УДК 551.588.3

# 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; \**sirinproc@gmail.com*

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

**Реферат.** Осушенные торфяники выделяют при микробном окислении торфа и торфяных пожарах ~5% всех антропогенных эмиссий парниковых газов (ПГ) или более 25%, связанных с землепользованием. Кроме того, происходит эмиссия метана из дренажной сети, в некоторых случаях закиси азота и часть органического вещества выносится со стоком. Неиспользуемые осушенные торфяники чаще всего подвержены пожарам. Наиболее эффективный путь сокращения выбросов ПГ осушенными торфяниками – их вторичное обводнение, что может внести существенный вклад в выполнение Парижского соглашения по климату в части землепользования. Рекультивация болота или его части после использования для 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 на которых показал снижение частоты торфяных пожаров. Вторично обводненные торфяники – объект национальной отчетности о кадастре антропогенных источников и поглотителей парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, однако их учет в России не производится. Представлен подход к определению площадей вторично обводненных торфяников, основанный на апробированной методике мониторинга их пожароопасности и эффективности обводнения по мультиспектральным спутниковым данным. К ним предложено относить участки, занятые гидрофильной растительностью, а также покрытые водой; большей частью до обводнения они представляли неиспользуемые торфоразработки. 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, 2019). При допущении об исходной принадлежности обводненных участков к торфоразработкам, расчеты показали общее сокращение выбросов ПГ более чем на 36 тыс. тСО2-экв год-1, даже несмотря на увеличение эмиссии метана. Эти оценки консервативны, так как не учитывают эффект обводнения для всей площади объектов обводнения и снижения выбросов ПГ от торфяных пожаров. Учет этих факторов, а также переход на данные измерений КЭ регионального уровня могут в перспективе существенно уточнить методику и результаты расчетов.

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

# REWETTED PEATLANDS IN THE CLIMATE REPORTING OF THE RUSSIAN FEDERATION

*A.A. Sirin* 1)*, M.A. Medvedeva* 1)*, D.V. Ilyasov* 1)*, V.N. Korotkov* 2)*, T.Yu. Minayeva* 1)*, G.G. Suvorov* 1)

1) Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences,

21 Sovetskaya str., 143030, Uspenskoe, Russia; \**sirinproc@gmail.com*

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

**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. The drainage network in the peatlands is a source of methane, in some cases nitrous oxide, contribute to the removal of organics with runoff. Unused 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 accounting in 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 Province (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 emissions’ 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 determination of the 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 to include areas with hydrophilic vegetation as well as those covered with water. Most of them were abandoned areas used for milled peat extraction. 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, 2019). Assuming the original affiliation of rewetted areas with peat extraction, the calculations showed an overall reduction in GHG emissions of more than 36,000 tCO2-eq yr-1, even though methane emissions increased. Estimates are conservative, not considering the effect of rewetting on the whole area of rewetted objects, 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 significantly refine the methodology and results of the calculations.

**Keywords**: mitigation, climate change, carbon dioxide, methane, nitrogen oxide, dissolved organic carbon, peat extraction, rewetting, peatland restoration

# Введение

Занимая 0.3% суши, осушенные торфяники[[1]](#footnote-2) 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 продолжается эмиссия метана (CH4): интенсивная из дренажной сети, и незначительная с межканавных пространств, может происходить выделение закиси азота (N2O), вынос растворенной органики (DOC) по осушительным каналам (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), которая растет с интенсивностью осушения (Глухова, Сирин, 2018).

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 необходимых мер эмиссия ПГ из осушенных торфяников в 2020–2100 гг. может составить 12-41% объема сокращения выбросов ПГ, необходимого для удержания глобального потепления ниже +1.5 – +2°C (Leifeld et al., 2019). Это определяет важное, но недооцененное значение проблемы осушенных торфяников в отношении выполнения Парижского соглашения по климату, и ключевое – относительно 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 ограниченных 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 (С) 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 мелкооторфованными землями (торф < 30 см) – более 20% территории России (Болота …, 2017; Вомперский и др., 2005, 2011). Большая часть болот сохранилось 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 (Minayeva et al., 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 большинстве стран 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 планово 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 эмиссии 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) эти данные являются ориентировочными и носят приблизительный характер. Эти площади сформированы, вероятно, в большей мере объектами фрезерной добычи (другие, например, карьерная добыча торфа имеют незначительную площадь и с большей вероятностью не были учтены) и включают все объекты, относимые МГЭИК (IPCC 2006; 2014; 2019б) к торфоразработкам: подготовленные (крайне немногочисленны из-за сокращения освоения новых месторождений), разрабатываемые, а также брошенные после частичной выработки без рекультивации. Заброшенные 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 заброшены. 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 тС 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 первых 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 пожаров 2002 и особенно 2010 годов основным аргументом обводнения стало предотвращение опасности возгорания торфа (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 осушенных торфяников и болот региона (Сирин и др. 2014), и является наиболее масштабным опытом таких мероприятий в Северном полушарии. Долговременный мониторинг объектов обводнения показал решение основной задачи – снижение частоты торфяных пожаров (Сирин и др. 2020), однако важно оценить и изменение баланса ПГ в результате проведенных мероприятий. В первую очередь, требуется определить площади, которые можно отнести к обводненным, которые могут быть включены в Национальную отчетность Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом, учитывая, что официальной статистики по обводненным торфяникам нет. Цель данной работы – представить методику определения таких площадей 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 для снижения пожарной опасности включают создание инфраструктуры для предотвращения и тушения пожаров, 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. Эти площади, могут быть отнесены в первом случае, к категориям, определяемым МГЭИК (IPCC, 2014) как увлажненные органические почвы (“rewetted organic soils”), во втором к затопленным землям (“flooded lands”).

Для установления их площади была использована методика оценки состояния пожароопасных и обводненных торфяников по данным мультиспектральной космической съемки. Она предполагает выделение 6 классов почвенного/растительного покрова, верификацию по наземным данным и была 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», образовавшиеся преимущественно после обводнения как затопленные земли (“flooded lands”). Оба класса характеризуют участки, которые являются и будут в дальнейшем развиваться как водно-болотные угодья.

|  |
| --- |
|  |
| ***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.*** *"Hydrophilous vegetation" with cattail, sedge, reeds, and other wetland plants (above), "water surfaces" – open water bodies formed mainly after rewetting (below).* |

Для проведения классификации необходимы спутниковые данные с видимым диапазоном, включая красный (RED), ближний инфракрасный БИК 1 (NIR) и коротковолновыми инфракрасными каналами 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 со съемкой сверхвысокого разрешения. 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, покрытие торфяников на уровне региона требует использования съемки разных аппаратов. Так, для оценки состояния торфяников (включая обводненные) Московской области 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 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 communities" and "water surfaces" against the background of other land cover classes. Channels available from different sensors are shown.* |

# *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 3A.5.1 (стр. 3.38, IPCC, 2006) и ее уточненной версии (Приложение 3A.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) CO2, CH4, N2O 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) по ключевому критерию – электропроводности почвенной влаги, которая в бедных торфяных почвах составляет 40–50 μS см–1 и менее, а в богатых - от 50 μS см–1 и более (Rydin, Jeglum 2006). При недостатке конкретной информации по объектам обводнения и с учетом имеющихся данных по изученным объектам (Суворов и др. 2015) было предложено условно отнести все рассматриваемые обводненные площади в Московской области к богатым торфяным почвам (rich organic soils).

Для «водных поверхностей» было предложено использовать КЭ для затопленных земель (flooded lands) (табл. 1), данные в Уточнении 2019 года к Руководящим принципам МГЭИК 2006 года по национальным инвентаризациям парниковых газов (IPCC, 2019).

**Таблица 1**. Коэффициенты эмиссии для обводненных торфяников (IPCC, 2014 с дополнениями)

**Table 1**. 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)*** |
| **CO2** | тCO2-C га-1 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  |
| **CH4 ОП1)** | кгCH4-C га-1 год-1  | 216 (3–445)Temperate rich | IPCC 2014, стр. 3.18, табл. 3.3  |
| **CH4 КН1)** | 216**2)** | – |
| **N2O** | кгN2O-N га-1 год-1 | Незначительная (“negligible”) | IPCC 2014, стр. 3.19 |
| ***Затопленные земли «flooded lands» (IPCC, 2019)*** |
| **CO2** | тCO2-C га-1 год-1 | 1.02 (1.00–1.04)Cool temperate | IPCC 2019, стр. 7.23, табл. 7.13  |
| **DOC** | 0**3)** | – |
| **CH4 ОП1)** | кгCH4 га-1 год-1 | 84.7 (78.8–90.6)Cool temperate | IPCC 2019, стр. 7.26, табл. 7.15  |
| **CH4 КН1)** | 84.7**2)** | – |
| **N2O** | кгN2O-N га-1 год-1 | 0**4)** | IPCC 2019, стр. 7.24 |

**Примечания:** 1) **–** эмиссия CH4 с основной поверхности (CH4 ОП) и канала (CH4 КН); 2) – эмиссия CH4 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 N2O принята «нулевой», как определяемая окружающими управляемыми землями (IPCC, 2014).

# *Коэффициенты эмиссии для исходных объектов*

На данном этапе оценки принято допущение о том, что обводненные торфяники, характеризуемые 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 подтверждать, что здесь ранее велась торфодобыча. 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 торфяников, осушенных 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 торфодобыч (“peatland managed for extraction”) в качестве «нулевой отметки» изменения выбросов ПГ в результате обводнения является консервативным вариантом оценки, так как эмиссия ПГ с торфодобычи в целом ниже, чем с торфяников, осушенных для сельского хозяйства – “grasslands” и “croplands” (IPCC, 2014). Поэтому для торфяников до обводнения было предложено использовать КЭ ПГ (CO2, CH4, N2O и выноса DOC), данные в Дополнении МГЭИК (IPCC, 2014) для «торфяников, используемых для торфодобычи» (табл. 2).

**Таблица 2**. Коэффициенты эмиссии по умолчанию для торфоразработок (IPCC, 2014)

**Table 2**. Default emission factors for peat extraction (IPCC, 2014)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Агент** | **Единицы** | **Среднее значение (95% доверительный интервал** | **Источник данных** |
| **CO2** | тCO2-C га-1 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  |
| **CH4 ОП** | кгCH4-C га-1 год-1 | 6.1 (1.6–11)Temperate | IPCC 2014, стр. 2.26, табл. 2.3  |
| **CH4 КН** | 542 (102–981)Boreal and Temperate | IPCC 2014, стр. 2.30, табл. 2.4 |
| **N2O** | кгN2O-N га-1 год-1 | 0.3 (-0.03–0.64)Boreal and Temperate | IPCC 2014, стр. 2.34, табл. 2.5 |

**Примечание.** CH4 ОП и CH4 КН **–** эмиссия CH4 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 органогенные почвы»:



где *∆EFros.i* –изменение КЭ для категории земель «обводненные органогенные почвы», *EFpe,i* – КЭ для категории «торфоразработки», *EFros,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»:



где *∆EFfl.i* –изменение КЭ для категории «затопленные земли», *EFpe,i* – КЭ для категории «торфоразработки», *EFfl,i* – КЭ для категории «затопленные земли», соответственно для CO2, CH4, N2O и выноса DOC (*i*). В обоих случаях при расчете использовались средние значения КЭ (табл. 2). Полученные значения изменения КЭ после обводнения даны в таблице 3.

**Таблица 3**. Изменение коэффициентов эмиссии для торфоразработок после обводнения

**Table 3**. Changes of emission factors for peat extraction after rewetting

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Агент** | **Единицы** | **Изменение**  |
| ***Обводненные органогенные почвы «rewetted organic soils» (IPCC, 2014)*** |
| **CO2** | тCO2-C га-1 год-1 | -2.3 |
| **DOC** | -0.07 |
| **CH4 ОП** | кгCH4-C га-1 год-1 |  282 |
| **CH4 КН** | -254 |
| **N2O** | кгN2O-N га-1 год-1 | -0.3 |
| ***Затопленные земли «flooded lands» (IPCC, 2019)*** |
| **CO2** | тCO2-C га-1 год-1 | -1.78 |
| **DOC** | -0.31 |
| **CH4 ОП** | кгCH4-C га-1 год-1 | 78.6 |
| **CH4 КН** | -457.3 |
| **N2O** | кгN2O-N га-1 год-1 | -0.3 |

**Примечание.** CH4 ОП и CH4 КН **–** эмиссия CH4 с основной поверхности и канала.

Изменение эмиссии ПГ для всей площади торфяников, которая предположительно считается обводненной («гидрофильная растительность» и «водные поверхности»), рассчитывается согласно:

 заменить S*гр* и S*вп* в формуле

где *∆E*– изменение эмиссии после обводнения всех рассматриваемых ПГ, включая DOC, *Siр* – площадь занятая «гидрофильной растительностью», *∆EFros.i* – изменение для категории земель «обводненные органогенные почвы» КЭ для CO2, CH4, N2O и выноса DOC (*i*), *Sfl* – площадь занятая «водными поверхностями», *∆EFros.i* – изменение КЭ для категории земель «затопленные земли» КЭ для CO2, CH4, N2O и выноса DOC (*i*).

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, занятое дренажной сетью, равное 5%.

# Результаты и обсуждение

Обводнение в Московской области проводилось с осени 2010 до конца 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 осуществляться 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/восстанавливалась инфраструктура для двустороннего регулирования водного режима для сохранения, возможности возвращения земель прежде всего в сельскохозяйственный оборот. Все эти мероприятия обеспечили эффективную противопожарную защиту осушенных торфяников: мониторинг показал существенное снижение числа и площади торфяных пожаров на обводненных объектах в пожароопасные годы, которые были после 2010 года (Sirin et al. 2020) и динамики торфяных пожаров в соседних областях. Это обеспечило также устойчивое, без воздействий повторных пожаров, постпирогенное восстановление растительности, прежде всего лесной (хвойной и лиственной) на торфяных гарях, 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 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. При мониторинге и последующей оценке не учитывались небольшие по площади (n×1 – n×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 «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 (рис. 3) видно, что на участках обводнения, где ограничение стока начало проводиться сразу после пожаров уже осенью 2010 года и было «поддержано» интенсивными дождями, обводнение происходит постепенно, 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, определяемые как водные поверхности, могут постепенно зарастать гидрофильной и, вероятно, водной растительностью, имеющей близкие спектральные характеристики. На фоне этого общего тренда соотношение между двумя этими типами покрова – «гидрофильная растительность» и «водные поверхности» – может варьировать в зависимости от погодных условий, предшествующей космической съемки. Анализ показал, что площадь «водных поверхностей» увеличивается в пределах 1% при увеличении суммы осадков за 30-дневный период, предшествующий дате съемки (Sirin et al., 2020).

На основании полученных оценок площадей, занятых «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями» было подсчитано изменение эмиссии ПГ (CO2, CH4, N2O) и выноса DOC (табл. 5). Как уже отмечалось, было принято допущение о том, что эти площади до обводнения были представлены в основном заброшенными торфоразработками. Таким образом, для площадей с «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями» была использована разница между КЭ, данными МГЭИК (IPCC, 2014) для «торфоразработок» и «обводненными органогенными почвами» или «затопленными землями» соответственно.

|  |
| --- |
|  |
| ***Рисунок 3.*** *Изменение площадей, занятых «гидрофильной растительностью» и «водными поверхностями» до и после обводнения, на примере части массива Радовицкий Мох (1,534.8 га), Московская область.* ***Figure 3****.* *Changes in the areas occupied by "hydrophilous vegetation" and "water surfaces" before and after rewetting, on the example of part of the Radovitsky Mokh peatland (1,534.8 ha), Moscow Oblast* |

Основное сокращение выбросов ПГ с учетом потенциала глобального потепления (CO2 = 1, CH4, = 25, N2O = 298) произошло за счет CO2. Больший 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 образующаяся органика в последствии будет отлагаться в виде торфа. Можно предположить дальнейшее сокращение эмиссии CO2 как за счет усиления увлажненности территории, так и в результате зарастания затопленных участков.

**Таблица 5**. Изменение эмиссии для площадей, относимых к обводненным торфяникам на примере Московской области

**Table 5**. Changes of emissions for areas attributed to rewetted peatlands on example of Moscow Oblast

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Агент** | **Единицы** | **В том числе** | **Всего** | **Итого по региону,** **тСО2-экв год-1** |
| **Гидрофильная растительность** | **Водные** **поверхности** |
| **Московская область** |
| **CO2** | тCO2 год-1 | -44 764 | -23 613 | -68 378 | -68 378 |
| **DOC** | -1 362 | -4 112 | -5 475 | -5 475 |
| **CH4 ОП** | кгCH4 год-1 | 1 421 509 | 270 156 | 1 691 665 | 42 292 |
| **CH4 КН**  | -67 412 | -82 726 | -150 137 | -3 753 |
| **N2O** | кгN2O-N год-1 | -1 592 | -1 085 | -2 678 | -1 254 |
| **итого** | **тCO2-экв год-1** | **-36 568** |

Наибольшее сокращение выноса DOC характерно для затопленных участков, что логично по причине почти полного прекращения стока с этих площадей (табл. 5). Возросла эмиссия CH4, 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 CH4 на участках с гидрофильной растительностью, где осоки и другие растения с аэренхимой способствуют выходу метана из глубоких слоев торфа, минуя метанотрофный фильтр. Сократилась эмиссия CH4 за счет затопления каналов, высокий уровень которой определялся в немалой степени за счет движения воды (Сирин и др., 2021). Незначительный вклад в снижение эмиссии ПГ внес N2O.

Увеличение эмиссии CH4 существенно сократило общее снижение выбросов ПГ после обводнения. Однако необходимо учитывать, что CH4, как короткоживущий в атмосфере ПГ, не может перекрыть долговременный эффект от снижения эмиссии CO2 (Günther et al., 2020). Кроме этого, эмиссия СН4 снижается по прошествии времени после обводнения по мере сокращения легкодоступной органики для метаногенеза. Даже с учетом роста выделения CH4 общий эффект сокращения эмиссии ПГ в результате обводнения оказался существенным – более 36 тыс. тСО2-экв год-1. С учетом долговременного и поступательного действия обводнения этот эффект будет не только суммироваться, но и расти.

Полученная оценка максимально консервативна. В первую очередь это касается КЭ. 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 авторами подход по определению обводненных площадей и последующей оценки сокращения выбросов ПГ не учитывает многих дополнительных последствий. В первую очередь не учитывается сокращение или даже исключение выбросов, связанных с торфяными пожарами. Не учитывается эффект роста древесной растительности на других площадях объектов обводнения в условиях отсутствия последующих пожаров. Наконец, принятие допущения, что обводненные площади были ранее торфоразработками, у которых коэффициенты эмиссии меньшие по сравнению с сельхозземлями – сенокосами/пастбищами (“grasslands”) и пропашными культурами (“croplands”). Учет всех или части указанных аспектов может 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 статистического учета таких земель не проводится. Представленный подход к определению площадей вторично обводненных торфяников основан на апробированной, опубликованной в научных журналах и, соответственно, верифицированной согласно МГЭИК методике мониторинга состояния пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения по мультиспектральным спутниковым данным. 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 затопленные 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 более 36 тыс. тСО2-экв год-1 даже несмотря на существенное увеличение эмиссии метана. Оценки являются консервативными, не учитывающими эффект обводнения для всей площади объектов обводнения, включая постпирогенное восстановление преимущественно лесной растительности, а также сокращение выбросов парниковых газов, которые могут быть очень значительными, от торфяных пожаров. Учет этих аспектов, а также переход на региональные, определенные по данным измерений потоков CO2, CH4, N2O 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 нужных для человека экосистемных услуг болот является эффективным путем сокращения выбросов парниковых газов в сфере землепользования, сельского и лесного хозяйства. И 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°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 крайне 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 частичной поддержке проекта Российского научного фонда 19-74-20185, проекта «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата», финансируемого в рамках Международной климатической инициативы Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K Восстановление торфяных болот) и проекта GIZ «Разработка методических основ для включения проектов по осушению-обводнению торфяников в национальную климатическую отчетность Российской Федерации» Международной климатической инициативы Федерального министерства окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия в рамках российско-германского сотрудничества.*

**Список литературы**

Болота. − 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.

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.

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. 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, 2014, № 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: 1021513/2410-8758-2019-3-05-31

Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. 2019. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре. – Лесоведение, № 5, с. 410-422. https://doi.org/10.1134/S0024114819050097

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. https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206

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., 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., 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.

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. 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. <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. 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 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.). In press.

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. https://doi.org/[10.1017/CBO9781139177788.005](https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005)

Joosten H. 2010. The global peatland CO2 picture. – Wetlands International, Wageningen, Netherlands, 35 p. 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. 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. 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. <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.

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

Sirin A, Laine J. Peatlands and greenhouse gases, Chapter 7. 2008. 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. p. 118–38. 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. 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. <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. <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. 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.  <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]. − In.: Ekologicheskij atlas Rossii [Ecological Atlas of Russia]. Ed. red. N.S. Kasimov, V.S. Tikunov. − M., Feoriya, 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 − Forest science*, 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 – Izvestiya RAN. Geography Series,* no 5, pp. 39-50.

Gluhova T.V., Sirin A.A. 2018. Poteri pochvennogo ugleroda pri pozhare na osushennom lesnom verhovom bolote [Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog]. *Pochvovedenie − Soil Science*, no 5, pp. 580-588. https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076

Informacionnyj vypusk «O sostoyanii prirodnyh 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.

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 rastitel'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 − Sustainable forest management*, no. 4, pp. 6-14.

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

Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. 2017. Vozmozhnosti razlichnyh mnogospektral'nyh sputnikovyh dannyh dlya ocenki sostoyaniya neispol'zuemyh pozharoopasnyh i obvodnyaemyh torforazrabotok [Capabilities of multispectral remote sensing data in assessment of the status of abandoned fire hazardous and rewetting peat extraction lands]. Issledovanie Zemli iz kosmosa − *Earth Observation and Remote Sensing*, no 3, pp. 76-84. doi: <https://doi.org/10.7868/S0205961417020051>

Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. 2019. Vozmozhnosti razlichnyh mul'tispektral'nyh kosmicheskih dannyh dlya monitoringa neispol'zuemyh pozharoopasnyh 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 − Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, no. 16(2), pp. 150-159. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159

Minayeva T.Y. Sirin A.A. 2011. Biologicheskoe raznoobrazie bolot i izmenenie klimata [Peatland biodiversity and climate change]. *Uspekhi sovremennoj biologii – Biology Bulletin Reviews*, no. 2, pp. 164-175, doi:10.1134/s207908641202003x.

Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990-2019 gg. Chast' 2. Prilozheniya. Prilozhenie 3.4 – Spravka ob obvodnennyh 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., pp. 71-79. http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/

Perspektivnoe ispol'zovanie vyrabotannyh torfyanyh bolot [Perspective use of depleted peat bogs]. 2013. /V.V. Panov (ed.). − Tver', “Triada”, 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 – Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, no. 3, pp. 5-18.

Semenov S.M., Gladil'shchikova A.A., Dmitrieva T.M. 2019. Antropogennye narusheniya vzaimodejstviya sushi i atmosfery: ocenki MGEIK [Anthropogenic disturbances of the land-atmosphere interactions: IPCC assessments]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, vol. 3, pp. 5-27. doi: 1021513/2410-8758-2019-3-05-31

Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I. 2019. Glubina progoraniya torfa i poteri ugleroda pri lesnom podzemnom pozhare [Depth of peat burning and carbon losses from an underground forest fire]. *Lesovedenie – Forest science*, no 5, pp. 410-422. https://doi.org/10.1134/S0024114819050097

Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A. Joosten H. 2019. Monitoring rastitel'nogo pokrova vtorichno obvodnennyh torfyanikov Moskovskoj oblasti [Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle –* *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, vol. 65, No. 2, pp. 321-334. https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206

Sirin A.A., Minaeva T.Yu., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A. 2011. Kak izbezhat' torfyanyh pozharov? [How to avoid peat fires?] *Nauka v Rossii – Science in Russia*, no 2, pp. 13-21.

Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva N.A., Cyganova O.P., Gluhova T.V. 2014. Kartografirovanie torfyanyh bolot Moskovskoj oblasti po dannym kosmicheskoj s"emki vysokogo razresheniya [Mapping of peatlands in the moscow oblast based on high-resolution remote sensing data]. *Lesovedenie – Forest science*, no 5, pp. 65-71.

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

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 –Agrochemistry*, 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 – Agrochemistry*, 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, 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 – Agrochemistry*, 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 –Agrochemistry*, 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. 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, p. 54-65. <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. https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere\_Briefings/GMC-briefing%20paper\_CAP\_final.pdf

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 –Agrochemistry*, 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 –Agrochemistry*, No. 12, pp. 20-33.

Glukhova T.V., Sirin A.A. 2018. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. – Eurasian Soil Sci., vol. 51(5), pp. 542-549. doi: 10.1134/S1064229318050034.

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. https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z

Informacionnyj vypusk «O sostoyanii prirodnyh 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.

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.). In press.

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. 2010. The global peatland CO2 picture. – Wetlands International, Wageningen, Netherlands, 35 p. https://www.wetlands.org/publications/the-global-peatland-co2-picture/

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, p, 66-79. https://doi.org/[10.1017/CBO9781139177788.005](https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005)

Leifeld J., Menichetti L. 2018. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. – Nat. Commun., No. 9, pp. 1-8. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6

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. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5

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 rastitel'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 − Sustainable forest management*, No. 4, pp. 6-14.

Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A., Sirin A.A. 2011. Ocenka sostoyaniya zabroshennyh torforazrabotok po mnogospektral'nym sputnikovym izobrazheniyam [Multispectral remote sensing for assessing changes on abandoned peat extraction lands]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa − Earth Observation and Remote Sensing*, No. 5, pp. 80-88.

Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. 2017. 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, No. 9, pp. 1070-1078. doi: 10.1134/S0001433817090201

Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. 2019. Vozmozhnosti razlichnyh mul'tispektral'nyh kosmicheskih dannyh dlya monitoringa neispol'zuemyh pozharoopasnyh 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 − Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, No. 16(2), pp. 150-159. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159

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.

Minayeva T.Y. Sirin A.A. 2012. Peatland biodiversity and climate change. – Biol. Bull. Rev., No. 2, pp. 164-175, doi:10.1134/s207908641202003x.

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. <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>

Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990-2019 gg. Chast' 2. Prilozheniya. Prilozhenie 3.4 – Spravka ob obvodnennyh 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., p. 71-79. http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/

Perspektivnoe ispol'zovanie vyrabotannyh torfyanyh bolot [Perspective use of depleted peat bogs]. 2013. /V.V. Panov (ed.). − Tver', «Triada», 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 – Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, No. 3, pp. 5-18.

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

Semenov S.M., Gladilshchikova A.A., Dmitrieva T.M. 2019. Anthropogenic disturbances of the land-atmosphere interactions: IPCC assessments. – Fundamental and Applied Climatology, V. 3, pp. 5-27. doi: 1021513/2410-8758-2019-3-05-31

Sirin A, Laine J. Peatlands and greenhouse gases, Chapter 7. 2008. 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. p. 118–38. Joint publication with Wetlands International, Wageningen.

Sirin A. Minayeva T. Vozbrannaya A. Bartalev S. 2011. How to avoid peat fires? − Science in Russia, No. 2, pp. 13-21.

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. <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. <https://doi.org/10.1127/mireseurope/2017/0001-0049>

Sirin A.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Gummert I., Gul’be Ya.I. 2020. Depth of peat burning and carbon loss during an underground forest fire. − Contemp. Probl. Ecol., vol. 13, pp. 769-779, doi.org/10.1134/S1995425520070112.

Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva Т.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V. 2014. Mapping of Peatlands in the Moscow Oblast Based on High Resolution Remote Sensing Data. − Contemp. Probl. Ecol., 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 obvodnennyh torfyanikov Moskovskoj oblasti [Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle –* *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, vol. 65, No. 2, pp. 321-334. https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206

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. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044.

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, 190 p.

Sirin A.A., Sal'nikov A.A. 2017. Bolota i zabolochennye zemli. [Mires and swamps] − In.: *Ekologicheskij atlas Rossii [Ecological Atlas of Russia]* /N.S. Kasimov, V.S. Tikunov (eds.). − Moscow, Feoriya, pp. 118-121.

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 –Agrochemistry*, 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 –Agrochemistry*, No. 11, pp. 51-62.

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. 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.  <https://doi.org/10.3390/su8040371>

Vompersky, S.E., Sirin, A.A., Salnikov, A.A., Tsyganova, O.P., Valyaeva, N.A., 2011. Estimation of forest cover extent over peatland and paludified shallow peatlands in Russia. Contemp. Probl. Ecol. 4, 734–741. Doi: 10.1134/S1995425511070058.

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

1. Используем термин *торфяное болото* применительно к болотам, находящимся в естественном или близком к естественному состоянии, и термин *торфяник* к объектам, имеющим и сохранившим торфяную залежь или ее часть, но в первую очередь утратившим болотный растительный покров или подвергшимся сильным его изменениям по антропогенным или иным причинам. Подход соответствует международной практике использования терминов «mire» в первом случае, и «peatland» – во втором (Минаева, Сирин, 2011). [↑](#footnote-ref-2)