

Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области*

А. А. Сирин¹, М. А. Медведева¹, Д. А. Макаров¹, А. А. Маслов¹, Х. Юстен²

¹ Институт лесоведения Российской академии наук,

Российская Федерация, 143030, Московская обл., п/о Успенское, ул. Советская, 21

² Университет Грайфсвальда, Институт ботаники и ландшафтной экологии,

Германия, D-17487, Грайфсвальд, Солдманнштрассе, 15

Для цитирования: Сирин, А. А., Медведева, М. А., Макаров, Д. А., Маслов, А. А., Юстен, Х. (2020). Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (2), 314–336. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>

Неиспользуемые осушенные торфяники представляют наибольшую опасность с точки зрения торфяных пожаров. Особенно это касается заброшенных без рекультивации полей фрезерной добычи торфа, максимальные площади которых расположены в Московской области. При отсутствии экономических оснований их хозяйственного использования наиболее эффективный путь снижения пожарной опасности и улучшения экологического состояния таких земель — обводнение и искусственное заболачивание. Необходимы определение первоочередных объектов обводнения и их последующий мониторинг для оценки эффективности проводимых мероприятий. Такие объекты могут иметь значительные размеры, быть труднопроходимыми и сложными для наземного картографирования. Пожары и обводнение способствуют быстрым изменениям растительного покрова. Для его мониторинга необходимы данные дистанционного зондирования Земли, прежде всего мультиспектральные спутниковые данные. Большое число объектов, их разброс в пространстве, а также необходимость многолетних наблюдений требуют комбинирования данных различных спутников. Представлен опыт мониторинга 73 тыс. га торфяников в Московской области, обводненных в 2010–2013 гг. после пожаров 2010 г. Текущие результаты показали сокращение площадей открытого торфа и сухолюбивой травяной растительности, незначительные изменения площадей, занятых древесной хвойной растительностью и поступательное расширение площади, занятой лиственной, увеличение после обводнения и последующее поддержание общей площади гидрофильных сообществ и открытой воды. Разработанная и апробированная методика позволяет оценивать эффективность обводнения торфяников для снижения опасности торфяных пожаров, а также выявлять участки, требующие дополнительных мероприятий. Предложенный алгоритм обеспечивает достоверное выделение в полуавтоматическом режиме 6 классов растительного/почвенного покрова, различающихся по пожарной опасности и основным экологическим характеристикам, определяющим потоки парниковых газов, биологическое разнообразие и другие экосистемные функции.

* Работа выполнена при поддержке российско-германского проекта № 11 III 040 RUS K «Восстановление торфяников» и проекта Российского научного фонда № 19-74-20185. Авторы признательны Г. Г. Суворову и А. Е. Возбранной за помощь в получении наземных данных, а также двум анонимным рецензентам за полезные замечания к рукописи статьи.

Ключевые слова: торфяные пожары, экологическая безопасность, мультиспектральные спутниковые данные, восстановление болот.

1. Введение

Торфяные пожары возникают в разных природных зонах, о чем свидетельствуют пожары в Юго-Восточной Азии, Северной Америке и Северо-Восточной Европе (Page et al., 2002; Сирин и др., 2011; Minayeva et al., 2013; Rein, 2013; Hu et al., 2018; Gibson et al., 2018; Sirin et al., 2018). В нашей стране они наиболее часты в лесной зоне (Minayeva et al., 2013), а в экстремально сухие годы могут гореть даже верховые болота: огонь обходит только влажные мочажины и озерки (Минаева и Сирин, 2002; Сирин и др., 2011).

Торфяные пожары воздействуют на наиболее богатые углеродом экосистемы суши — торфяные болота (Parish et al., 2008; Joosten et al., 2016) и характеризуются тлеющим горением: после воспламенения они могут длительное время гореть, даже несмотря на продолжительные осадки и снежный покров (Rein, 2013; Turetsky et al., 2015; Hu et al., 2018; Schulte et al., 2019). Широкий спектр твердых и газообразных продуктов горения, образующихся при торфяных пожарах, опасен для здоровья человека (Hu et al., 2018) и вносит значительный вклад, в некоторые годы до 15 % (Page et al., 2002; Poulter et al., 2006), в глобальные антропогенные выбросы парниковых газов (Davies et al., 2013; Rein, 2013; Hiraishi et al., 2014; Huang and Rein, 2017; Сирин и др., 2019). Торфяные пожары трудно тушатся из-за возможного заглубления огня и высокой гигроскопичности торфа, что требует большого количества воды. На болотах с лесной и редколесной растительностью (Vompersky et al., 2011) подземные (торфяные) пожары часто приводят к гибели значительной части древостоя из-за заглубления огня, выгорания и повреждения сосущих корней (Вомперский и др., 2007).

Российская Федерация лидирует в мире по площади болот (Greifswaldmoor.de, 2012), которые занимают более 8 %, а вместе с мелкоотторфованными землями (< 30 см торфа) — более 20 % территории страны (Вомперский и др., 1994; 2005; 2011; Vompersky et al., 1996; Сирин, 2017). Значительная часть болот в европейской части России сохранилась в естественном состоянии (Tanneberger et al., 2017), однако в центре, на западе и северо-западе миллионы гектаров были осушены для сельского и лесного хозяйства, для добычи торфа (Minayeva et al., 2009).

Снижение влажности торфяных болот и торфяников¹ при осушении и изменении климата увеличивает частоту и распространение торфяных пожаров (Parish et al., 2008; Turetsky et al., 2015; Kettridge et al., 2015; Schulte et al., 2019). При этом чем больше понижение уровня болотных вод, тем более глубокие слои торфа попадают под воздействие огня (Глухова и Сирин, 2018). Обводнение осушенных торфяников и последующее восстановление водного режима и болотной растительности могут эффективно снижать риск пожаров, особенно при формировании покрова

¹ Мы используем термин *торфяное болото* применительно к болотам, находящимся в естественном или близком к естественному состоянию, 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 (Сирин и Минаева, 2001). Подход соответствует международной практике использования терминов *mire* в первом случае и *peatland* — во втором (Parish et al., 2008).

из сфагновых мхов, поддерживающего влажность нижележащих слоев торфа (Сирин и др., 2011; Granath et al., 2016). Это сокращает окисление торфа, потери углерода и выбросы CO₂ в атмосферу (Parish et al., 2008; Wilson et al., 2016), способствует восстановлению биоразнообразия (Minayeva et al., 2017) и, в целом, широкого спектра экосистемных функций болот (Bonn et al., 2014).

Торфяные пожары чаще начинаются на соседних угодьях, однако могут возникать и непосредственно на болотах и торфяниках при неосторожном обращении с огнем. Самовозгорание торфа возможно исключительно в буртах при нарушении технологии складирования добытого торфа. Добыча торфа предполагает обязательную противопожарную защиту. Соответствующие меры предусмотрены также при осушении для сельского и лесного хозяйства, а осушительная сеть ограничивает распространение огня (Минаева и Сирин, 2002). Используемый торфяник обычно даже менее пожароопасен, чем естественное болото, однако ситуация меняется, если освоённые торфяники заброшены.

Наибольшую опасность представляют заброшенные поля фрезерной добычи торфа. После выработки они подлежали рекультивации, однако с ростом добычи торфа в 1970–1980-х гг. площадь нерекультивированных земель накапливалась и резко возросла после спада торфодобывающей промышленности в 1990-е гг. Такие земли сосредоточены во Владимирской, Ленинградской, Нижегородской, Тверской и других областях, а максимальные площади — в Московской. Проблему дополняют неиспользуемые осушенные сельскохозяйственные земли и, при ненадлежащем ведении лесного хозяйства, объекты осушительной гидроресомелиорации. При отсутствии экономического интереса к возвращению заброшенных осушенных торфяников в хозяйственный оборот необходимо восстановление болот. Согласно ст. 52 Водного кодекса РФ (2006), рекультивация выработанных торфяников должна проводиться преимущественно путем обводнения и искусственного заболачивания.

Проблема торфяных пожаров остро вставала в 1972 г., в 2002 г. (Минаева и Сирин, 2002) и достигла критических масштабов в 2010 г. после пожаров в центре европейской части России, охвативших Московский регион с населением более 20 млн человек (Сирин и др., 2011; Safronov et al., 2015). В сочетании с аномально высокой температурой воздуха (Barriopedro et al., 2011) смог, вызванный продуктами горения (Koponov et al., 2011), увеличил смертность в июле и августе 2010 г. только в Москве более чем на 10 тыс. человек (Ревич и др., 2015), а экономический ущерб мог превысить 100 млрд руб. (Порфирьев, 2013).

Правительством РФ были поставлены задачи по борьбе с текущими торфяными пожарами и предотвращению их в будущем, и в 2011–2013 гг. в Московской области были обводнены 77 осушенных торфяников площадью 73 049 га, что является наиболее масштабным опытом таких мероприятий в Северном полушарии (прил. 4.1²). Строительные работы были выполнены за счет федерального бюджета (3.4 млрд руб.), проектирование — на средства региона. Были созданы инфраструктура для предупреждения и оперативного тушения торфяных пожаров, условия для восстановления водно-болотных угодий на месте неиспользуемых торфяников и обеспечено регулирование водного режима при возникновении необходимости

² Здесь и далее приложения 4.1–4.3 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/5614/5440>. Приложения даны в авторской редакции.

возвращения земель в хозяйственный оборот. Созданные сооружения эксплуатирует специализированная организация Московской области «МОС АВС» (Информационный выпуск..., 2018).

С 2011 г. частью этих работ стал российско-германский проект «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата», направленный, в первую очередь, на оценку и обоснование восстановления болот в целях снижения выбросов парниковых газов. Инициированный главами двух стран и реализуемый в рамках двустороннего сотрудничества в области охраны окружающей среды и управляемый через немецкий банк развития KfW-проект курируется Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) и Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы и безопасности ядерных реакторов ФРГ (BMUB) в рамках Международной климатической инициативы (IKI)³.

Важнейшей составляющей проекта является мониторинг объектов обводнения для анализа эффективности проведенных мероприятий. С учетом площади неиспользуемых осушенных торфяников, трудной проходимости и быстрых изменений растительного покрова оптимально использование многоспектральных спутниковых данных, которые хорошо зарекомендовали себя, в том числе для анализа состояния торфяников, см. (McGovern et al., 2000; Медведева и др., 2011; 2017; 2019; Medvedeva et al., 2017; Яновский и Бамбалов, 2014; Cabezas et al., 2015; Яновский, 2017; Sirin et al., 2018; Kalacska et al., 2018; Torabi Haghighi et al., 2018) и др. При этом необходимо проведение мониторинга путем совместного применения дистанционных, картографических методов и наземных обследований на ключевых участках (Курбанов и др., 2010; Маслов и др., 2016). Одновременное рассмотрение большого числа объектов значительной площади с периодичностью не реже 1–2 раз за вегетационный сезон и минимизация субъективности исследователя делают предпочтительным автоматизированный анализ данных. В предлагаемой работе впервые представлен опыт и текущие результаты проводимого с 2010 г. мониторинга растительного покрова объектов обводнения в Московской области.

2. Методы

2.1. Объект

Московская область занимает площадь 44329 км², вместе с Москвой — 46 890 км², превышая площади таких стран как Бельгия или Нидерланды. Северная часть области, где преобладают суглинистые моренные почвы, и обширные песчаные равнины на востоке сильно заболочены. Торфяные болота и осушенные тор-

³ Проект осуществляется под управлением Международной организации по сохранению водно-болотных угодий Wetlands International совместно с Фондом Микаэля Зуккова и Университетом Грайфсвальда (Германия), Институтом лесоведения РАН и его Центром по сохранению и восстановлению болотных экосистем, другими российскими и зарубежными организациями. На 23-й конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Бонн, ноябрь 2017) проект стал одним из четырех победителей в номинации «Здоровье планеты» конкурса «Момент для перемен — 2017», что является признанием важности восстановления болот как одного из наиболее эффективных решений для смягчения последствий изменения климата, <https://www.wetlands.org/news/peatrus-wins-un-momentum-change-award/> [Дата доступа 14.06.2020].

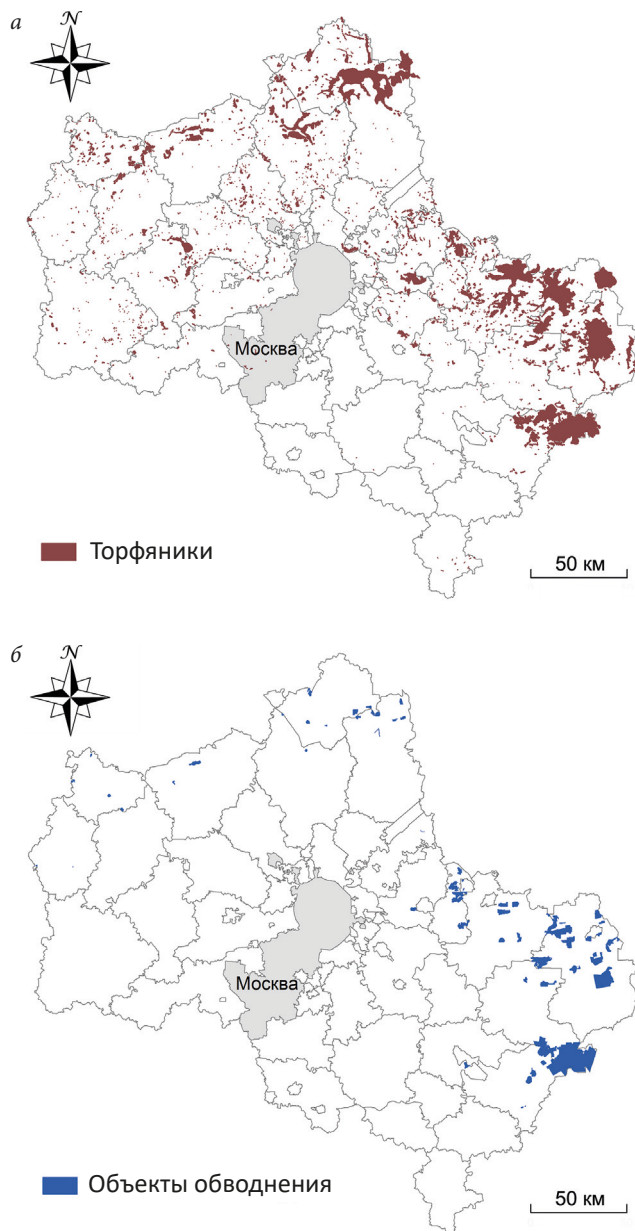


Рис. 1. Торфяные болота и торфяники Московской области (а), объекты обводнения в 2010–2013 гг. (б). Составлено авторами.

фяники занимают более 250 000 га или 6% площади области (Сирин и др., 2014; Sirin et al., 2014) (рис. 1).

С последней четверти XIX века болота в европейской части России начали активно осушаться, а после революции 1917 г., когда из-за Гражданской войны и иностранной интервенции уголь был недоступен, торф стал стратегическим топлив-

ным ресурсом. План электрификации молодого советского государства (ГОЭЛРО) был в значительной степени ориентирован на ресурсы торфа восточной части Московской области, где впоследствии торфяные предприятия стимулировали развитие многих населенных пунктов. Во второй половине XX столетия были также реализованы масштабные программы осушения болот для сельского и лесного хозяйства (Minayeva et al., 2009; Sirin et al., 2017).

Наиболее глубокое воздействие на болота оказала фрезерная добыча торфа, ставшая основным промышленным способом после Второй мировой войны и предусматривающая интенсивное осушение разрабатываемых площадей. После выработки они подлежали рекультивации для различного использования, однако преобладала установка на расширение сельскохозяйственных земель, в том числе за счет частных садоводств, относящихся к землям сельскохозяйственного назначения (Сирин и др., 2011). Отставание темпов рекультивации от добычи торфа и кризис торфяной промышленности в 1990-х гг. привели к образованию в Московской области больших площадей заброшенных фрезерных полей добычи торфа, которые дополнили неиспользуемые торфяники, осушенные для сельского и лесного хозяйства.

Мероприятия по обводнению в Московской области проводились с осени 2010 г. и были завершены в 2013 г. Некоторые из 77 объектов (табл. 1) примыкают друг к другу, и при дальнейшем анализе мы рассматриваем 45 обособленных единых территорий.

Таблица 1. Обводнение пожароопасных торфяников Московской области 2010–2013 гг.

Год	2010	2011	2012	2013	Всего
Количество объектов	9	34	20	14	77
Площадь, га	5108	22 204	31 128	14 609	73 049

Примечание. Таблица составлена по (Информационный выпуск..., 2018).

2.2. Данные дистанционного зондирования

Как показал предшествующий опыт анализа состояния пожароопасных и обводняемых торфяников, наиболее подходящими для этой задачи являются мультиспектральные оптические спутниковые снимки с ближним (NIR) и коротковолновым инфракрасным (SWIR) диапазоном, с высоким пространственным разрешением и большим территориальным покрытием (Медведева и др., 2011; 2017; 2019; Medvedeva et al., 2017; Sirin et al., 2018). Осушенные торфяники отличаются пространственной неоднородностью растительного покрова, что в значительной степени связано с наличием дренажной сети. Расстояние между картовыми каналами при фрезерной добыче торфа составляет обычно 40 м, оно «наследуется» и при их рекультивации для сельского хозяйства. Картовые каналы дополняются другими элементами дренажной сети и могут в разной степени зарастать водно-болотной растительностью. Происходит смешение спектральных характеристик рассматриваемых объектов. Данные Spot-5 с пространственным разрешением 10 м и данные Sentinel-2 с 10–20 м обеспечивают достаточную точность для их анализа, тогда как

данные Landsat-7 и Landsat-8 с 30 м недостаточно точны (Medvedeva et al., 2017; Медведева и др., 2019).

До появления Sentinel-2 наличие спутниковых снимков открытого доступа с высоким пространственным и временным разрешением для близковременного покрытия определенной площади в тысячи квадратных километров и более было скорее исключением. Точность данных низкого разрешения (SPOT4-VEGETATION, MODIS) недостаточна, а данные сверхвысокого разрешения финансово и организационно трудно получить для больших территорий. Landsat со средним пространственным разрешением имеет ограниченную временную частоту (один раз в 16 дней), а облака дополнительно снижают его пригодность. С марта 2017 г. снимки Sentinel-2 доступны с разрешением 10–20 м каждые 3–5 дней, однако облачность также сужает их возможности. До их появления спутниковые данные с высоким разрешением были фрагментарны с точки зрения временного и пространственного охвата. Для Московской области даже коммерческие снимки, сделанные с заданными интервалами и для определенных территорий, не гарантировали успеха при использовании только одной спутниковой системы (Сирин и др., 2014; Маслов и др., 2016). Применение данных двух или более однотипных спутниковых систем, дополняющих друг друга, обеспечивает наилучшее временное и территориальное покрытие территории (O’Connell et al., 2014). На примере тестовых участков Национального парка «Мещера» (Владимирская область) было проведено сравнение результатов классификации с использованием спутниковых данных Spot-5, Spot-6, Landsat-7, Landsat-8 и Sentinel-2. Данные Spot-6 были признаны неприемлемыми (несмотря на более высокое пространственное разрешение) из-за отсутствия коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазона. Для оценки результатов классификации с помощью систематического метода отбора с шагом 100 м в рамках указанных объектов был сформирован набор порядка 500 проверочных участков 20 × 20 м, которые равномерно охватывали все рассматриваемые классы растительного покрова. Результаты классификации оценивались с использованием полных матриц ошибок (Лабутина, 2004; Olofsson et al., 2014). Высокая точность результатов классификации по данным разных приборов показала обоснованность их совместного использования с близкой точностью конечных результатов классификации (Медведева и др., 2019).

Анализ динамики растительного покрова после обводнения требует многолетнего мониторинга, для которого необходимо использование как перспективных, так и ретроспективных данных с различных спутников. Для периода до 2010 г., предшествующего торфяным пожарам, мы использовали данные за вегетационный период 2007 г. (охват 52 %), в т. ч. Spot-4 (49 %), Spot-5 (50 %) и Landsat-5 (1 %), которые были дополнены данными Landsat-5 за 2008 (32 %) и 2009 (16 %) гг. С 2014 г., т. е. после завершения повторного обводнения, мониторинг проводится ежегодно. В 2014 г. территория была полностью охвачена Spot-5. В 2015 г. данные Landsat-8 покрывали лишь 13 % территории из-за облачности, в то время как 87 % были покрыты данными Landsat-7, которые были синтезированы из нескольких снимков для заполнения пробелов в покрытии в виде полос. Данные Sentinel-2 (96 %) и Landsat-8 (4 %) были использованы для 2016 г., Sentinel-2 (8 %) и Landsat-8 (92 %) — для 2017 г., а данные Sentinel-2 — для всей территории в 2018 г. Характеристики используемых спутниковых данных представлены в таблице в прил. 4.2.

2.3. Методика классификации растительного покрова

Основы методики были разработаны ранее в рамках проекта INTAS Thematic Call with ESA Project 06-100025-9182 Remote Sensing Methods for Environmental Assessment of Eurasian Peatlands and Associated Ecosystems under Climate Change (PASCINE) (2006–2008) на примере Национального парка «Мещера» (Владимирская область). Он граничит с востока с Московской областью, характеризуется значительной площадью торфяников, измененных человеком, и является в России пионером масштабных работ по обводнению торфяников для предотвращения пожаров и восстановления болотных экосистем (Медведева и др., 2011; Сирин и др., 2011).

Методика включает в себя выделение шести классов растительного/почвенного покрова (рис. 2), достоверно идентифицируемых по данным мультиспектральной космической съемки и признанных пригодными для оценки состояния пожароопасных и обводненных торфяников: (1) «открытый торф» — участки преимущественно открытого торфа, иногда с редким растительным покровом; (2) «трава» — кипрейные, вейниковые и другие относительно сухолюбивые сообщества, сформировавшиеся на открытом торфе и гарях, а также заброшенные сельскохозяйственные земли; (3) «хвойный лес» — преимущественно с сосной в разном состоянии; (4) «лиственный лес» — древесно-кустарниковые сообщества с ивой и березой, иногда ольхой и осиной; (5) «гидрофильные сообщества» — с рогозом, осокой, тростником и другой водно-болотной растительностью; (6) «водоемы» — открытые водные поверхности, включая образовавшиеся после обводнения. Первые два класса характеризуются самыми низкими уровнями грунтовых вод, периодически высыхающей поверхностью почвы (торфа) и наиболее высокой пожарной опасностью. Третий и четвертый классы занимают промежуточное положение. Пятый и шестой классы являются водно-болотными угодьями и практически не пожароопасны.



Рис. 2. Классы растительного покрова: 1 — «открытый торф»; 2 — «трава»; 3 — «хвойный лес»; 4 — «лиственный лес»; 5 — «гидрофильные сообщества»; 6 — «водоемы». Фото авторов.

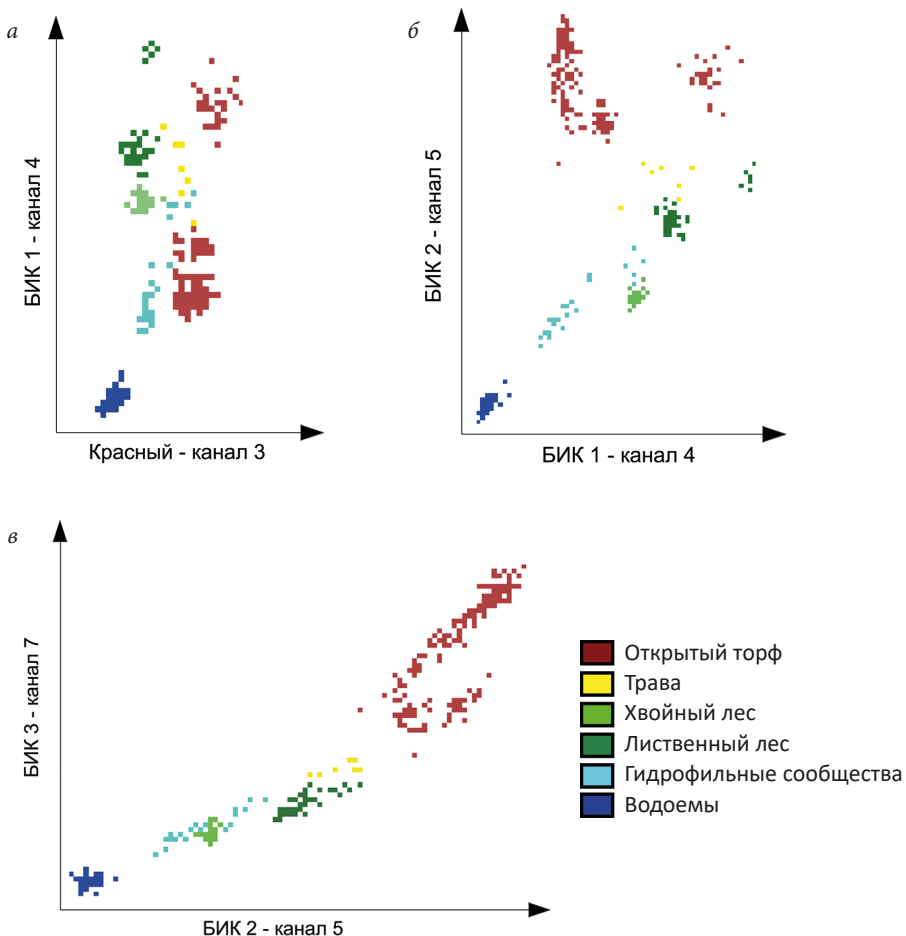


Рис. 3. Распределение различных классов обучающей выборки в двумерном пространстве значений спектральной яркости для различных сочетаний каналов Landsat-7: Красный — БИК 1 (а), БИК 1 — БИК 2 (б) и БИК 2 — БИК 3 (в). Составлено авторами.

При разработке и первоначальной апробации методики по данным Landsat-7 было установлено, что в красных (RED) и ближних инфракрасных БИК 1 (NIR) спектральных диапазонах классы не очень хорошо разделяются (рис. 3, а). Наличие коротковолновых инфракрасных каналов БИК 2 и БИК 3 (SWIR) позволяют лучше всего разделить анализируемые классы, что видно на рис. 3, б и в (Медведева и др., 2011; 2017; 2019; Medvedeva et al., 2017; Sirin et al., 2018).

При мониторинге Московской области после предварительной обработки снимков (при необходимости геометрической и атмосферной коррекции) для каждого установленного класса на основе имеющихся наземных данных и визуального экспертного анализа использовались опорные наземные площади (однородные, средняя площадь 2 га), представляющие собой 12 участков в Национальном парке «Мещера» и 39 — на Дубненском болотном массиве в Талдомском р-не Московской обл. (56°42' с.ш., 37°50' в.д.), часть которого в 1979 г. была осушена для добычи

торфа с расстоянием между картовыми каналами 40 м и впоследствии частично рекультивирована под сенокосы и выращивание овощных культур (Чистотин и др., 2006; Суворов и др., 2015).

С использованием этих опорных данных в качестве обучающей выборки была проведена попиксельная классификация с обучением на базе программного пакета Erdas Imagine (Erdas Imagine Inc., США) методом минимального расстояния. Перед проведением классификации с обучением на каждом спутниковом снимке определялись эталонные области (обучающая выборка на основе наземных данных) для каждого установленного класса.

При классификации по минимальному расстоянию Minimum Distance пакета Erdas Imagine в качестве признака применяется евклидово расстояние между анализируемой точкой в признаковом пространстве и центрами групп, которое вычисляется по формуле:

$$D(X_j, X_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{ki} - X_{kj})^2},$$

где N — размерность пространства, X_{ki} , X_{kj} — значения объектов i и j в k -м измерении. При этом наиболее элементарном параметрическом правиле разделение пары классов происходит по серединному перпендикуляру к соединяющей их центры прямой (Erdas Imagine Inc., 1997; Чабан, 2006; Манылов, 2011).

При использовании объектно-ориентированного интерактивного метода классификации (Dronova, 2015) программного пакета ScanEx Image Processor (ИТЦ СканЭкс, Россия) была получена аналогичная точность итоговых классификаций. Точность выделения рассматриваемых классов земного покрова анализировалась за 2016 г. для наборов данных Landsat-8 и Sentinel-2 с использованием двух методов классификации: объектно-ориентированного метода и метода минимального расстояния. Была получена достаточно высокая и близкая общая точность всех четырех результатов классификации. Наиболее высокая точность была получена по данным Sentinel-2 методом минимального расстояния (97%), на втором месте по общей точности Sentinel-2 с объектно-ориентированным методом (95.5%), на третьем месте Landsat-8 с методом минимального расстояния (95.2%) и завершает группу результат данных Landsat-8 с объектно-ориентированным методом (94%) (Sirin et al., 2018). При анализе состояния торфяников за 2015 г. использовались данные Landsat-7 с характерными для них пропусками в виде полос. Цельное изображение синтезировалось из классифицированных трех имеющихся изображений за 27.05.2015, 22.08.2015 и 24.08.2015 (прил. 4.3).

Для устранения выявленных ранее затруднений при разделении классов «лиственный лес» и «трава», а также «хвойный лес» и «гидрофильные сообщества» (Медведева и др., 2011; Sirin et al., 2018), были дополнительно использованы данные за снежный период, что позволило более эффективно отделить покрытую снегом нелесную территорию от лесных с уже опавшим с крон снегом путем разбиения изображения на 10 классов, используя классификацию ISODATA (Маслов и др., 2016). Зимой классы «трава» и «лиственный лес», а также «гидрофильные сообщества» и «хвойный лес» существенно различались.

2.4. Наземная проверка классификации

Для проверки полученных результатов (Olofsson et al., 2014) в июне – сентябре 2017 г. было проведено наземное обследование 12 из 45 объектов обводнения общей площадью 39 014 га. Случайным образом было выбрано 258 участков средней площадью 150 м² с однородной растительностью, для которых были определены координаты, сделаны описания и фотографии. Общая длина автомобильных маршрутов составила около 2 тыс. км, пеших — около 25 км. Проверочные участки равномерно охватывали все рассматриваемые классы растительного покрова. Результаты классификации были оценены с использованием полных матриц ошибок (Лабутина, 2004), в которых используется кросс-табуляция для установления соответствий между полученными разными способами значениями идентичных классов. Исходными могут быть набор проверяемых классов полученной классификации спутниковой съемки и опорные спутниковые данные более высокого пространственного разрешения или набор полевых данных в виде точек. При формировании матрицы возможно использование точек, выбранных с систематическим распределением или случайным образом.

3. Результаты

3.1. Точность классификации

Достаточно высокая точность классификации была получена для классов «хвойный лес» (82.4%), «лиственный лес» (86.1%) и «водоемы» (96.4%) и приемлемая — для класса «открытый торф» (78.3%) (табл. 2). Изначально точность определения классов «трава» (67.9%) и «гидрофильные сообщества» (66.7%) была недостаточной. Класс «трава» часто ошибочно определялся как «лиственный лес», а класс «гидрофильные сообщества» — как «хвойный лес». С использованием зимних снимков точность для класса «трава» увеличилась до 93.8%, «гидрофильные сообщества» — до 86.7%, «лиственный лес» — до 93.7%.

3.2. Изменение растительного покрова

Изменения растительного покрова иллюстрирует пример массива «Туголесский бор» в Шатурском районе площадью 8714.9 га, который был обводнен в 2013 г. (рис. 4). Основной тенденцией стала замена класса «открытый торф» (коричневый) на класс «трава» (желтый) в результате зарастания растительностью и замена класса «трава» на «хвойный лес» (светло-зеленый) и «лиственный лес» (темно-зеленый). Этот результат является достаточно характерным примером реакции растительного покрова, но изменения на других объектах могут, конечно, варьировать. Необходимо также учитывать, что эти изменения могут быть отнесены к совокупному влиянию послепожарных сукцессий растительности и водного режима после обводнения.

В целом для 73 049 га всех объектов обводнения за 2009–2014 гг. площадь класса «трава» увеличилась с 31 до 45%, а для классов «гидрофильные сообщества» + «водоемы» видно увеличение совокупной площади с 7.6 до 12.1% (рис. 5). Площадь класса «хвойный лес» сократилась с 9.1 до 4.3%, «лиственный лес» — с 48

Таблица 2. Полные матрицы ошибок и точность результатов классификации летних данных (верхняя таблица) и летних вместе с зимними (нижняя таблица) относительно наземных данных за 2017 г.

Классы	Наземные данные								
	Летние данные ДЗЗ	Открытый торф	Трава	Хвойный лес	Лиственный лес	Гидрофильные сообщества	Водоемы	Σ	Точность пользователя, %
Открытый торф	18	0	0	0	0	0	0	18	100.0
Трава	5	55	0	10	3	0	73	75.3	
Хвойный лес	0	0	14	0	6	0	20	70.0	
Лиственный лес	0	26	3	68	1	0	98	69.4	
Гидрофильные сообщества	0	0	0	1	20	1	22	90.9	
Водоемы	0	0	0	0	0	27	27	100.0	
Σ	23	81	17	79	30	28	258		
Точность производителя, %	78.3	67.9	82.4	86.1	66.7	96.4		78.29*	

Классы	Наземные данные								
	Летние и зимние данные ДЗЗ	Открытый торф	Трава	Хвойный лес	Лиственный лес	Гидрофильные сообщества	Водоемы	Σ	Точность пользователя, %
Открытый торф	18	0	0	0	0	0	0	18	100.0
Трава	5	76	0	5	4	0	90	84.4	
Хвойный лес	0	0	14	0	0	0	14	100.0	
Лиственный лес	0	5	3	74	0	0	82	90.2	
Гидрофильные сообщества	0	0	0	0	26	1	27	96.3	
Водоемы	0	0	0	0	0	27	27	100.0	
Σ	23	81	17	79	30	28	258		
Точность производителя, %	78.3	93.8	82.4	93.7	86.7	96.4		91.09*	

Примечание. * — общая точность классификации. «Точность пользователя» — вероятность совпадения реального класса с результатами классификации, «точность производителя» — точность определения расчетных классов. Таблица составлена по материалам авторов.

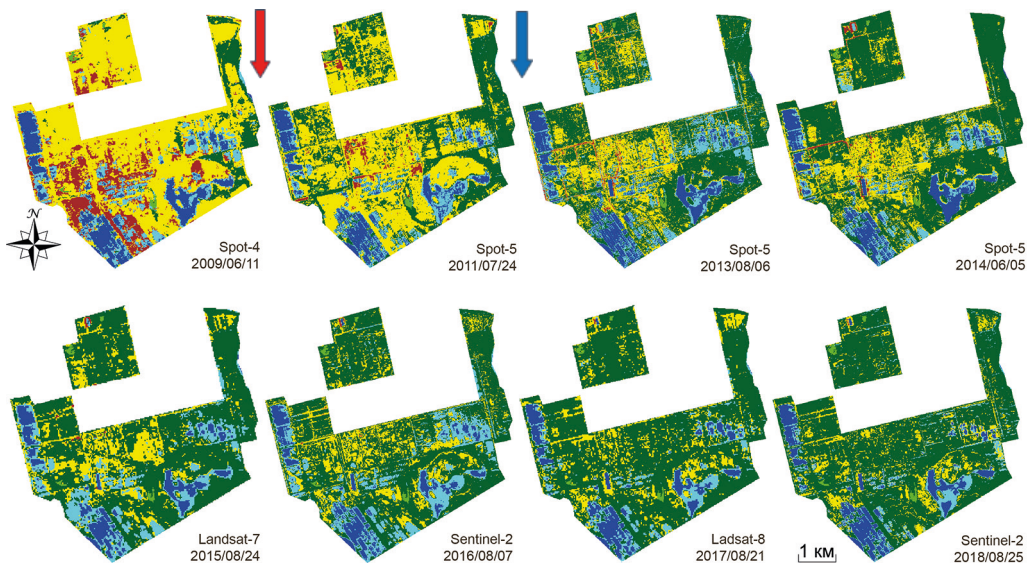


Рис. 4. Изменение растительного покрова после пожаров 2010 г. и обводнения в 2013 г. на при- мере массива «Туголесский бор» (8714.9 га). Обозначение классов см. на рис. 3. Красная стрелка — пожары, синяя — мероприятия по обводнению. Составлено авторами.

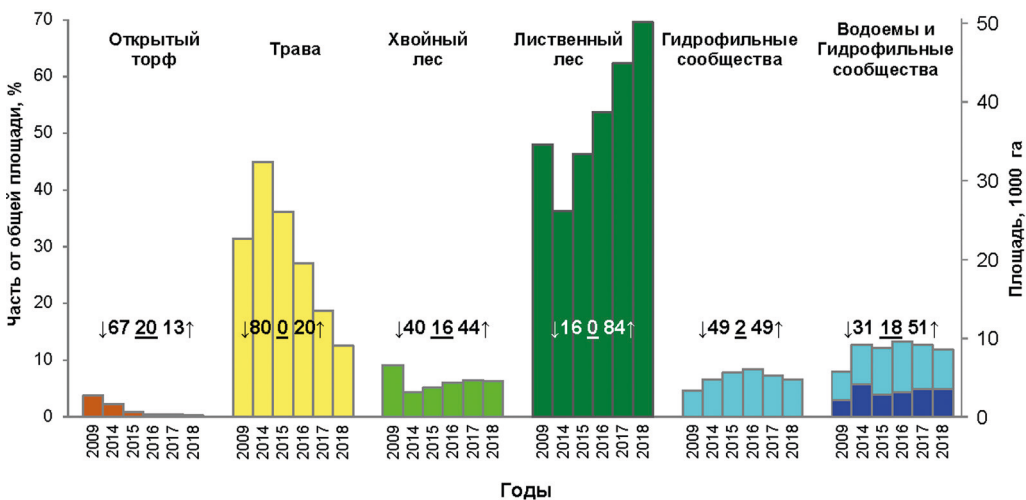


Рис. 5. Изменение доли и абсолютных значений площади классов растительного покрова за период 2009–2018 гг. на 73 049 га обводненных торфяников в Московской области (по материалам авторов). Цифры на графике показывают процентное соотношение для 45 обводненных территорий, где соответствующий класс показал снижение (↓), отсутствие изменений (—) или увеличение (↑) занятой площади объекта. Обозначение классов см. на рис. 3. Составлено авторами.

до 36%, «открытый торф» — с 3.7 до 2.3%. Эти изменения отражают совокупное воздействие торфяных пожаров, послепожарных сукцессий и повторного увлажнения.

Если рассматривать изменение растительного покрова только за период после обводнения (т. е. за 2014–2018 гг.), то площадь класса «открытый торф» сократилась с 2.3 до 0.3 %, а площадь класса «трава» — с 45 до 13 %. Площадь класса «хвойный лес» увеличилась с 4.3 до 6.3 %, а «лиственный лес» — с 36 до 70 %. Совокупная площадь классов «гидрофильные сообщества» и «водоемы» изменилась незначительно. Наблюдаемые в разные годы небольшие колебания, особенно класса «гидрофильные сообщества», могут быть связаны с изменением погодно-климатических условий в отдельные годы. Общая динамика в основном определялась изменениями, происходившими на двух наиболее обширных объектах, которые составляют 54 % всей площади обводненных торфяников Московской области.

На каждом из рассматриваемых 45 объектов анализировалась динамика перечисленных классов растительного покрова. Так, для класса «открытый торф» на 13 % объектов отмечено увеличение площади, на 67 % — сокращение; для класса «трава» эти показатели составили 20 и 80 %, «хвойный лес» — 44 и 40 %, «лиственный лес» — 84 и 16 %, «гидрофильные сообщества» — 49 и 49 %, «водоемы» — 51 и 31 % соответственно (рис. 5).

4. Обсуждение результатов

Учитывая масштаб проблемы и распространение неиспользуемых осушенных торфяников в России и других странах, необходимо определить приоритетность участков, подлежащих повторному обводнению, а также организовать последующий мониторинг объектов обводнения для оценки эффективности проводимых мероприятий.

Мониторинг состояния осушенных заброшенных торфяников помогает определить наиболее пожароопасные участки, включая те, которые требуют приоритетных мер по обводнению. Восстановление водно-болотных угодий не является мгновенным и может проявляться в течение многих лет. Необходим долгосрочный мониторинг, который не может быть осуществлен с использованием только одного спутника. Одни спутники сходят с дежурства, другие начинают работать. Обеспечение наблюдений хотя бы раз за пожароопасный сезон (с весны по осень) также требует использования более одного аппарата.

Изменения растительного покрова на обводненных торфяниках Московской области были связаны как с торфяными пожарами 2010 г., так и с последующими мероприятиями по обводнению с соответствующей реакцией растительности на изменение гидрологического режима. Несмотря на существенные изменения растительного покрова, они не имеют окончательного характера и будут продолжаться, способствуя, в том числе, снижению пожарной опасности территории. Стоит отметить, что участки с лесной растительностью («хвойный лес» и «лиственный лес») сохраняют риски в случае неблагоприятных погодных условий и появления очагов пожаров.

Используемые классы растительности показали достаточную информативность для оценки пожарной опасности торфяников. Они также могут быть использованы в качестве пространственной основы для оценки сокращения эмиссии парниковых газов после обводнения (IPCC, 2014; Wilson et al., 2016), восстановления биоразнообразия (Minayeva et al., 2017), других экосистемных функций болот. Об-

воднение вносит значительный вклад в снижение опасности торфяных пожаров, и можно предположить, что дальнейшие изменения растительного покрова усилят этот положительный эффект.

5. Заключение

Неиспользуемые осушенные торфяники представляют наибольшую опасность с точки зрения торфяных пожаров. Особенно это касается заброшенных без рекультивации полей фрезерной добычи торфа, максимальные площади которых расположены в Московской области. Наиболее эффективный путь снижения пожарной опасности и улучшения экологического состояния таких земель при отсутствии экономических оснований их хозяйственного использования — обводнение и искусственное заболачивание.

Для этого необходимы определение первоочередных объектов обводнения и их последующий мониторинг для оценки эффективности проводимых мероприятий. Такие объекты могут иметь значительные размеры, быть труднопроходимыми и сложными для наземного картографирования. Пожары и обводнение способствуют быстрым изменениям растительного покрова. Для мониторинга повторно обводненных торфяников необходимы данные дистанционного зондирования Земли, прежде всего — мультиспектральные спутниковые данные. Большое число объектов, их разброс в пространстве, а также необходимость многолетних наблюдений требуют комбинирования данных различных спутников.

Результаты мониторинга более 73 тыс. га торфяников в Московской области, обводненных в 2010–2013 гг. после пожаров 2010 г., показали сокращение площадей открытого торфа и сухолюбивой травяной растительности, незначительные изменения площадей, занятых древесной хвойной, и поступательное расширение площади, занятой лиственной растительностью, увеличение после обводнения и последующее поддержание совместной площади гидрофильных сообществ и открытой воды.

Разработанная и апробированная методика позволяет оценить эффективность обводнения торфяников в целях снижения опасности торфяных пожаров, а также выявлять участки, требующие дополнительных мероприятий. Совместное использование зимних снимков со снежным покровом и летних данных позволяет значительно повысить точность определения классов земного покрова. Предложенный алгоритм обеспечивает достоверное выделение в полуавтоматическом режиме 6 классов растительного/почвенного покрова, различающихся уровнем пожароопасности и основными экологическими характеристиками, определяющими потоки парниковых газов, биологическое разнообразие и другие экосистемные функции.

Литература

- Вомперский, С. Э., Глухова, Т. В., Смагина, М. В., Ковалев, А. Г. (2007). Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах. *Лесоведение*, (6), 35–44.
- Вомперский, С. Э., Иванов, А. И., Цыганова, О. П., Валяева, Н. А., Глухова, Т. В., Дубинин, А. И., Глухов, А. И., Маркелова, Л. Г. (1994). Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах. *Почвоведение*, (12), 17–25.

- 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), 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), 21–33.
- Глухова, Т.В., Сирин, А.А. (2018). Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте. *Почвоведение*, (5), 580–588.
- Информационный выпуск «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2017 году». (2018). Красногорск: Министерство экологии и природопользования Московской области.
- Курбанов, Э.А., Губаев, А.В., Воробьев, О.Н., Лежнин, С.А. (2010). Использование космических снимков ALOS для выявления площадей бывших сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесом. *Геоматика*, (4), 68–72.
- Лабутина, И.А. (2004). *Дешифрирование аэрокосмических снимков: Учеб. пособие для студентов вузов*. Москва: Аспект Пресс.
- Манылов, И.В. (2011). Оценка точности распознавания классов при автоматизированной обработке аэрофотоснимков. *Известия ВУЗов. Приборостроение*, 54 (5), 35–39.
- 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), 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), 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), 76–84. <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), 150–159. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159>
- Минаева, Т.Ю., Сирин, А.А. (2002). Торфяные пожары — причины и пути предотвращения. *Наука и промышленность России*, (9), 3–8.
- Порфирьев, Б.Н. (2013). Экономическая оценка людских потерь в результате чрезвычайных ситуаций. *Вопросы экономики*, (1), 48–68.
- Ревич, Б.А., Шапошников, Д.А., Першаген, Г. (2015). Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.). *Профилактическая медицина*, (5), 29–33. <https://doi.org/10.17116/profmed201518529-33>
- Сирин, А.А. (2017). Болота. В: Н.С.Касимов, В.С.Тикун, под ред., *Экологический атлас России*. Москва: Феория, 118–121.
- 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), 410–422. <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>
- 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), 65–71.
- Сирин, А.А., Минаева, Т.Ю. (ред.) (2001). *Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации*. Москва: ГЕОС.
- Сирин, А.А., Минаева, Т.Ю., Возбранная, А.Е., Барталев, С.А. (2011). Как избежать торфяных пожаров? *Наука в России*, (2), 13–21.
- Суворов, Г.Г., Чистотин, М.В., Сирин, А.А. (2015). Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области. *Агрехимия*, (11), 51–62.

- Чабан, Л. Н. (2006). *Тематическая классификация многозональных (многослойных) изображений в пакете ERDAS Imagine: Методические указания для лабораторного практикума*. Москва: МИИГАиК.
- 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. *Агрехимия*, (6), 54–62.
- Яновский, А. А. (2017). Дистанционная оценка спектрального коэффициента отражения поверхности осушенных торфяных почв Полесья по спутниковым снимкам среднего пространственного разрешения. *Исследования Земли из космоса*, (5), 35–48. <https://doi.org/10.7868/S0205961417050049>
- Яновский, А. А., Бамбалов, Н. Н. (2014). Автоматизация картографирования деградированных торфяных почв Беларуси по спутниковым снимкам среднего пространственного разрешения. *Природопользование*, (26), 92–100.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M. and García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332, 220–224. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>
- Bonn, A., Reed, M. S., Evans, C. D., Joosten, H., Bain, C., Farmer, J., Emmer, I., Couwenberg, J., Moxey, A., Artz, R., Tanneberger, F., von Unger, M., Smyth, M.-A. and Birnie, D. (2014). Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosystem Services*, 9, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Cabezas, J., Galleguillos, M., Valdés, A., Fuentes, J. P., Pérez, C. and Perez-Quezada, J. F. (2015). Evaluation of impacts of management in an anthropogenic peatland using field and remote sensing data. *Ecosphere*, 6 (12), 282. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.3308796.v1>
- Davies, G. M., Gray, A., Rein, G. and Legg, C. J. (2013). Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. *Forest Ecology and Management*, 308, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.051>
- Dronova, I. (2015). Object-Based Image Analysis in Wetland Research: A Review. *Remote Sensing*, 7, 6380–6413. <https://doi.org/10.3390/rs8060462>
- Erdas Imagine Inc. (1997). *ERDAS Imagine: user's guide*. Atlanta, Georgia.
- Gibson, C. M., Chasmer, L. E., Thompson, D. K., Quinton, W. L., Flannigan, M. D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications*, 9, 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
- Granath, G., Moore, P. A., Lukenbach, M. C. and Waddington, J. M. (2016). Mitigating wildfire carbon loss in managed Northern peatlands through restoration. *Scientific Reports*, 6, 28498–28507. <https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Greifswaldmoor.de (2012). *Global Peatland Database of Greifswald Mire Centre*. [online] Available at: <https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html> [Accessed 15 Jun. 2020].
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T. G. (eds.) (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Switzerland: IPCC.
- Hu, Y., Fernandez-Anez, N., Smith, T. E. L. and Rein, G. (2018). Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes. *International Journal of Wildland Fire*, 27, 293–312. <https://doi.org/10.1071/WF17084>
- Huang, X. and 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.
- Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J. and Smith, P. (2016). The role of peatlands in climate regulation. In: A. Bonn, T. Allott, M. Evans, H. Joosten, R. Stoneman, ed., *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 66–79. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Kalacska, M., Arroyo-Mora, J. P., Soffer, R. J., Roulet, N. T., Moore, T. R., Humphreys, E., Leblanc, G., Lucanus, O. and Inamdar, D. (2018). Estimating Peatland Water Table Depth and Net Ecosystem Exchange: A Comparison between Satellite and Airborne Imagery. *Remote Sensing*, 10, 687. <https://doi.org/10.3390/rs10050687>
- Kettridge, N., Turetsky, M. R., Sherwood, J. H., Thompson, D. K., Miller, C. A., Benschoter, B. W., Flannigan, M. D., Wotton, B. M. and Waddington, J. M. (2015). Moderate drop in water table increases

- peatland vulnerability to post-fire regime shift. *Scientific Reports*, 5, 8063. <https://doi.org/10.1038/srep08063>
- Konovalov, I. B., Beekmann, M., Kuznetsova, I. N., Yurova, A. and Zvyagintsev, A. M. (2011). Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 10031–10056. <https://doi.org/10.5194/ACP-11-10031-2011>
- McGovern, E. A., Holden, N. M., Ward, S. M. and Collins, J. F. (2000). Remotely sensed satellite imagery as an information source for industrial peatlands management. *Resources, Conservation and Recycling*, 28, 67–83. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00034-8)
- Medvedeva, M. A., Vozbrannaya, A. E., Sirin, A. A. and 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. *Izvestiia, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53, 1072–1080. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090201>
- Minayeva, T. Y., Bragg, O. M. and Sirin, A. A. (2017). Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity. *Mires and Peat*, 19, 1–36. <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Minayeva, T., Sirin, A. and Bragg, O. (eds.) (2009). *A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe*. Wageningen: Wetlands International.
- Minayeva, T., Sirin, A. and Stracher, G. B. (2013). The Peat Fires of Russia. In: G. B. Stracher, A. Prakash, E. V. Sokol, ed., *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V.2: Photographs and Multimedia Tours*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 375–394.
- O'Connell, J., Connolly, J. and Holden, N. M. (2014). A monitoring protocol for vegetation change on Irish peatland and heath. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.006>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. and Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D., Jaya, A. and Limin, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420, 61–65. <https://doi.org/10.1038/NATURE01131>
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. and Stringer, L. (eds.) (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*. [main report] Global Environment Centre and Wetlands International. Kuala Lumpur, Wageningen.
- Poulter, B., Christensen, N. L. and Halpin, P. N. (2006). Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research*, 111 (D6), D06301. <https://doi.org/10.1029/2005JD006455>
- Rein, G. (2013). Smouldering fires and natural fuels. In: C. M. Belcher, ed., *Fire Phenomena in the Earth System*. New York: Wiley, 15–34. <https://doi.org/10.1002/9781118529539.CH2>
- Safronov, A., Fokeeva, E., Rakitin, V., Grechko, E. and Shumsky, R. (2015). Severe Wildfires near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations. *Remote Sensing*, 7, 395–429. <https://doi.org/10.3390/rs70100395>
- Schulte, M. L., Daniel, L., McLaughlin, D. L., Wurster, F. C., Varner, J. M., Stewart, R. D., Aust, W. M., Jones, C. N. and Gile, B. (2019). Short- and long-term hydrologic controls on smouldering fire in wetland soils. *International Journal of Wildland Fire*, 28, 177–186. <https://doi.org/10.1071/WF18086>
- Sirin, A., Medvedeva, M., Maslov, A. and Vozbrannaya, A. (2018). Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data. *Land*, 7 (71), 1–22. <https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Sirin, A., Minayeva, T., Yurkovskaya, T., Kuznetsov, O., Smagin, V. and Fedotov, Y. U. (2017). Russian Federation (European Part). In: H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen, ed., *Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 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. et al. (2017). The peatland map of Europe. *Mires and Peat*, 19, 1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>

- Torabi Haghighi, A., Menberu, M., Darabi, H., Akanegbu, J. and Klöve, B. (2018). Use of remote sensing to analyse peatland changes after drainage for peat extraction. *Land Degradation & Development*, 29 (10), 3479–3488. <https://doi.org/10.1002/ldr.3122>
- Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G. R. and Watts, A. (2015). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8 (1), 11–14. <https://doi.org/10.1038/NNGEO2325>
- Vompersky, S. E., Ivanov, A. I., Tsyganova, O. P., Glukhova, T. V., Dubinin, A. I., Glukhov, A. I. and Markelova, L. G. (1996). Bog organic soils and bogs of Russia and carbon pool of their peats. *Eurasian Soil Science*, 28 (2), 91–105.
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C. D., Murdiyarsa, D., Page, S. E., Renou-Wilson, F., Rieley, J. O., Sirin, A., Strack, M. and Tuittila, E.-S. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, 17, 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>

Статья поступила в редакцию 18 августа 2019 г.
Статья рекомендована в печать 10 февраля 2020 г.

Контактная информация:

Сирин Андрей Артурович — sirin@ilan.ras.ru
 Медведева Мария Андреевна — eeveza@yandex.ru
 Макаров Дмитрий Александрович — scorpionstigr@mail.ru
 Маслов Александр Анатольевич — amaslov@ilan.ras.ru
 Юстен Ханс — joosten@uni-greifswald.de

Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast*

A. A. Sirin¹, M. A. Medvedeva¹, D. A. Makarov¹, A. A. Maslov¹, H. Joosten²

¹ Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences,
21, ul. Sovetskaya, p/o Uspenskoe, Moscow Region, 143030, Russian Federation

² Greifswald University, Institute of Botany and Landscape Ecology,
15, Soldmannstrasse, Greifswald, D-17487, Germany

For citation: Sirin, A. A., Medvedeva, M. A., Makarov, D. A., Maslov, A. A., Joosten, H. (2020). Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow Oblast. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (2), 314–336. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206> (In Russian)

Abandoned drained peatlands pose the greatest danger in terms of peat fires. This is especially true of abandoned, unrestored peat milling fields, the maximum areas of which are located in Moscow Oblast. The most effective way to reduce the fire hazard and improve the ecological condition of such lands in the absence of economic reasons for their use is rewetting and peatland restoration. It is necessary to prioritize objects for rewetting and to monitor the effectiveness of measures taken. Such objects can be of considerable size, difficult to pass and not amenable to ground mapping. Fires and rewetting contribute to rapid changes in vegetation cover. Their monitoring requires remote sensing data and, above all, multispectral satellite data. The large number of objects, their spatial distribution and the need for multi-year observations require a combination of data from different satellites. We present the experience of monitoring more than 73 thousand hectares of peatlands in Moscow Oblast rewetted in 2010–2013 after the fires of 2010. Current results show a reduction in the areas of open peat and dry grass vegetation, insignificant changes in the areas occupied by coniferous

* This research was supported by Russian-German project no. 11 III 040 RUS K "Peatlands restoration" and Russian Science Foundation (project no. 19-74-20185).

trees and progressive expansion of the area occupied by deciduous trees and shrubs, as well as an increase of hydrophilic communities and open water after rewetting and subsequent maintenance of the area. The developed and tested methodology makes it possible to assess the effectiveness of peatland rewetting to reduce the risk of peat fires, as well as to identify areas requiring additional measures. The proposed algorithm ensures reliable allocation in semi-automatic mode of 6 classes of vegetation/land cover, different in fire hazard and basic environmental characteristics that determine the fluxes of greenhouse gases, biodiversity and other ecosystem functions.

Keywords: peat fires, ecological security, multispectral remote sensing, peatland restoration.

References

- Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M. and García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332, 220–224. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>
- Bonn, A., Reed, M.S., Evans, C.D., Joosten, H., Bain, C., Farmer, J., Emmer, I., Couwenberg, J., Moxey, A., Artz, R., Tanneberger, F., von Unger, M., Smyth, M.-A. and Birnie, D. (2014). Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosystem Services*, 9, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Cabezas, J., Galleguillos, M., Valdés, A., Fuentes, J.P., Pérez, C. and Pérez-Quezada, J.F. (2015). Evaluation of impacts of management in an anthropogenic peatland using field and remote sensing data. *Ecosphere*, 6 (12), 282. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.3308796.v1>
- Chaban, L.N. (2006). Thematic classification of multizonal (multilayer) images in the ERDAS Imagine: Guidelines for laboratory training. Moscow: Moscow State University of Geodesy and Cartography. (In Russian)
- Chistotin, M.V., Sirin, A.A. and Dulov, L.E. (2006). Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane emission from a peatland in Moscow region drained for peat extraction and agricultural use. *Agrokimiia*, (6), 54–62. (In Russian)
- Davies, G.M., Gray, A., Rein, G. and Legg, C.J. (2013). Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. *Forest Ecology and Management*, 308, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.051>
- Dronova, I. (2015). Object-Based Image Analysis in Wetland Research: A Review. *Remote Sensing*, 7, 6380–6413. <https://doi.org/10.3390/rs8060462>
- Erdas Imagine inc. (1997). *ERDAS Imagine: user's guide*. Atlanta, Georgia.
- Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications*, 9, 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
- Glukhova, T.V. and Sirin, A.A. (2018). Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. *Eurasian Soil Science*, 51 (5), 542–549. <https://doi.org/10.1134/S1064229318050034>
- Granath, G., Moore, P.A., Lukenbach, M.C. and Waddington, J.M. (2016). Mitigating wildfire carbon loss in managed Northern peatlands through restoration. *Scientific Reports*, 6, 28498–28507. <https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Greifswaldmoor.de (2012). *Global Peatland Database of Greifswald Mire Centre*. [online] Available at: <https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html> [Accessed 15 Jun. 2020].
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds.) (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Switzerland: IPCC.
- Hu, Y., Fernandez-Anez, N., Smith, T.E.L. and Rein, G. (2018). Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes. *International Journal of Wildland Fire*, 27, 293–312. <https://doi.org/10.1071/WF17084>
- Huang, X. and 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.

- Information issue "On the State of Natural Resources and the Environment of the Moscow Region in 2017". (2018). Krasnogorsk: Ministry of Ecology and Nature Management of the Moscow Region Publ. (In Russian)
- Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J. and Smith, P. (2016). The role of peatlands in climate regulation. In: A. Bonn, T. Allott, M. Evans, H. Joosten, R. Stoneman., ed., *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 66–79. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Kalacska, M., Arroyo-Mora, J.P., Soffer, R.J., Roulet, N.T., Moore, T.R., Humphreys, E., Leblanc, G., Lucanus, O. and Inamdar, D. (2018). Estimating Peatland Water Table Depth and Net Ecosystem Exchange: A Comparison between Satellite and Airborne Imagery. *Remote Sensing*, 10, 687. <https://doi.org/10.3390/rs10050687>
- Kettridge, N., Turetsky, M.R., Sherwood, J.H., Thompson, D.K., Miller, C.A., Benscoter, B.W., Flannigan, M.D., Wotton, B.M. and Waddington, J.M. (2015). Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift. *Scientific Reports*, 5, 8063. <https://doi.org/10.1038/srep08063>
- Konovalov, I.B., Beekmann, M., Kuznetsova, I.N., Yurova, A. and Zvyagintsev, A.M. (2011). Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 10031–10056. <https://doi.org/10.5194/ACP-11-10031-2011>
- Kurbanov, E. A., Gubaev, A. V., Vorobyov, O. N. and Lezhnin, S. A. (2010). Use of ALOS satellite images to reveal former farmland areas being forested. *Geomatika*, (4), 68–72. (In Russian)
- Labutina, I. A. (2004). *Interpretation of remote sensing images: A textbook for university students*. Moscow: Aspekt Press Publ. (In Russian)
- Manylov, I. V. (2011). Estimate of type recognition accuracy of automated processing of aerial photographs. *Izvestiia VUZov. Priborostroenie*, 54 (5), 35–39. (In Russian)
- Maslov, A., Gulbe, A., Gulbe, Ya., Medvedeva, M. and Sirin, A. (2016). Evaluation of current situation with regard to abandoned farmlands reforestation: Example from Uglich district, Yaroslavl region. *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, (4), 6–14. (In Russian)
- McGovern, E. A., Holden, N. M., Ward, S. M. and Collins, J. F. (2000). Remotely sensed satellite imagery as an information source for industrial peatlands management. *Resources, Conservation and Recycling*, 28, 67–83. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00034-8)
- Medvedeva, M. A., Vozbrannaya, A. E., Bartalev, S. A. and Sirin, A. A. (2011). Multispectral remote sensing for assessing changes on abandoned peat extraction lands. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, (5), 80–88. (In Russian)
- Medvedeva, M. A., Vozbrannaya, A. E., Sirin, A. A. and 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. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, (3), 76–84. <https://doi.org/10.7868/S0205961417020051> (In Russian)
- Medvedeva, M. A., Vozbrannaya, A. E., Sirin, A. A. and 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. *Izvestiia, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53, 1072–1080. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090201>
- Medvedeva, M. A., Vozbrannaya, A. E., Sirin, A. A. and Maslov, A. A. (2019). Possibilities of different multispectral satellite data for monitoring of abandoned fire hazardous peatlands and effectiveness of their rewetting. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 16 (2), 150–159. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159> (In Russian)
- Minayeva, T. Y., Bragg, O. M. and Sirin, A. A. (2017). Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity. *Mires and Peat*, 19, 1–36. <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Minayeva, T. Y. and Sirin, A. A. (2002). Peat fires — causes and ways of prevention. *Nauka i promyshlennost' Rossii*, (9), 3–8. (In Russian)
- Minayeva, T., Sirin, A. and Bragg, O. (eds.) (2009). *A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe*. Wageningen: Wetlands International.
- Minayeva, T., Sirin, A. and Stracher, G. B. (2013). The Peat Fires of Russia. In: G. B. Stracher, A. Prakash, E. V. Sokol, ed., *Coal and Peat Fires: A Global Perspective. V.2: Photographs and Multimedia Tours*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 375–394.

- O'Connell, J., Connolly, J. and Holden, N.M. (2014). A monitoring protocol for vegetation change on Irish peatland and heath. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.006>
- Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E. and Wulder, M.A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Page, S.E., Siegfert, F., Rieley, J.O., Boehm, H.D., Jaya, A. and Limin, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420, 61–65. <https://doi.org/10.1038/NATURE01131>
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. and Stringer, L. (eds.) (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*. [main report] Global Environment Centre and Wetlands International. Kuala Lumpur, Wageningen.
- Porfiriev, B.N. (2013). Economic Evaluation of Human Losses from Disasters. *Voprosy ekonomiki*, (1), 48–68. (In Russian)
- Poulter, B., Christensen, N.L. and Halpin, P.N. (2006). Carbon emissions from a temperate peat fire and its relevance to interannual variability of trace atmospheric greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research*, 111 (D6), D06301. <https://doi.org/10.1029/2005JD006455>
- Rein, G. (2013). Smouldering fires and natural fuels. In: C.M. Belcher, ed., *Fire Phenomena in the Earth System*. New York: Wiley, 15–34. <https://doi.org/10.1002/9781118529539.CH2>
- Revich, B.A., Shaposhnikov, D.A. and Pershagen, G. (2015). New epidemiological model for assessment of the impact of extremely hot weather and air pollution on mortality (in case of the Moscow heat wave of 2010). *Profilakticheskaja meditsina*, (5), 29–33. <https://doi.org/10.17116/profmed201518529-33> (In Russian)
- Safronov, A., Fokeeva, E., Rakitin, V., Grechko, E. and Shumsky, R. (2015). Severe Wildfires near Moscow, Russia in 2010: Modeling of Carbon Monoxide Pollution and Comparisons with Observations. *Remote Sensing*, 7, 395–429. <https://doi.org/10.3390/rs70100395>
- Schulte, M.L., Daniel, L., McLaughlin, D.L., Wurster, F.C., Varner, J.M., Stewart, R.D., Aust, W.M., Jones, C.N. and Gile, B. (2019). Short- and long-term hydrologic controls on smouldering fire in wetland soils. *International Journal of Wildland Fire*, 28, 177–186. <https://doi.org/10.1071/WF18086>
- Sirin, A.A. (2017). Peatlands. In: N.S. Kasimov, V.S. Tikunov, ed., *Ekologicheskii atlas Rossii*. Moscow: Feoriia Publ., 118–121. (In Russian)
- Sirin, A.A., Makarov, D.A., Gummert, I., Maslov, A.A. and Gulbe, Y.I. (2019). Depth of Peat Burning and Carbon Losses from an Underground Forest Fire. *Lesovedenie*, (5), 410–422. <https://doi.org/10.1134/S0024114819050097> (In Russian)
- Sirin, A.A., Maslov, A.A., Valyaeva, T.A., Tsyganova, O.P. and Glukhova, T.V. (2014). Mapping of Peatlands in the Moscow Oblast Based on High Resolution Remote Sensing Data. *Contemporary Problems of Ecology*, 7, 809–815. <https://doi.org/10.1134/S1995425514070117>
- Sirin, A., Medvedeva, M., Maslov, A. and Vozbrannaya, A. (2018). Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data. *Land*, 7 (71), 1–22. <https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Sirin, A.A. and Minaeva, T.Iu. (eds.) (2001). *Peatlands in Russia: to the analysis of industry information*. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Sirin, A., Minayeva, T., Vozbrannaya, A. and Bartalev, S. (2011). How to avoid peat fires? *Nauka v Rossii*, (2), 13–21.
- Sirin, A., Minayeva, T., Yurkovskaya, T., Kuznetsov, O., Smagin, V. and Fedotov, Y.U. (2017). Russian Federation (European Part). In: H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen, ed., *Mires and Peatlands of Europe: Status, Distribution and Conservation*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. 589–616. <https://doi.org/10.1127/mireseurope/2017/0001-0049>
- Suvorov, G.G., Chistotin, M.V. and Sirin, A.A. (2015). The Carbon losses from a drained peatland in Moscow Oblast used for peat extraction and agriculture. *Agrokhimiia*, (11), 51–62. (In Russian)
- Tanneberger, F., Tegetmeyer, C., Busse, S., Barthelmes, A., Shumka, S., Mariné, A.M., Jenderedjian, K., Steiner, G.M. et al. (2017). The peatland map of Europe. *Mires and Peat*, 19, 1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>

- Torabi Haghighi, A., Menberu, M., Darabi, H., Akanegbu, J. and Klöve, B. (2018). Use of remote sensing to analyse peatland changes after drainage for peat extraction. *Land Degradation & Development*, 29 (10), 3479–3488. <https://doi.org/10.1002/ldr.3122>
- Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G. R. and Watts, A. (2015). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8 (1), 11–14. <https://doi.org/10.1038/NNGEO2325>
- Vompersky, S. E., Glukhova, T. V., Smagina, M. V. and Kovalev, A. G. (2007). Conditions and consequences of fires in pine forests in drained bogs. *Lesovedenie*, (6), 35–44. (In Russian)
- Vompersky, S. E., Ivanov, A. I., Tsyganova, O. P., Valyaeva, N. A., Glukhova, T. V., Dubinin, A. I., Glukhov, A. I. and Markelova L. G. (1994). Paludified Soils and Mires of Russia and Carbon Pool of their Peat. *Pochvovedenie*, (12), 17–25. (In Russian)
- Vompersky, S. E., Ivanov, A. I., Tsyganova, O. P., Glukhova, T. V., Dubinin, A. I., Glukhov, A. I. and Markelova, L. G. (1996). Bog organic soils and bogs of Russia and carbon pool of their peats. *Eurasian Soil Science*, 28 (2), 91–105.
- Vompersky, S. E., Sirin, A. A., Salnikov, A. A., Tsyganova, O. P. and Valyaeva, N. A. (2011). Estimation of Forest Cover Extent over Peatland and Paludified Shallow Peatlands in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 4 (7), 734–741. <https://doi.org/10.1134/S1995425511070058>
- Vompersky, S. E., Sirin, A. A., Tsyganova, O. P., Valyaeva, N. A. and Maikov, D. A. (2005). Peatlands and Paludified Lands of Russia: Attempt of Analyses of Spatial Distribution and Diversity. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, (5), 21–33. (In Russian)
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C. D., Murdiyarsa, D., Page, S. E., Renou-Wilson, F., Rieley, J. O., Sirin, A., Strack, M. and Tuittila, E.-S. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, 17, 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- Yanovskiy, A. A. (2017). Remote Assessment of the Spectral Reflectance of a Surface of the Drained Peat Soils of Polesye on the Basis of Satellite Images of Medium Spatial Resolution. *Issledovaniia Zemli iz kosmosa*, (5), 35–48. <https://doi.org/10.7868/S0205961417050049> (In Russian)
- Yanovskiy, A. A. and Bambalov, N. N. (2014). The automation of mapping of the degraded peat soils of Belarus on the basis of satellite images of medium spatial resolution. *Prirodopol'zovanie*, (26), 92–100. (In Russian)

Received: August 18, 2019
Accepted: February 10, 2020

Contact information:

Andrey A. Sirin — sirin@ilan.ras.ru
 Maria A. Medvedeva — eveeza@yandex.ru
 Dmitry A. Makarov — scorpionstigr@mail.ru
 Alexander A. Maslov — amaslov@ilan.ras.ru
 Hans Joosten — joosten@uni-greifswald.de