых газов (ПГ) или более 25%, связанных с землепользованием. Происходит также эмиссия метана из осушительной сети, некоторые осушенные торфяники выделяют закись азота, выносятся органическое вещество с дренажным стоком. Будучи оставленными пользователем, осушенные торфяники часто подвержены пожарам. Наиболее эффективным путем сокращения выбросов ПГ неиспользуемыми осушенными торфяниками является их вторичное обводнение, которое может внести существенный вклад в выполнение Парижского соглашения по климату в части землепользования. Рекультивация болота или его части после добычи торфа должна проводиться согласно Водному кодексу РФ (2006) преимущественно путем обводнения и искусственного заболачивания. В 2010-2013 гг. в Московской области было обводнено более 73 тыс. га пожароопасных торфяников (наиболее масштабный опыт в Северном полушарии), долговременный мониторинг которых показал снижение частоты торфяных пожаров. Вторично обводненные торфяники – объект национальной отчетности об антропогенных источниках и поглотителях парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, однако их учет в России не ведется. Представлен подход к определению площадей вторично обводненных торфяников, основанный на апробированной методике мониторинга их пожароопасности и эффективности обводнения по мультиспектральным спутниковым данным. К обводненным торфяникам предложено относить участки, 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 2006 (IPCC, 2006), как увлажненные органические почвы («rewetted organic soils») и затопленные земли («flooded lands»). Для Московской области на 2019 год их площади составили более 5.3 и 3.6 тыс. га соответственно. Коэффициенты эмиссии ПГ для увлажненных органических почв и торфоразработок даны в

Дополнении МГЭИК (IPCC, 2014), а для затопленных земель – в Уточнении 2019 года к Руководящим принципам МГЭИК 2006 года по национальным инвентаризациям парниковых газов (IPCC, 2019б). При допущении об исходной принадлежности обводненных участков к торфоразработкам расчеты показали общее сокращение выбросов ПГ более чем на 36 тыс. т CO₂-экв год⁻¹, даже несмотря на увеличение эмиссии метана. Подход может быть использован и для оценки снижения выбросов ПГ в результате вторичного обводнения отдельно взятых объектов. Оценки консервативны (т.е. минимальны), так как не учитывают эффект обводнения для всей площади объектов обводнения и снижения выбросов ПГ от торфяных пожаров. Учет этих факторов, а также переход по данным проводимых измерений на КЭ регионального уровня могут в перспективе уточнить результаты расчетов.

Ключевые слова. Смягчение климатических изменений, изменение климата, диоксид углерода, метан, закись азота, растворенный углерод, торфоразработки, вторичное обводнение, восстановление болот.

Rewetted peatland in the climate reporting of the Russian Federation

*A.A. Sirin¹⁾, M.A. Medvedeva¹⁾, D.V. Ilyasov¹⁾, V.N. Korotkov²⁾,
T.Yu. Minayeva¹⁾, G.G. Suvorov¹⁾*

¹⁾ Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences,
21, Sovetskaya str., 143030, Uspenskoe, Russia;

²⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia

* Correspondence address: sirin@ilan.ras.ru

Abstract. Drained peatlands due to microbial oxidation of peat and peat fires are responsible for ca ~5% of all anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions or more than 25% of land-use based emissions. Drained peatlands emit methane, in some cases nitrous oxide; contribute to the removal of organics with runoff. Abandoned drained peatlands are more often prone to fires. The most effective way to reduce GHG emissions from drained peatlands is their rewetting, which can make a significant contribution to the implementation of the Paris Agreement on Climate in terms of the land-use sector. Rehabilitation of a peatland or its part after peat extraction should be carried out according to the Water Code of the Russian Federation (2006) mainly by rewetting. In 2010-2013, more than 73 thousand hectares of fire-prone peatlands were rewetted in the Moscow Oblast (the largest experience in the Northern Hemisphere), long-term monitoring of which showed a decrease in the frequency of peat fires. Rewetted peatlands are an object of national reporting on the inventory of anthropogenic sources and sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol. However, the Russian Federation has no state accounting of this objects. The paper presents an approach to determine areas of rewetted peatlands based on the approved methodology of monitoring the state

of fire-dangerous peatlands and efficiency of their rewetting by means of multispectral satellite data. It was proposed that rewetted areas should include those with hydrophilic vegetation as well as those covered with water. Such areas can be referred to the categories defined by the Wetlands Supplement (IPCC, 2014) to the IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006) as «rewetted organic soils» and «flooded lands». For the Moscow region for 2019 they amounted to more than 5.3 and 3.6 thousand hectares, respectively. GHG emission factors for rewetted organic soils are given in the IPCC Supplement (IPCC, 2014), and for flooded lands in the 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019b). Assuming the original affiliation of rewetted areas with peat extraction, the calculations showed an overall reduction in GHG emissions of more than 36000 t CO₂-eq yr⁻¹, even though methane emissions increased. The approach can also be used to estimate GHG emission reductions from rewetting of individual objects. Estimates are conservative, not considering the effect of rewetting on the whole area of rewetted objects, and from reduction of GHG emissions from peat fires, the inclusion of which, as well as the transition to the regional emission factors, based on measurement data, can in the future refine results of the evaluation.

Keywords. Mitigation, climate change, carbon dioxide, methane, nitrogen oxide, dissolved organic carbon, peat extraction, rewetting, peatland restoration.

Введение

Занимая 0.3% суши, осушенные торфяники¹⁾ выделяют в результате микробного окисления торфа и торфяных пожаров ~2 Гт диоксида углерода (CO₂), что составляет ~5% всех антропогенных эмиссий парниковых газов (ПГ) (Joosten et al., 2016). Их эмиссия CO₂ в атмосферу может составлять более четверти выбросов ПГ, связанных с сельским хозяйством, лесным хозяйством и другими видами землепользования – Agriculture, Forestry and Land use (AFOLU) (Tubiello et al., 2016). После осушения болот происходит интенсивная эмиссия метана (CH₄) из дренажной сети; в некоторых условиях она наблюдается и из межканавных пространств; может происходить выделение закиси азота (N₂O), вынос растворенной органики (DOC) со стоком (Sirin, Laine, 2008). Осушенные, особенно неиспользуемые заброшенные торфяники наиболее часто подвержены торфяным пожарам (Сирин и др., 2011), лидирующим среди других природных пожаров по величине сгораемого материала на единицу площади (Huang, Rein, 2017; Сирин и др., 2019), и которая увеличивается с интенсивностью осушения (Глухова, Сирин, 2018).

¹⁾ Используем термин торфяное болото применительно к болотам, находящимся в естественном или близком к естественному состоянию, и термин торфяник ко всем объектам, имеющим или сохранившим торфяную залежь или ее часть, но в первую очередь утратившим болотный растительный покров или подвергшимся сильному его изменениям по антропогенным или иным причинам. Подход соответствует международной практике использования терминов «mire» в первом случае, и «peatland» – во втором (Минаева, Сирин, 2011).

Предполагается, что в результате осушения для разных целей торфяные болота планеты перешли на рубеже 1960 года из нетто-поглотителя в нетто-источник ПГ (Leifeld et al., 2019). Без принятия соответствующих мер эмиссия ПГ из осушенных торфяников в 2020-2100 гг. может составить 12-41% объема выбросов ПГ, необходимого сократить для удержания глобального потепления ниже +1.5... +2°C (Leifeld et al., 2019). Это определяет важное и недооцененное значение проблемы осушенных торфяников для выполнения Парижского соглашения по климату и ключевое – в части антропогенных эмиссий ПГ, связанных с землепользованием. Необходимость учета антропогенно-измененных торфяников и других земель, относимых к категории водно-болотных угодий (wetlands), определила разработку Дополнения по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам по национальным инвентаризациям парниковых газов МГЭИК 2006 (IPCC, 2006).

Наиболее эффективный путь снижения выбросов ПГ с осушенных торфяников – их вторичное обводнение (Leifeld, Menichetti, 2018). Специальный доклад МГЭИК «Изменение климата и земля» (IPCC 2019a; Семенов и др. 2019) среди других мер по смягчению изменений климата и адаптации к ним отметил, что восстановление торфяников направлено на наиболее богатые углеродом земли, поэтому требует меньших площадей и, соответственно, оказывает меньшее воздействие на структуру землепользования. Кроме этого, это требует в 3 раза меньше азота (N), по сравнению с аналогичными по эффективности мерами по накоплению углерода (C) в минеральных почвах (Leifeld, Menichetti, 2018). Восстановление болот путем вторичного обводнения торфяников может значительно сократить выбросы ПГ в атмосферу (Wilson et al., 2016) даже при возможном увеличении эмиссии CH₄ (Günther et al., 2020), снизить вероятность торфяных пожаров (Granath et al., 2016; Sirin et al., 2020), способствовать восстановлению биоразнообразия (Minayeva et al., 2017), гидрологических (Ahmad et al., 2020) и других экосистемных функций болот (Bonn et al., 2014).

Торфяные болота занимают более 8%, а вместе с мелкоотторфованными землями (торф < 30 см) – более 20% территории России (Болота ..., 2017; Вомперский и др., 2005, 2011). Большая часть болот сохранилась в естественном состоянии, однако более 8 млн га были осушены для сельского и лесного хозяйства, добычи торфа: оценки приблизительны из-за неполной инвентаризации и специфики отраслевого учета (A Quick ..., 2009). Основные площади осушенных торфяников расположены в Европейской части страны (Sirin et al., 2017; Tanneberger et al., 2017), на юге Западной Сибири и Дальнего Востока (A Quick ..., 2009). Наибольшее воздействие на болота оказывает добыча торфа, особенно фрезерным способом – наиболее распространённым в России и многих странах промышленным методом, который предполагает интенсивное осушение торфяного массива. По разным оценкам, торфоразработками было изменено 0.85-1.5 млн. га (A Quick ..., 2009) – 0.9 млн га болот (Перспективное ..., 2013), 70% которых – фрезерной добычей. После нормативной выработки они подлежали рекультивации преимущественно для

сельского хозяйства, реже – для других целей. Однако нерекультивированные, частично или планомерно выработанные площади накапливались и выросли после спада торфяной промышленности в начале 1990-х годов (A Quick ..., 2009; Сирин и др., 2011). На 01.01.2000 площадь торфоразработок составила 242.3 тыс. га (Торфяные ..., 2001). По статистическим данным, используемым при оценке вклада землепользования в антропогенную эмиссию ПГ, их площадь снижалась с 2000 по 2007 год с 261 до 219 тыс. га (Романовская и др., 2014). Однако из-за сложности учета осушенных торфяников, используемых в народном хозяйстве (Торфяные ..., 2001), данные ориентировочны. Эти площади сформированы, вероятно, по большей части объектами фрезерной добычи (другие, например, карьеры по добыче торфа имеют незначительную площадь и с большей вероятностью не вошли в учет) и включают все объекты, относимые МГЭИК (IPCC 2006; 2014; 2019б) к торфоразработкам: подготовленные (немногочисленны из-за сокращения освоения новых месторождений), разрабатываемые, а также брошенные после частичной выработки без рекультивации. Зброшенныя поля фрезерной добычи плохо зарастают растительностью и могут годами сохранять открытые поверхности торфа, которые выявляются в т.ч. по спутниковым данным (Медведева и др. 2017, Сирин и др., 2019).

На фоне экономических изменений последних десятилетий значительные площади торфяников, осушенные для добычи торфа и сельского хозяйства, были брошены. Только за счет эмиссии CO₂ (без учета водной и ветровой эрозии) неиспользуемый участок фрезерной добычи торфа теряет в зависимости от гидрометеорологических условий от 1.6 до 4.7 т С га⁻¹год⁻¹, т.е. за 10 лет минерализуется объем торфа, соизмеримый с ежегодно изымаемым при промышленной добыче (Суворов и др., 2015). Имеются оценки, согласно которым Россия занимает одно из ведущих мест после Индонезии и стран Западной Европы по эмиссии ПГ из осушенных торфяников (Joosten, 2010; Briefing ..., 2019). В то же время наличие значительных площадей осушенных торфяников, не перспективных для возвращения в хозяйственный оборот, представляет серьезный потенциал для сокращения выбросов парниковых газов помимо задач снижения пожарной опасности и повышения экологической безопасности.

Как и за рубежом, вторичное обводнение торфяников в России начиналось с инициативных проектов, направленных на восстановление болот и связанного с ними биологического разнообразия (A Quick ..., 2009). Согласно ст. 52 Водного кодекса РФ (2006) рекультивация после окончания использования болота или его части для добычи торфа должна проводиться преимущественно путем обводнения и искусственного заболачивания. После торфяных пожаров 2002 и особенно 2010 годов основным аргументом обводнения стало предотвращение опасности торфяных пожаров (Сирин и др., 2011). В 2010-2013 гг. в Московской области было обводнено более 73 тыс. га пожароопасных торфяников (Информационный ..., 2018), что составляет значительную часть торфяников и болот региона (Сирин и др., 2014) и является наиболее масштабным опытом таких мероприятий в Северном полушарии.

Долговременный мониторинг объектов обводнения в Московской области показал достижение основной цели – снижение частоты торфяных пожаров (Сирин и др., 2020). Однако не менее важно оценить изменение баланса ПГ в результате проведенных мероприятий. Официальной статистики по обводненным торфяникам в стране не ведется. Поэтому, в первую очередь необходимо определить площади, которые можно отнести к обводненным и, которые могут быть включены в Национальную отчетность Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом. Цель данной работы – представить методику определения площадей вторично обводненных торфяников для включения в кадастр (Национальный..., 2021) и на примере объектов обводнения в Московской области показать расчет изменения выбросов парниковых газов, по данным МГЭИК (IPCC, 2006; 2014; 2019б).

Методы и материалы

Определение обводненных площадей

Мероприятия по обводнению торфяников для снижения опасности торфяных пожаров включают создание инфраструктуры для их предотвращения и тушения, двустороннее регулирование водного режима при необходимости сохранения возможности возвращения площадей в хозяйственный оборот и для части территории – создание водного режима, обеспечивающего восстановление водно-болотных угодий. Такие площади могут быть отнесены к категории, определяемой МГЭИК (IPCC, 2014), как увлажненные органические почвы («rewetted organic soils»), а во втором случае – также и к затопленным землям («flooded lands»).

Для установления указанных площадей была использована методика оценки состояния пожароопасных и обводненных торфяников по данным мультиспектральной космической съемки. Она предполагает выделение 6 классов почвенного/растительного покрова, была верифицирована по наземным данным и апробирована на различных объектах (Медведева и др., 2011, 2017, 2019; Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2018, 2020). В качестве обводненных торфяников было предложено учитывать два класса земного покрова (рис. 1): 1) «гидрофильная растительность» с рогозом, осокой, тростником и другой водно-болотной растительностью, идентифицирующую увлажненные органические почвы («rewetted organic soils»); 2) «водные поверхности», которые образовались преимущественно после обводнения, как затопленные земли («flooded lands»). Оба класса характеризуют участки, которые являются и будут в дальнейшем развиваться как водно-болотные угодья.

Для проведения классификации необходимы спутниковые данные с видимым диапазоном, включая красный (RED), ближним инфракрасным БИК 1 (NIR) и коротковолновым инфракрасным каналам БИК 2 и БИК 3 (SWIR) (рис. 2). Этим требованиям отвечают сенсоры спутников Landsat-5 (7,8), Sentinel-2, Spot-4 (5) и других аппаратов, включая коммерческие. Для повышения точности классификации (Медведева и др., 2019; Сирин и др., 2019;

Sirin et al., 2020) используются также данные за снежный период для лучшего разделения лесных и нелесных площадей (Маслов и др., 2016). Учитывая облачность, технические сбои и другие ограничения, для того чтобы покрыть все торфяники на уровне региона требуется использование съемки с разных аппаратов. Так, для оценки состояния торфяников Московской области (включая обводненные) на 2019 год были использованы данные Sentinel-2 и Landsat-8 (разные даты июня и августа), а для зимнего периода – данные Sentinel-2 (с конца ноября до середины декабря 2018 г.).



Рисунок 1. «Гидрофильная растительность» с рогозом, осокой, тростником и другими водно-болотными растениями (сверху), «водные поверхности» – открытые водоемы, образовавшиеся преимущественно после обводнения (снизу)

Figure 1. «Hydrophilic vegetation» with cattail, sedge, reeds, and other wetland plants (above), «water surfaces» – open water bodies formed mainly after rewetting (below)

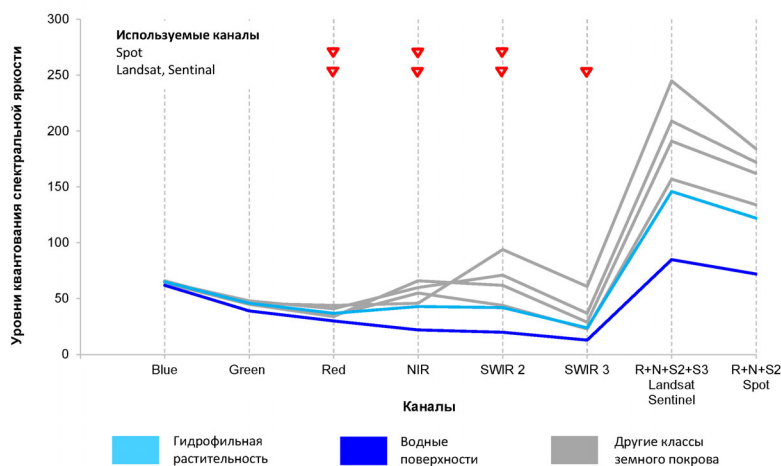


Рисунок 2. Средние значения спектральной яркости для классов, характеризующих «гидрофильную растительность» и «водные поверхности» на фоне других классов земного покрова

Показаны каналы, доступные от разных аппаратов

Figure 2. Average values of spectral brightness for classes characterizing «hydrophilic vegetation» and «water surfaces» against the background of other land cover classes
Channels available from different sensors are shown

Для проверки результатов классификации (Olofsson et al., 2014) в июне-сентябре 2017 г. было проведено наземное обследование 12 из 45 объектов обводнения общей площадью 39014 га (Sirin et al., 2020). Случайным образом было выбрано 54 участка средней площадью 150 м² с однородными типами покрова «гидрофильная растительность» и «водные поверхности», для которых были определены координаты, сделаны описания и фотографии. Общая длина автомобильных маршрутов составила около 2 тыс. км, пеших – около 25 км. Участки равномерно охватывали рассматриваемые типы покрова.

Результаты классификации были оценены с использованием полных матриц ошибок (Лабутина, 2004), в которых используется кросс-табуляция для установления соответствий между значениями одинаковых классов, полученными по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и на земле (табл. 1). Серым цветом отмечена главная диагональ матрицы, где классы совпадают (правильная классификация), а расположенные вне ее диагональные элементы, где классы не совпадают, отражают ошибки классификации (Матрица ошибок..., 2010). Сумма значений диагональных элементов (серый цвет) показывает общее количество правильно классифицированных участков, а отношение этого количества к общему числу участков, считается общей точностью классификации, выражаемой в процентах.

Точность производителя (или надежность спутниковых данных) – это условная вероятность совпадения классификации двумя методами в предположении достоверности наземных данных. Эту вероятность можно оценить, разделив диагональный элемент матрицы на общее количество элементов класса, идентифицированных по наземным данным. Точность пользователя (или надежность наземных данных) – аналогичная вероятность, вычисленная в предположении достоверности спутниковых данных, которая показывает пользователю классификации насколько вероятно, что данный класс совпадает с результатами классификации.

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

Table 1. Full error matrices and accuracy of classification results relative to ground data

Спутниковые данные/ наземные данные	Гидрофильная растительность	Водные поверхности	Σ	Точность пользователя	Точность производителя	Общая точность
Гидрофильная растительность	26	1	27	96.3	100	
Водные поверхности	0	27	27	100.0	96.4	
Σ	26	28	54			98.15

Коэффициенты эмиссии для обводненных объектов

На данном этапе были использованы коэффициенты эмиссии/поглощения ПГ (средние за год удельные потоки), установленные МГЭИК по умолчанию (default factors), что соответствует требованиям 1 уровня сложности (Tier 1).

Положение территории Московской области относительно климатических зон МГЭИК было определено согласно Приложению 3А.5.1 (стр. 3.38, IPCC, 2006) и его уточненной версии (Приложение 3А.5.1 на стр. 3.47, IPCC, 2019) и соответствует умеренному климату («Cool temperate moist»).

Для площадей с гидрофильной растительностью предложено использовать значения коэффициентов эмиссии (КЭ) CO_2 , CH_4 , N_2O и выноса растворенного углерода (dissolved organic carbon – DOC), данные в Дополнении МГЭИК (IPCC, 2014) для увлажненных органогенных почв («rewetted organic soils») (табл. 1). Эти почвы могут разделяться по богатству (трофности) на «богатые» («rich») и «бедные» («poor») (IPCC, 2014) согласно ключевому критерию – электропроводности почвенной влаги, которая в «бедных» торфяных почвах составляет $40\text{--}50 \mu\text{S cm}^{-1}$ и менее, а в «богатых» – от $50 \mu\text{S cm}^{-1}$ и более (Rydin, Jeglum, 2006). При недостатке информации по объектам обводнения и, с учетом имеющихся данных по изученным (Суворов и др., 2015) было предложено условно отнести все рассматриваемые обводненные площади в Московской области к «богатым» торфяным почвам («rich organic soils»).

Таблица 2. Коэффициенты эмиссии для обводненных торфяников (IPCC, 2014 с дополнениями)

Table 2. Emission factors for rewetted peatlands (IPCC, 2014 with amendments)

Агент	Единицы	Среднее значение (95% доверительный интервал)	Источник данных
Обводненные органогенные почвы «rewetted organic soils» (IPCC, 2014)			
CO_2	$\text{тCO}_2\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	0.50 (-0.71–1.71) Temperate rich	IPCC 2014, стр. 3.12, табл. 3.1
DOC		0.24 (0.14–0.36) Temperate	IPCC 2014, стр. 3.14, табл. 3.2
$\text{CH}_4 \text{ ОП}^{1)}$	$\text{кгCH}_4\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	216 (0–856) Temperate rich	IPCC 2014, стр. 3.18, табл. 3.3
$\text{CH}_4 \text{ КН}^{1)}$		2162)	–
N_2O	$\text{кгN}_2\text{O-N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	Незначительная («negligible»)	IPCC 2014, стр. 3.19
Затопленные земли «flooded lands» (IPCC, 2019)			
CO_2	$\text{тCO}_2\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	1.02 (1.00–1.04) Cool temperate	IPCC 2019, стр. 7.23, табл. 7.13
DOC		0 ³⁾	–
$\text{CH}_4 \text{ ОП}^{1)}$	$\text{кгCH}_4 \text{ га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	84.7 (78.8–90.6) Cool temperate	IPCC 2019, стр. 7.26, табл. 7.15
$\text{CH}_4 \text{ КН}^{1)}$		84.7 ²⁾	–
N_2O	$\text{кгN}_2\text{O-N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	0 ⁴⁾	IPCC 2019, стр. 7.24

Примечания: ¹⁾ эмиссия CH_4 с основной поверхности ($\text{CH}_4 \text{ ОП}$) и канала ($\text{CH}_4 \text{ КН}$);
²⁾ эмиссия CH_4 из каналов принята равной эмиссии с основной площади, занятой «гидрофильной растительностью» или «водной поверхностью», соответственно.
³⁾ – вынос DOC принят «нулевым» согласно допущению об отсутствии стока с обводненных площадей (технологические сбросы не учитываются);
⁴⁾ – эмиссия N_2O принята «нулевой», как определяемая окружающими управляемыми землями (IPCC, 2014).

Для «водных поверхностей» было предложено использовать КЭ для затопленных земель («flooded lands») (табл. 2), данные в Уточнении 2019 года к Руководящим принципам МГЭИК 2006 года по национальным инвентаризациям парниковых газов (IPCC, 2019б).

Коэффициенты эмиссии для исходных объектов

На данном этапе оценки принято допущение о том, что обводненные торфяники, характеризующиеся после обводнения развитием гидрофильной растительности и наличием водных поверхностей, ранее были преимущественно неиспользуемыми участками торфодобычи. Во-первых, по ретроспективным (до обводнения) данным ДЗЗ, на большинстве таких объектов зафиксированы участки открытого торфа, которые могут свидетельствовать, что здесь ранее велась добыча торфа. При осушении для сельского хозяйства они выявляются редко, исключение – пропашные культуры на определенных временных интервалах. Во-вторых, формирование гидрофильной растительности и водных поверхностей свидетельствует о том, что проектирование обводнения было направлено именно на восстановление водно-болотных угодий, что могло происходить именно в случае бывших торфоразработок. Противопожарное обводнение неиспользуемых торфяников, осушенных ранее для сельского хозяйства, проводится преимущественно путем регулирования водного режима для сохранения возможности возвращения таких площадей в сельскохозяйственный оборот, так как пользователи и собственники сельскохозяйственных земель пока не заинтересованы в создании водно-болотных угодий. В-третьих, использование КЭ для торфодобычи («peatland managed for extraction») в качестве «нулевой отметки» для оценки изменения выбросов ПГ в результате обводнения является консервативным вариантом, так как эмиссия ПГ с торфодобычи в целом ниже, чем с торфяников, осушенных для сельского хозяйства – «grasslands» и «croplands» (IPCC, 2014). Поэтому на данном этапе для торфяников до обводнения было предложено использовать КЭ ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O и выноса DOC) из Дополнения МГЭИК (IPCC, 2014) для «торфяников, используемых для торфодобычи» (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты эмиссии по умолчанию для торфоразработок (IPCC, 2014)

Table 3. Default emission factors for peat extraction (IPCC, 2014)

Агент	Единицы	Среднее значение (95% доверительный интервал)	Источник данных
CO_2	$\text{т CO}_2\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	2.8 (1.1–4.2) Temperate rich	IPCC 2014, стр. 2.14, табл. 2.1
DOC		0.31 (0.19–0.46) Temperate	IPCC 2014, стр. 2.20, табл. 2.2
CH_4 ОП	$\text{кг CH}_4\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	6.1 (1.6–11) Temperate	IPCC 2014, стр. 2.26, табл. 2.3
CH_4 КН		542 (102–981) Boreal and Temperate	IPCC 2014, стр. 2.30, табл. 2.4
N_2O	$\text{кг N}_2\text{O-N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	0.3 (–0.03–0.64) Boreal and Temperate	IPCC 2014, стр. 2.34, табл. 2.5

Примечание. CH_4 ОП и CH_4 КН – эмиссия CH_4 с основной поверхности и канала.

Изменение эмиссии после обводнения

На основе значений КЭ для CO₂, CH₄, N₂O и выноса DOC, рассмотренных выше, были рассчитаны их изменения для категории «обводненные органо-генные почвы»:

$$\Delta EF_{ros,i} = EF_{pe,i} - EF_{ros,i},$$

где $\Delta EF_{ros,i}$ – изменение КЭ для категории земель «обводненные органо-генные почвы», $EF_{pe,i}$ – КЭ для категории «торфоразработки», $EF_{ros,i}$ – КЭ для категории «обводненные органогенные почвы», соответственно для CO₂, CH₄, N₂O и выноса DOC (*i*). Аналогичным образом были рассчитаны изменения значений КЭ для категории «затопленные земли»:

$$\Delta EF_{fl,i} = EF_{pe,i} - EF_{fl,i},$$

где $\Delta EF_{fl,i}$ – изменение КЭ для категории «затопленные земли», $EF_{pe,i}$ – КЭ для категории «торфоразработки», $EF_{fl,i}$ – КЭ для категории «затопленные земли», соответственно для CO₂, CH₄, N₂O и выноса DOC. В обоих случаях при расчете использовались средние значения КЭ (табл. 2). Изменение эмиссии ПГ для всей площади торфяников, которая предположительно считается обводненной («гидрофильная растительность» и «водные поверхности»), рассчитывается согласно:

$$\Delta E = \sum S_{ip} \cdot \Delta EF_{ros,i} + \sum S_{fl} \cdot \Delta EF_{fl,i},$$

где ΔE – изменение эмиссии после обводнения всех рассматриваемых ПГ, включая DOC, S_{ip} – площадь, занятая «гидрофильной растительностью», $\Delta EF_{ros,i}$ – изменение для категории земель «обводненные органогенные почвы» КЭ для CO₂, CH₄, N₂O и выноса DOC, S_{fl} – площадь, занятая «водными поверхностями», $\Delta EF_{fl,i}$ – изменение КЭ для категории земель «затопленные земли» КЭ для CO₂, CH₄, N₂O и выноса DOC.

При расчете эмиссии CH₄ из осушительных каналов (CH₄ КН) было использовано предлагаемое МГЭИК (IPCC, 2014, стр. 2.26, табл. 2.3) и соответствующее нашим оценкам (Чистотин и др., 2006) значение доли площади, занятой дренажной сетью, равное 5%. После обводнения эмиссия метана с площади, ранее занятой дренажной сетью, была принята такой же, как и с основной поверхности (216 и 84.7 кг CH₄ га⁻¹ год⁻¹ для категорий «rewetted organic soils» и «flooded lands» соотв. – табл. 2), а эмиссия N₂O принята «нулевой», как определяемая окружающими управляемыми землями (IPCC, 2014). Итоговый расчет изменения эмиссии парниковых газов с площадей, относимых к обводненным торфяникам, был приведен в 10³ т CO₂-экв год⁻¹ с учетом 100-летних потенциалов глобального потепления CO₂ = 1, CH₄ = 25, N₂O = 298.

Оценка неопределенности

Оценка неопределенностей выполнена в соответствии с рекомендациями МГЭИК (IPCC, 2000) и с учётом больших асимметричных неопределённостей КЭ. На данном этапе было принято допущение о треугольном распре-

лении исходных величин. Для расчета неопределенностей был использован метод распространения ошибки (приближение распределения результата нормальным законом), что, видимо, допустимо с учетом предварительного характера проводимой оценки. Последовательно были выполнены расчеты неопределенности: разности КЭ для категорий земель после («обводненные органогенные почвы» и «затопленные земли») и до («торфоразработки») обводнения (табл. 4), произведения разности КЭ и площадей (ошибка определения последних принята за 2%, табл. 2), суммы выбросов отдельно для категорий «обводненные органогенные почвы» и «затопленные земли», суммы для категорий «обводненные органогенные почвы» и «затопленные земли» для каждого агента (ПГ и DOC), итоговой суммы выбросов ПГ.

Результаты и обсуждение

Обводнение в Московской области проводилось с осени 2010 по конец 2013 года. В 2014 году созданные и реконструированные гидротехнические сооружения, обеспечивающие обводнение пожароопасных торфяников, были переданы для обслуживания специализированной организации Московской области МОС АВС (Информационный..., 2018). Работы по обводнению пожароопасных торфяников могли проводиться на разных торфяных массивах в несколько этапов, в некоторых случаях с перерывом. Вторичное обводнение для восстановления водно-болотных угодий охватывало лишь отдельные площади. На большей части создавалась или восстанавливалась инфраструктура для двустороннего регулирования водного режима с целью сохранения возможности возвращения земель, прежде всего в сельскохозяйственный оборот. Эти мероприятия обеспечили эффективную противопожарную защиту осушенных торфяников. Результаты проводимого мониторинга показали существенное снижение числа и площади торфяных пожаров на обводненных объектах в пожароопасные периоды и после 2010 года (Sirin et al., 2020), а также динамики торфяных пожаров в соседних областях. Это обеспечило устойчивое, без воздействий повторных пожаров, постпирогенное восстановление растительности, прежде всего лесной (хвойной и лиственной) на торфяных гаях, а также ее рост на прилегающих, не затронутых торфяными пожарами площадях.

Все перечисленное оказывает влияние на баланс ПГ на всей территории объектов обводнения. Однако только площади, обводненные «окончательно» для восстановления водно-болотных угодий, могут рассматриваться, на наш взгляд, как изменившие исходную категорию земель, выделяемую согласно МГЭИК (IPCC, 2014) для учета ПГ. Это участки, идентифицируемые «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями». Согласно данным мониторинга, их площади составили для объектов Московской области на 2019 год 5308 и 3618 га или 7 и 5% от общей площади обводнения, соответственно (табл. 4). При мониторинге и последующей оценке не учитывались небольшие по площади ($n \times 1 - n \times 10$ га) участки обводнения, созданные ранее в рамках различных инициатив.

Таблица 4. Площади, относимые к обводненным торфяникам в Московской области – «гидрофильная растительность» и «водные поверхности», соответствующие категориям «rewetted organic soils» и «flooded lands» (IPCC, 2014)

Table 4. Areas classified as rewetted peatlands in the Moscow Oblast – «hydrophilic vegetation» and «water surfaces» corresponding to «rewetted organic soils» and «flooded lands» (IPCC, 2014)

Регион	Обводненные торфяники (га)	В том числе (га)	
		Гидрофильная растительность	Водные поверхности
Московская область	8926	5308	3618

На примере участка обводнения (рис. 3), где задержание стока воды начало проводиться сразу после пожаров осенью 2010 года и было усилено интенсивными дождями, изменения происходят со временем, по мере аккумуляции дождевых осадков и, что более существенно, талых вод. Гидрофильная растительность формируется постепенно, и в первое время такие участки, видимо, просто сильно увлажнены. Участки, занятые водой, могут в дальнейшем зарастать гидрофильной и, вероятно, водной растительностью, имеющей близкие спектральные характеристики. На фоне этого общего тренда соотношение между двумя типами покрова – «гидрофильная растительность» и «водные поверхности» – может варьировать в зависимости от погодных условий, предшествующих времени проведения космической съемки. Анализ показал, что площадь «водных поверхностей» увеличивается в пределах 1% при увеличении суммы осадков за 30-дневный период, предшествующий дате проведения съемки (Sirin et al., 2020).

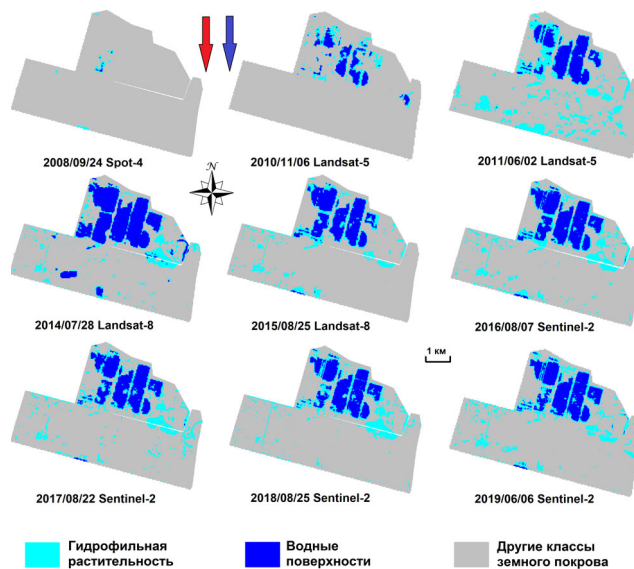


Рисунок 3. Изменение площадей, занятых «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями» до и после обводнения, на примере части массива Радовицкий Мох (1534.8 га), Московская область

Figure 3. Changes in the areas occupied by «hydrophilic vegetation» and «water surfaces», before and after rewetting, on the example of part of the Radovitsky Mokh peatland (1534.8 ha), Moscow Oblast

Для последующих расчетов были получены изменения коэффициентов эмиссии ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O) и выноса DOC после обводнения с учетом принятого ранее допущения, что все площади, рассматриваемые как обводненные, были представлены ранее торфоразработками. Для площадей, занятых «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями», была использована разница между КЭ, предложенными МГЭИК (IPCC, 2014) для «торфоразработок», и «обводненных органогенных почв» или «затопленных земель» соответственно (табл. 5).

Таблица 5. Изменение коэффициентов эмиссии для торфоразработок после обводнения и перехода в другие категории земель согласно (IPCC, 2014)

Table 5. Changes of emission factors for peat extraction after rewetting and conversion to other land categories according to (IPCC, 2014)

Агент	Единицы	Изменение: среднее значение (95% доверительный интервал)
Обводненные органогенные почвы «rewetted organic soils» (IPCC, 2014)		
CO_2	т $\text{CO}_2\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	-2.3 (-4.4...-0.4)
DOC		-0.07 (-0.25...0.11)
CH_4 ОП	кг $\text{CH}_4\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	210 (1...434)
CH_4 КН		-457(-837...172)
N_2O	кг $\text{N}_2\text{O-N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	-0.3 (-0.64...0.03)
Затопленные земли «flooded lands» (IPCC, 2019)		
CO_2	т $\text{CO}_2\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	-1.78 (-3.43...-0.41)
DOC		-0.31 (-0.50...0.15)
CH_4 ОП	кг $\text{CH}_4\text{-C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	78.6 (70.7...86.2)
CH_4 КН		-457.3 (-887.2...-27.4)
N_2O	кг $\text{N}_2\text{O-N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$	-0.3 (-0.64...0.03)

Примечание. CH_4 ОП и CH_4 КН – эмиссия CH_4 с основной поверхности и канала

Далее были рассчитаны изменения эмиссии ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O) и выноса DOC для всех площадей Московской области, которые могут рассматриваться как обводненные (табл. 6).

Основное сокращение выбросов ПГ произошло за счет CO_2 . Большой вклад внесли участки, занятые «гидрофильной растительностью», не только за счет большей площади, но и большего изменения КЭ. В отличие от «водных поверхностей» здесь активно идет фотосинтез, а часть образующегося органического вещества впоследствии может отлагаться в виде торфа. Можно предположить дальнейшее сокращение эмиссии CO_2 как за счет усиления увлажнения территории, так и в результате зарастания затопленных участков.

Наибольшее сокращение выноса DOC характерно для затопленных участков, что логично по причине почти полного прекращения стока с этих площадей. Возросла эмиссия CH_4 , которая происходит и из осушенных торфяных почв, но только периодически, при поступлении влаги, и в незначительных объемах (Суворов и др., 2010, Чистотин и др., 2016). Наиболее значительно возросла эмиссия CH_4 на участках с гидрофильной растительностью, где

осоки и другие растения с аэренхимой способствуют выходу метана из глубоких слоев торфа, минуя метанотрофный фильтр. Сократилась эмиссия CH_4 за счет затопления каналов, что, на наш взгляд, обоснованно. Эмиссия метана из осушительных каналов усиливается движением воды и, соответственно, турбулентным перемешиванием (Сирин и др., 2012). После обводнения сток замедляется или прекращается, видимо, сокращается поступление в каналы свежей органики, необходимой для метаногенеза, а также латеральный принос растворенного и газообразного метана. Незначительный вклад в снижение эмиссии ПГ внес N_2O .

Таблица 6. Изменение эмиссии для площадей, относимых к обводненным торфяникам на примере Московской области (среднее значение и 95% доверительный интервал)

Table 6. Changes of emissions for areas attributed to rewetted peatlands on example of Moscow Oblast (mean value and 95% confidence interval)

Агент	Единицы	Гидрофильная растительность	Водные поверхности	Всего	Итого, $10^3 \text{ тCO}_2\text{-экв год}^{-1}$
CO_2	$10^3 \text{ т CO}_2 \text{ год}^{-1}$	-44.8 (-85.4...-8.1)	-23.6 (-45.1...-5.7)	-68.4 (-110.0...-20.9)	-68.4 (-110.0...-20.9)
DOC	$10^3 \text{ т CO}_2 \text{ год}^{-1}$	-1.4 (-4.7...2.1)	-4.1 (-5.9...1.7)	-5.5 (-12.4...-1.8)	-5.5 (-12.4...-1.8)
CH_4 ОП	$10^3 \text{ т CH}_4 \text{ год}^{-1}$	1.4 (0...2.9)	0.4 (0.3...0.4)	1.8 (0.4...3.3)	44.3 (8.5...78.9)
CH_4 КН	$10^3 \text{ т CH}_4 \text{ год}^{-1}$	-0.1 (-0.2...0)	-0.1 (-0.2...0)	-0.2 (-0.3...0)	-5.6 (-7.0...-0.5)
N_2O	$\text{т N}_2\text{O-N год}^{-1}$	-1.6 (-4.8...-1.3)	-1.1 (-1.3...1.1)	-2.7 (-4.6...0)	-1.3 (-2.2...0)
Итого	$10^3 \text{ т CO}_2\text{-экв год}^{-1}$	-36.6 (-97.6...20.1)			

Примечание. Все значения приведены с округлением до десятичного знака. Расчет регионального потока закиси азота в $\text{т CO}_2\text{-экв год}^{-1}$ («итого по региону») производится в два этапа: 1) $-2678 \text{ кг N}_2\text{O-N год}^{-1} \approx -4208 \text{ кг N}_2\text{O год}^{-1}$;
2) $-4208 \text{ кг N}_2\text{O год}^{-1} \cdot 298 \approx -1254 \text{ т CO}_2\text{-экв год}^{-1}$.

Увеличение эмиссии CH_4 существенно сократило общее снижение выбросов ПГ после обводнения. Однако необходимо учитывать, что CH_4 , как короткоживущий в атмосфере ПГ, не может перекрыть долговременный эффект от снижения эмиссии CO_2 (Günther et al., 2020). Кроме этого, эмиссия CH_4 снижается по прошествии времени после обводнения и по мере сокращения легкодоступной органики для метаногенеза. Даже с учетом роста выделения CH_4 общий эффект сокращения эмиссии ПГ в результате обводнения оказался существенным – более 36 тыс. $\text{тCO}_2\text{-экв год}^{-1}$. С учетом долговременного и поступательного действия обводнения этот эффект будет с каждым годом не только суммироваться, но и расти за счет расширения площадей, занятых «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями».

Рассмотренный подход может быть использован и для оценки снижения выбросов ПГ в результате вторичного обводнения и для конкретных отдельно взятых объектов. Например, для участка торфяного массива Радовицкий Мох площадью 1534.8 га (рис. 3) площадь, занятая «гидрофильной растительно-

стью» и «водными поверхностями», составила на 2019 год 177 и 186 га, соответственно, а общее снижение выбросов ПГ более 1.6 тыс. т CO₂-экв год⁻¹.

Полученные предлагаемым подходом оценки максимально консервативны. После подготовки Дополнения к Руководству МГЭИК 2006 по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) была проведена актуализация и частичная корректировка рекомендуемых оценок (Wilson et al., 2016). Переход на 2 уровень сложности с использованием специфичных для региона КЭ, основанных на данных натурных измерений, может внести дополнительные коррективы. Кроме этого, сам предложенный подход по определению обводненных площадей и последующей оценки сокращения выбросов ПГ не учитывает многих дополнительных последствий. В первую очередь, это касается сокращения или даже устранения выбросов путем предотвращения торфяных пожаров. Не учитывается эффект роста древесной растительности на других площадях объектов обводнения в условиях отсутствия последующих пожаров. Наконец, приняты допущения, что обводненные площади были ранее торфоразработками, у которых коэффициенты эмиссии меньше по сравнению с сельскохозяйственными землями – сенокосами/пастбищами («grasslands») и пропапными культурами («croplands»). Учет всех или части указанных аспектов может позволить более точно оценить эффект вторичного обводнения осушенных торфяников в отношении сокращения выбросов ПГ и, вероятнее всего, в лучшую сторону.

Заключение

Вторично обводненные торфяники – объект национальной отчетности о кадастре антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, однако статистический учет таких земель не проводится. Представленный подход к определению площадей вторично обводненных торфяников основан на методике мониторинга состояния пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения по мультиспектральным спутниковым данным, которая была апробирована, опубликована в научных журналах и, соответственно, верифицирована согласно МГЭИК. Нами предложено относить к обводненным площадям участки с гидрофильной растительностью, а также покрытые водой. На данном этапе было сделано допущение, что обводненные участки были ранее преимущественно неиспользуемыми торфоразработками и при учете в кадастре их площади сокращают площади торфоразработок. Этот подход был использован в Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2019 гг. Для Московской области обводненные площади, которые могут рассматриваться как водно-болотные угодья, составили на этот момент 8.9 тыс. га.

Такие 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 зато-

пленные земли («flooded lands»). Соответственно, к ним могут быть применены рекомендуемые МГЭИК для уровня сложности 1 (Tier 1) коэффициенты эмиссии диоксида углерода, метана, закиси азота и выноса растворенного углерода. При допущении об исходной принадлежности обводненных участков к торфоразработкам расчеты показали общее сокращение выбросов ПГ для объектов обводнения в Московской области на 2019 год более 36 тыс. т CO_2 -экв год^{-1} , даже несмотря на существенное увеличение эмиссии метана. Представленный подход может быть использован и для оценки снижения выбросов ПГ в результате вторичного обводнения конкретных отдельно взятых объектов.

Оценки являются консервативными. Они не учитывают эффект обводнения для всей площади объектов обводнения, включая постпирогенное восстановление преимущественно лесной растительности. Не учитывается сокращение выбросов парниковых газов в результате предотвращения торфяных пожаров, которые могут быть очень значительными. Учет этих аспектов, а также переход на региональные, определенные по данным измерений потоков CO_2 , CH_4 , N_2O и выноса DOC коэффициенты эмиссии, могут в перспективе существенно уточнить методику и результаты расчетов.

Обводнение неиспользуемых осушенных торфяников помимо решения задач по предотвращению торфяных пожаров, повышению экологической безопасности и восстановлению многих критически важных для человека экосистемных услуг болот является эффективным путем сокращения выбросов парниковых газов в части землепользования, сельского и лесного хозяйства. По мере сокращения выбросов в других секторах экономики значение выбросов парниковых газов, связанных с осушенными торфяниками, будет расти и может стать одним из ключевых для удержания глобального потепления ниже $+1.5...+2^\circ\text{C}$. Учитывая площади осушенных и особенно неиспользуемых торфяников в Российской Федерации, их обводнение представляет важный, но недооцененный потенциал для выполнения обязательств в рамках Парижского соглашения по климату и в части смягчения изменения климата, и в направлении адаптации. Предложенный подход является первым, но важным шагом по решению данной проблемы на уровне страны, регионов и конкретных проектов вторичного обводнения неиспользуемых торфяников и восстановления водно-болотных угодий.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда 19-74-20185 и проектов Международной климатической инициативы Федерального министерства окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германии в рамках российско-германского сотрудничества: проект «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата», управляемый через немецкий банк развития KfW и проект «Разработка методических основ для включения проектов по осушению-обводнению

торфяников в национальную климатическую отчетность Российской Федерации» управляемый GIZ.

Авторы благодарны В.Ю. Иткину (каф. ПМиКМ, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина), разработавшему макрос для расчёта неопределённостей, который был использован в работе.

Список литературы

Болота (2017) В кн.: *Экологический атлас России* Н.С. Касимов, В.С. Тикунов. (ред.), М., Феория, с. 118-121.

Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.12.2020) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2021).

Вомперский, С.Э., Сирин, А.А., Сальников, А.А., Цыганова, О.П., Валяева, Н.А. (2011) Оценка площади болотных и заболоченных лесов России, *Лесоведение*, № 5, с. 3-11.

Вомперский, С.Э., Сирин, А.А., Цыганова, О.П., Валяева, Н.А., Майков, Д.А. (2005) Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия, *Известия РАН. Серия географическая*, № 5, с. 39-50.

Глухова, Т.В., Сирин, А.А. (2018) Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте, *Почвоведение*, № 5, с. 580-588. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>.

Информационный выпуск «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2017 году». (2018), Красногорск, Министерство экологии и природопользования Московской области. Обводнение пожароопасных торфяников, с. 97-99.

Лабутина, И.А. (2004) *Дешифрирование аэрокосмических снимков*, Учеб. пособие для студентов вузов, М., Аспект Пресс, 184 с.

Маслов, А.А., Гульбе, А.Я., Гульбе, Я.И., Медведева, М.А., Сирин, А.А. (2016) Оценка ситуации с зарастанием сельскохозяйственных земель лесной растительностью на примере Угличского района Ярославской области, *Устойчивое лесопользование*, № 4, с. 6-14.

Матрица ошибок и расчет показателей точности тематических карт. (2010) <http://gis-lab.info/qa/error-matrix.html>.

Медведева, М.А., Возбранная, А.Е., Барталев, С.А., Сирин, А.А. (2011) Оценка состояния заброшенных торфоразработок по многоспектральным спутниковым изображениям, *Исследование Земли из космоса*, № 5, с. 80-88.

Медведева, М.А., Возбранная, А.Е., Сирин, А.А., Маслов, А.А. (2017) Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфоразработок, *Исследование Земли из космоса*, № 3, с. 76-84. doi: <https://doi.org/10.7868/S0205961417020051>.

Медведева, М.А., Возбранная, А.Е., Сирин, А.А., Маслов, А.А. (2019) Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, № 16(2), с. 150-159. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.

Минаева, Т.Ю., Сирин, А.А. (2011). Биологическое разнообразие болот и изменение климата, *Успехи современной биологии*, т. 131, № 4, с. 393-406.

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2019 гг. Часть 2. Приложения. Приложение 3.4 – Справка об обводненных торфяниках Российской Федерации. (2021) М., с. 71-79. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>.

Перспективное использование выработанных торфяных болот. (2013) / под. ред. В.В. Панова, Тверь, «Триада», 280 с.

Романовская, А.А., Коротков, В.Н., Смирнов, Н.С., Карабань, Р.Т., Трунов, А.А. (2014). Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России в течение 2000-2011 гг., *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 5-18.

Семенов, С.М., Гладильщикова, А.А., Дмитриева, Т.М. (2019) Антропогенные нарушения взаимодействия суши и атмосферы: оценки МГЭИК, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 5-27. doi: 10.21513/2410-8758-2019-3-05-31.

Сирин, А.А., Минаева, Т.Ю., Возбранная, А.Е., Барталев, С.А. (2011) Как избежать торфяных пожаров? *Наука в России*, № 2, с. 13-21.

Сирин, А.А., Суворов, Г.Г., Чистотин, М.В., Глаголев, М.В. (2012) О значениях эмиссии метана из осушительных каналов, *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*, т. 3, № 2, (6), с. 1-10.

Сирин, А.А., Маслов, А.А., Валяева, Н.А., Цыганова, О.П., Глухова, Т.В. (2014) Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения, *Лесоведение*, № 5, с. 65-71.

Сирин, А.А., Медведева, М.А., Макаров, Д.А., Маслов, А.А. Юстен, Х. (2019) Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области, *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*, т. 65, № 2, с. 321-334. URL: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>.

Сирин, А.А., Макаров, Д.А., Гуммерт, И., Маслов, А.А., Гульбе, Я.И. (2020) Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре, *Лесоведение*, № 5, с. 410-422. <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>.

Суворов Г.Г., Чистотин, М.В., Сирин, А.А. (2010). Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы, *Агрохимия*, № 12, с. 37-45.

Суворов, Г.Г., Чистотин, М.В., Сирин, А.А. (2015) Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области, *Агрохимия*, № 11, с. 51-62.

Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации. (2001) / под ред. Сирина А.А., Минаевой Т.Ю., М., ГЕОС, 190 с.

Чистотин, М.В., Сирин, А.А., Дулов, Л.Е. (2006) Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования, *Агрохимия*, № 6, с. 54-62.

Чистотин, М.В., Суворов, Г.Г., Сирин, А.А. (2016). Динамика эмиссии метана из осушенной торфяной почвы в зависимости от растительности и режима увлажнения: Результаты вегетационного опыта, *Агрохимия*, № 12, с. 20-33.

A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe. (2009) /T. Minayeva, A. Sirin, O. Bragg (eds), Wageningen, Wetlands International, 132 p.

Ahmad, S., Haojie, L., Günther, A., Couwenberg, J., Lennartz, B. (2020) Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function, *Science of the Total Environment*, vol. 749, no. 20, pp. 141571. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>.

Bonn, A., Reed, M., Bain, C., Chris, D.E., Joosten, H., Farmer, J., Emmer, I., Couwenberg, J., Moxey, A., Artz, R., Tanneberger, F., von Unger, M., Smyth, M-A., Birnie, D. (2014) Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration, *Ecosystem Services*, no. 9, pp. 54-65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>.

Briefing Paper on the role of peatlands in the new European Union's Common Agriculture Policy (CAP) (2019), *Greifswald Mire Centre, Germany*.

Granath, G., Moore, P.A., Lukenbach, M.C., Waddington, J.M. (2016) Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration, *Sci. Rep.* 6, 28498:1–28498:9, doi:10.1038/srep28498.

Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebsch, F., Couwenberg, J. (2020) Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions, *Nature Communications*, no. 11, 1644. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>.

Huang, X., Rein, G. (2017). Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply, *International Journal of Wildland Fire*, 26, 907-918, doi.org/10.1071/WF16198.

IPCC (2000) *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. J Penman, D Kruger, I Galbally, T Hiraishi, B Nyenzi, S Emmanul, L Buendia, R Hoppaus, T Martinsen, J Meijer, K Miwa and K Tanabe (Eds). IGES, Japan. <https://www.ipcc.ch/publication/good->

practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Program* / H.S. Eggleston, L., Buendia, K., Miwa, T., Ngara, K., Tanabe (eds). Volume 4. Agriculture, forestry and other land use. Chapter 7. Wetlands /Blain, D., Row, C., Alm, J., Byrne, K., Parish, F., Duchemin, É., Huttunen, J.T., Tremblay, A., Delmas, R., Menezes, C.F.S., Delmas, R., Minayeva, T., Pinguelli, Rosa L.P., Sirin, A. – IGES, Japan, 24 p.

IPCC (2014) *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands* /T. Hiraishi, T., Krug, K., Tanabe, N., Srivastava, J., Baasansuren, M., Fukuda, T.G., Troxler (eds). Chapter 3. Rewetted organic soils /Blain, D., Murdiyarso, D., Couwenberg, J., Nagata, O., Renou-Wilson, F., Sirin, A., Strack, M., Tuittila, E-S., Wilson, D., Evans, C.D., Fukuda, M., Parish, F., Leifeld, J., Sanz-Sánchez, M.J. – IPCC, Switzerland, 41 p.

IPCC (2019a) *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, V., Masson-Delmotte, H.-O., Pörtner, D.C., Roberts, P., Zhai, R., Slade, S., Connors, R., van Diemen, M., Ferrat, E., Haughey, S., Luz, S., Neogi, M., Pathak, J., Petzold, J., Portugal Pereira, P., Vyas, E., Huntley, K., Kissick, M., Belkacemi, J., Malley (eds.). URL: <https://www.ipcc.ch/srccl/>.

IPCC (2019b) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. /E. Calvo Buendia, K., Tanabe, A., Kranjc, J., Baasansuren, M., Fukuda, S., Ngarize, A., Osako, Y., Pyrozhenko, P., Shermanau, S., Federici (eds). – IPCC, Switzerland.

Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J., Smith, P. (2016) The role of peatlands in climate regulation. – In: A. Bonn, T. Allott, M. Evans, H. Joosten, R. Stoneman (eds.). *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 66-79. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>.

Joosten, H. (2010) The global peatland CO₂ picture, *Wetlands International, Wageningen, Netherlands*, 35 p. URL: <https://www.wetlands.org/publications/the-global-peatland-co2-picture/>.

Leifeld, J., Wüst-Galley, C., Page, S. (2019) Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100, *Nat. Clim. Change*, no. 9, pp. 945-947. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>.

Leifeld, J., Menichetti, L. (2018) The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies, *Nat. Commun.*, no. 9, pp. 1-8. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.

Minayeva, T.Y., Bragg, O.M., Sirin, A.A. (2017) Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity, *Mires and Peat*, no. 19, pp. 1-36. URL: <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>.

Minayeva, T., Sirin, A., Stracher, G.B. (2013) The Peat Fires of Russia. In: Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V.2: Photographs and Multimedia Tours; Stracher G.B., Prakash A., Sokol E.V. (eds.), Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 375-394, ISBN: 9780444594129.

Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E., Wulder, M.A. (2014) Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change, *Remote Sensing of Environment*, 148, pp. 42-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

Rydin, H., Jeglum, J.K. (2006) The biology of peatlands, *University Press*, England, Oxford, 162 p.

Sirin, A., Laine, J. (2008) Peatlands and greenhouse gases, Chapter 7. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., Stringer, L., editors. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report. Kuala Lumpur: *Global Environment Centre*; 2008. pp. 118-138. Joint publication with Wetlands International, Wageningen.

Sirin, A.A., Medvedeva, M.A., Makarov, D.A., Maslov, A.A., Joosten, H. (2020) 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), *Ecological Engineering*, vol. 158, pp. 106044. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>.

Sirin, A., Medvedeva, M., Maslov, A., Vozbrannaya, A. (2018) Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data, *Land*, vol. 7(71), pp. 1-22. URL: <https://doi.org/10.3390/land7020071>.

Sirin, A., Minayeva, T., Yurkovskaya, T., Kuznetsov, O., Smagin, V., Fedotov, Y.U. (2017) Russian Federation (European Part). – In: H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen (eds.). Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation, *Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart*, Germany, pp. 589-616. URL: <https://doi.org/10.1127/mireseurope/2017/0001-0049>.

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., Milanovic, D., Ganeva, A., Apostolova, I., Alegro, A., Delipetrou, P., Navratilová, 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., Saveljic, D., de Vries, F., Moen, A., Dembek, W., Mateus, J., Hanganu, J., Sirin, A., Markina, A., Napreenko, M., Lazarevič, P., Stanová, V.S., Skoberne, P., Perez, P.H., Pontevedra-Pombal, X., Lonnstad, J., Kuchler, M., Wust-Galley, C., Kirca, S., Mykytiuk, O., Lindsay, R., Joosten, H.

(2017). The peatland map of Europe, *Mires and Peat*, vol. 19, Article 22, pp. 1-17. URL: <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>.

Tubiello, FN, Biancalani, R, Salvatore, M, Rossi, S, Conchedda, G. (2016) A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils, *Sustainability*, no. 8, Article 371, pp. 1-13. URL: <https://doi.org/10.3390/su8040371>.

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. (2016) Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils, *Mires and Peat*, vol. 17, Article 04, pp. 1-28. doi: 10.19189/MaP.2016.OMB.222.

References

Bolota [Mires] (2017) In *Ekologicheskij atlas Rossii* [Ecological Atlas of Russia]. Ed. red. N.S. Kasimov, V.S. Tikunov, Feoriya, Moscow, Russian, pp. 118-121.

Vodnyj kodeks Rossijskoj Federacii [Water Code of the Russian Federation] 03.06.2006 № 74-FZ (red. ot 08.12.2020) (the law came into force 01.01.2021).

Vompersky, S.E., Sirin, A.A., Sal'nikov, A.A., Cyganova, O.P., Valyaeva, N.A. (2011) Ocenka ploshchadi bolotnyh i zabolochennyh lesov Rossii [Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia], *Lesovedenie*, no 5, pp. 3-11.

Vomperskij, S.E., Sirin, A.A., Cyganova, O.P., Valyaeva, N.A., Majkov, D.A. (2005) *Bolota i zabolochennye zemli Rossii: popytka analiza prostranstvennogo raspredeleniya i raznoobraziya* [Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, no 5, pp. 39-50.

Glukhova, T.V., Sirin, A.A. (2018) Poteri pochvennogo ugleroda pri pozhare na osushennom lesnom verkhovom bolote [Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog], *Eurasian Soil Science*, vol. 51(5), pp. 542-549. <https://doi.org/10.1134/S1064229318050034>.

Informacionnyj vypusk «O sostoyanii prirodnih resursov i okruzhayushchej sredy Moskovskoj oblasti v 2017 godu» [Information release «On the state of natural resources and the environment of the Moscow region in 2017»]. (2018), Krasnogorsk, Ministerstvo ekologii i prirodopol'zovaniya Moskovskoj oblasti. Obvodnenie pozharoopasnyh torfyanikov [Krasnogorsk, Ministry of Ecology and Nature Management of the Moscow Region. Watering of fire hazardous peatlands], pp. 97-99.

Labutina, I.A. (2004) *Deshifirovanie aerokosmicheskikh snimkov: Ucheb. posobie dlia studentov vuzov* [Interpretation of remote sensing images: A textbook for university students], Aspekt Press, Moscow, Russian, 184 p.

Maslov, A.A., Gul'be, A.Ya., Gul'be, Ya.I., Medvedeva, M.A., Sirin, A.A. (2016) Ocenka situacii s zarastaniem sel'skohozyajstvennyh zemel' lesnoj rasti-

tel'nost'yu na primere Uglichskogo rajona Yaroslavskoj oblasti [Assessment of the situation with the overgrowth of agricultural lands with forest vegetation on the example of the Uglich district of the Yaroslavl region], *Ustojchivoe lesopol'zovanie*, no. 4, pp. 6-14.

Medvedeva, M.A., Vozbrannaya, A.E., Bartalev, S.A., Sirin, A.A. (2011) Ocenka sostoyaniya zabroshennykh torforazrabotok po mnogospektral'nym sputnikovym izobrazheniyam [Multispectral remote sensing for assessing changes on abandoned peat extraction lands], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 5, pp. 80-88.

Medvedeva, M.A., Vozbrannaya, A.E., Sirin, A.A., Maslov, A.A. (2017) Vozmozhnosti razlichnykh mnogospektral'nykh sputnikovykh dannykh dlya otsenki sostoyaniya neispolzuyemykh pozharoopasnykh i obvodnyayemykh torforazrabotok [Capabilities of Multispectral Remote-Sensing Data in an Assessment of the Status of Abandoned Fire Hazardous and Rewetting Peat Extraction Lands], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 53, pp. 1070-1078. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090201>.

Medvedeva, M.A., Vozbrannaya, A.E., Sirin, A.A., Maslov, A.A. (2019) Vozmozhnosti razlichnykh mul'tispektral'nykh kosmicheskikh dannykh dlya monitoringa neispol'zuemykh pozharoopasnykh torfyanikov i effektivnosti ih obvodneniya [Potential of different multispectral satellite data for monitoring abandoned fire hazardous peatlands and rewetting effectiveness], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, no. 16(2), pp. 150-159. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159.

Minayeva, T.Y., Sirin, A.A. (2012) Biologicheskoye raznoobraziye bolot i izmeneniye klimata [Peatland biodiversity and climate change], *Biol. Bull. Rev.*, no. 2, pp. 164–175. doi:10.1134/s207908641202003x.

Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov ne reguliruemym Monreal'skim protokolom za 1990-2019 gg. Chast' 2. Prilozheniya. Prilozhenie 3.4 Spravka ob obvodnennykh torfyanikah Rossijskoj Federacii [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990-2019. Part 2. Applications. Appendix 3.4 Information on the watered peatlands of the Russian Federation] (2021) Moscow, Russian, pp. 71-79. <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>.

Perspektivnoe ispol'zovanie vyrabotannykh torfyanykh bolot [Perspective use of depleted peat bogs] (2013) /V.V., Panov (ed.), Tver', «Triada», Russian, 280 p.

Romanovskaya, A.A., Korotkov, V.N., Smirnov, N.S., Karaban', R.T., Trunov, A.A. (2014) Ocenka vklada zemlepol'zovaniya v antropogennuyu emissiyu parnikovyh gazov na territorii Rossii v techenie 2000-2011 gg [Assessment of the contribution of land use to anthropogenic greenhouse gas emissions in Russia during 2000-2011], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 5-18.

Semenov, S.M., Gladil'shchikova, A.A., Dmitrieva, T.M. (2019) Antropogen-

nye narusheniya vzaimodejstviya sushy i atmosfery: ocenki MGEIK [Anthropogenic disturbances of the land-atmosphere interactions: IPCC assessments], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 3, pp. 5-27. doi: 1021513/2410-8758-2019-3-05-31.

Sirin, A., Minayeva, T., Vozbrannaya, A., Bartalev, S. (2011) Kak izbezhat' torfyanykh pozharov? [How to avoid peat fires?], *Science in Russia*, 2, 13-21.

Sirin, A.A., Suvorov, G.G., Chistotin, M.V., Glagolev, M.V. (2012) O znacheniyah emissii metana iz osushitel'nykh kanalov [Values of methane emission from drainage ditches], *Dinamika okruzhayushchej sredy i global'nye izmeneniya klimata*, vol. 3, no 2, (6), pp. 1-10.

Sirin, A.A., Maslov, A.A., Valyaeva, T.A., Tsyganova, O.P., Glukhova, T.V. (2014) Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения [Mapping of Peatlands in the Moscow Oblast Based on High Resolution Remote Sensing Data], *Contemporary Problems of Ecology*, vol. 7, no 7, pp. 809-815. doi: 10.1134/S1995425514070117.

Sirin, A.A., Medvedeva, M.A., Makarov, D.A., Maslov, A.A. Joosten, H. (2019) Monitoring rastitel'nogo pokrova vtorichno obvodnennykh torfyanikov Moskovskoj oblasti [Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast], *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*, vol. 65, no. 2, pp. 321-334. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>.

Sirin, A.A., Makarov, D.A., Maslov, A.A., Gummert, I., Gul'be, Ya.I. (2020) Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare [Depth of peat burning and carbon loss during an underground forest fire], *Contemporary Problems of Ecology*, vol. 13, pp. 769-779. doi.org/10.1134/S1995425520070112.

Suvorov, G.G., Chistotin, M.V., Sirin, A.A. (2010). Vliyanie rastitel'nosti i rezhima uvlazhneniya na emissiyu metana iz osushennoj torfyanoj pochvy [Effect of vegetation and moisture conditions on the emission of methane from drained peat soil], *Agrohimiya*, no. 12, pp. 37-45.

Suvorov, G.G., Chistotin, M.V., Sirin, A.A. (2015) Poteri ugleroda pri dobyche torfa i sel'skohozyajstvennom ispol'zovanii osushennogo torfyanika v Moskovskoj oblasti [The carbon losses from a drained peatland in Moscow oblast used for peat extraction and agriculture], *Agrohimiya*, no. 11, pp. 51-62.

Sirin, A.A., Minaeva, T.Yu. (2001) Torfyanye bolota Rossii: k analizu otraslevoj informacii [Peatlands of Russia: towards the analysis of industry information], Moscow, GEOS, Russian, 190 p.

Chistotin, M.V., Sirin, A.A., Dulov, L.E. (2006) Sezonnaya dinamika emissii uglekislogo gaza i metana pri osushenii bolota v Moskovskoj oblasti dlya dobychi torfa i sel'skohozyajstvennogo ispol'zovaniya [Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane emission from a peatland in moscow region drained for peat extraction and agricultural use], *Agrohimiya*, no. 6, pp. 54-62.

Chistotin, M.V., Suvorov, G.G., Sirin, A.A. (2016) Dinamika emissii metana iz

osushennoj torfyanoj pochvy v zavisimosti ot rastitel'nosti i rezhima uvlazhneniya: Rezul'taty vegetacionnogo opyta [The temporal pattern of methane emission from drained peat soil at pot experiment as depended on vegetation and soil moisture], *Agrohimiya*, no. 12, pp. 20-33.

A *Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe*. (2009) /T. Minayeva, A. Sirin, O. Bragg (eds), Wageningen, Wetlands International, 132 p.

Ahmad, S., Haojie, L., Günther, A., Couwenberg, J., Lennartz, B. (2020) Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function, *Science of the Total Environment*, vol. 749, no. 20, pp. 141571. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>.

Bonn, A., Reed, M., Bain, C., Chris, D.E., Joosten, H., Farmer, J., Emmer, I., Couwenberg, J., Moxey, A., Artz, R., Tanneberger, F., von Unger, M., Smyth, M-A., Birnie, D. (2014) Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration, *Ecosystem Services*, no. 9, pp. 54-65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>.

Briefing Paper on the role of peatlands in the new European Union's Common Agriculture Policy (CAP) (2019), *Greifswald Mire Centre*, Germany.

Granath, G., Moore, P.A., Lukenbach, M.C., Waddington, J.M. (2016) Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration, *Sci. Rep.* 6, 28498:1–28498:9, doi:10.1038/srep28498.

Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebsch, F., Couwenberg, J. (2020) Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions, *Nature Communications*, no. 11, 1644. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>.

Huang, X., Rein, G. (2017). Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply, *International Journal of Wildland Fire*, 26, 907-918, doi.org/10.1071/WF16198.

IPCC (2000) *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. J Penman, D Kruger, I Galbally, T Hiraishi, B Nyenzi, S Emmanul, L Buendia, R Hoppaus, T Martinsen, J Meijer, K Miwa and K Tanabe (Eds). IGES, Japan. <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/>.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Program* /H.S. Eggleston, L., Buendia, K., Miwa, T., Ngara, K., Tanabe (eds). Volume 4. Agriculture, forestry and other land use. Chapter 7. Wetlands /Blain, D., Row, C., Alm, J., Byrne, K., Parish, F., Duchemin, É., Huttunen, J.T., Tremblay, A., Delmas, R., Menezes, C.F.S., Delmas, R., Minayeva, T., Pinguelli, Rosa L.P., Sirin, A. – IGES, Japan, 24 p.

IPCC (2014) *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands* /T. Hiraishi, T., Krug, K., Tanabe, N., Srivastava, J., Baasansuren, M., Fukuda, T.G., Troxler (eds). Chapter 3. Rewetted

organic soils /Blain, D., Murdiyarso, D., Couwenberg, J., Nagata, O., Renou-Wilson, F., Sirin, A., Strack, M., Tuittila, E-S., Wilson, D., Evans, C.D., Fukuda, M., Parish, F., Leifeld, J., Sanz-Sánchez, M.J. – IPCC, Switzerland, 41 p.

IPCC (2019a) *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, V., Masson-Delmotte, H.-O., Pörtner, D.C., Roberts, P., Zhai, R., Slade, S. Connors, R., van Diemen, M., Ferrat, E., Haughey, S., Luz, S., Neogi, M., Pathak, J., Petzold, J., Portugal Pereira, P., Vyas, E., Huntley, K., Kissick, M., Belkacemi, J., Malley (eds.). URL: <https://www.ipcc.ch/srccl/>.

IPCC (2019b) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. /E. Calvo Buendia, K., Tanabe, A., Kranjc, J., Baasansuren, M., Fukuda, S., Ngarize, A., Osako, Y., Pyrozhenko, P., Shermanau, S., Federici (eds). – IPCC, Switzerland.

Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J., Smith, P. (2016) The role of peatlands in climate regulation. – In: A. Bonn, T. Allott, M. Evans, H. Joosten, R. Stoneman (eds.). *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 66-79. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>.

Joosten, H. (2010) The global peatland CO₂ picture, *Wetlands International, Wageningen, Netherlands*, 35 p. URL: <https://www.wetlands.org/publications/the-global-peatland-co2-picture/>.

Leifeld, J., Wüst-Galley, C., Page, S. (2019) Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100, *Nat. Clim. Change*, no. 9, pp. 945-947. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>.

Leifeld, J., Menichetti, L. (2018) The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies, *Nat. Commun.*, no. 9, pp. 1-8. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.

Minayeva, T.Y., Bragg, O.M., Sirin, A.A. (2017) Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity, *Mires and Peat*, no. 19, pp. 1-36. URL: <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>.

Minayeva, T., Sirin, A., Stracher, G.B. (2013) The Peat Fires of Russia. In: Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V.2: Photographs and Multimedia Tours; Stracher G.B., Prakash A., Sokol E.V. (eds.), *Elsevier: Amsterdam*, The Netherlands, pp. 375-394, ISBN: 9780444594129.

Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E., Wulder, M.A. (2014) Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change, *Remote Sensing of Environment*, 148, pp. 42-57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

Rydin, H., Jeglum, J.K. (2006) The biology of peatlands, *University Press*, England, Oxford, 162 p.

Sirin, A., Laine, J. (2008) Peatlands and greenhouse gases, Chapter 7. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., Stringer, L., editors. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report. Kuala Lumpur: *Global Environment Centre*; 2008. pp. 118-138. Joint publication with Wetlands International, Wageningen.

Sirin, A.A., Medvedeva, M.A., Makarov, D.A., Maslov, A.A., Joosten, H. (2020) 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), *Ecological Engineering*, vol. 158, pp. 106044. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>.

Sirin, A., Medvedeva, M., Maslov, A., Vozbrannaya, A. (2018) Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data, *Land*, vol. 7(71), pp. 1-22. URL: <https://doi.org/10.3390/land7020071>.

Sirin, A., Minayeva, T., Yurkovskaya, T., Kuznetsov, O., Smagin, V., Fedotov, Y.U. (2017) Russian Federation (European Part). – In: H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen (eds.). Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation, *Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany*, pp. 589-616. URL: <https://doi.org/10.1127/mireseurope/2017/0001-0049>.

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., Milanovic, D., Ganeva, A., Apostolova, I., Alegro, A., Delipetrou, P., Navratilová, 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., Saveljic, D., de Vries, F., Moen, A., Dembek, W., Mateus, J., Hanganu, J., Sirin, A., Markina, A., Napreenko, M., Lazarevič, P., Stanová, V.S., Skoberne, P., Perez, P.H., Pontevedra-Pombal, X., Lonnstad, J., Kuchler, M., Wust-Galley, C., Kirca, S., Mykytiuk, O., Lindsay, R., Joosten, H. (2017). The peatland map of Europe, *Mires and Peat*, vol. 19, Article 22, pp. 1-17. URL: <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>.

Tubiello, F.N., Biancalani, R., Salvatore, M., Rossi, S., Conchedda, G. (2016) A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils, *Sustainability*, no. 8, Article 371, pp. 1-13. URL: <https://doi.org/10.3390/su8040371>.

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. (2016) Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils, *Mires and Peat*, vol. 17, Article 04, pp. 1-28. doi: 10.19189/MaP.2016.OMB.222.

Статья поступила в редакцию (Received): 09.07.2021.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 29.07.2021.

Принята к публикации (Accepted): 04.08.2021.

Для цитирования /For citation:

Сирин, А.А., Медведева, М.А., Ильясов, Д.В., Коротков, В.Н., Минаева, Т.Ю., Суворов Г.Г. (2021) Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 3, с. 84-112, doi: 10.21513/2410-8758-2021-3-84-112.

Sirin, A.A., Medvedeva, M.A., Ilyasov, D.V., Korotkov, V.N., Minayeva, T.Yu., Suvorov, G.G.(2021) Rewetted peatland in the climate reporting of the Russia Federation, Fundamental and Applied Climatology, vol. 7, no. 3, pp. 84-112, doi: 10.21513/2410-8758-2021-3-84-112.