



УДК 911.52
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377

Оценка состояния и геоинформационное моделирование постпирогенной динамики участка Большого Васюганского болота

Синюткина А.А., Гашкова Л.П.

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН,
филиал Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3
E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Аннотация. Изучение постпирогенной динамики растительного покрова болот является одной из ключевых задач в оценке трансформации глобального цикла углерода. В статье представлены оценки трансформации растительного покрова в результате пирогенной нагрузки, современного состояния и интенсивности восстановления пирогенного участка в пределах Большого Васюганского болота через пять лет после пожара с использованием материалов полевых ландшафтных исследований и спутниковых данных Sentinel-2. Стабилизация значений NDVI на уровне, близком к невыгоревшему болоту, произошла уже через два-три года после пожара за счет быстрого возобновления кустарничков и интенсивного зарастания видами, не характерными для верховых болот (*Betula pubescens*, *Populus tremula*, *Polytrichum strictum*). Несмотря на высокие значения вегетационного индекса, полное восстановление экосистемной функции болота – накопление углерода, через 5 лет после пожара еще не произошло, что проявляется главным образом в низкой доле сфагновых мхов – основных растений-торфообразователей на верховом болоте.

Ключевые слова: вегетационный индекс, сукцессионная динамика, Sentinel-2, микрорельеф, сфагновые мхи, выгорание поверхности

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-44-700005 и в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки № 0778-2019-0005.

Для цитирования: Синюткина А.А., Гашкова Л.П. 2022. Оценка состояния и геоинформационное моделирование постпирогенной динамики участка Большого Васюганского болота. Региональные геосистемы, 46(3): 366–377. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377

State Assessing and GIS Modeling of the Post-Pyrogenic Dynamics of the Great Vasyugan Mire Site

Anna A. Sinyutkina, Lyudmila P. Gashkova

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences,
Branch Siberian Research Institute of Agriculture and Peat,
3 Gagarina St, Tomsk 634050, Russia
E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Abstract. The study of the post-pyrogenic dynamics of vegetation cover is one of the key tasks in assessing the transformation of the global carbon cycle. The article presents estimates of the transformation of vegetation cover as a result of pyrogenic load, the current state and intensity of restoration of the pyrogenic area within the Great Vasyugan Mire five years after the fire. The study area includes the drained in 1980s and burned in 2016 site of the pine dwarf shrub sphagnum bog with area 5.5 km². The study based on field research data carried out in 2021 on 15 plots within key site and Sentinel-2 data for period 2016–2021. We used Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to estimate the vegetation dynamic within sites with

different intense of pyrogenic load. Field studies showed intensive overgrowth of *Polytrichum strictum* of burnt-out hollows, renewal of sphagnum mosses on hummocks with dead moss cover and burnt-out hollows with an average occurrence of 0.14, regrowth of dwarf shrubs, the appearance of birch, aspen and pine. The stabilization of NDVI values at a level close to the unburned mire occurred already 2–3 years after the wildfire due to the rapid renewal of shrubs and intensive overgrowth by species not characteristic to bogs (*Betula pubescens*, *Populus tremula*, *Polytrichum strictum*). Despite the high values of the vegetation index, the complete restoration of the ecosystem function of the bog – the accumulation of carbon 5 years after the fire has not yet occurred, which is manifested mainly in the low proportion of the main peat-forming plants of the bog – sphagnum mosses.

Keywords: vegetation index, succession dynamics, Sentinel-2, microtopography, *Sphagnum*, surface burnout

Acknowledgements: The research was carried out with financial support of the RFBR in the framework of the scientific project No. 18-44-70005 and was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Research Project № 0778-2019-0005.

For citation: Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. 2022. State Assessing and GIS Modeling of the Post-Pyrogenic Dynamics of the Great Vasyugan Mire Site. *Regional Geosystems*, 46(3): 366–377 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-366-377

Введение

Торфяные болота являются ценными природными объектами, предоставляющими множество экосистемных функций – защиту биоразнообразия, регулирование стока, баланс парниковых газов [Knox et al., 2017; Minayeva et al., 2017; Amani et al., 2018]. В пределах торфяных болот естественный баланс первичного производства и распада на протяжении всего голоцена был смещен в сторону накопления частично разложившегося органического вещества в виде торфа благодаря высокому уровню болотных вод и плохой аэрации [Minkinen and Laine, 1998; Vason et al., 2017; Laine et al., 2019]. Торфяные болота содержат около 650 Гт или 30 % планетарных запасов почвенного углерода [Peatlands mapping..., 2020]. Одним из наиболее значимых факторов потерь углерода на болотах являются пожары [Глухова, Сирин, 2018; Сизов и др., 2020]. Они уничтожают значительное количество органического вещества и быстро переносят большие запасы наземного углерода в атмосферу [Lin et al., 2021]. Современные климатические изменения и антропогенная нагрузка увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода, поэтому болота становятся более уязвимы для природных пожаров, увеличивается их частота и интенсивность, что является особенно актуальным для бореальной зоны в целом и Западной Сибири в частности [Moore et al., 2017; Feurdean et al., 2020; Ackley et al., 2021; Lin et al., 2021]. Особенно актуальной проблема пожаров является для осушенных болот, подверженных более длительному периоду тления и большей интенсивности выгорания в сравнении с естественными [Kettridge et al., 2014].

На территории Томской области в 1970–1980 гг. проведены масштабные работы по осушению верховых болот, в том числе были осушены участки северо-восточных отрогов Большого Васюганского болота на общей площади около 150 км². Осушение верховых сосново-кустарничково-сфагновых болот не привело к ожидаемому эффекту увеличения бонитета древесного яруса, а снижение уровня болотных вод и доступность местному населению стали основными причинами возникновения пожаров на данной территории. К 2020 г. общая площадь выгорания достигла 38 км² [Sinyutkina, 2021].

Пожары на верховых болотах существенно влияют на видовое богатство, структуру фитоценозов, темпы накопления биомассы. Воздействие пожаров может трансформировать экосистемы верховых болот из поглотителей углерода в источник не только за счет прямых его выбросов при сгорании биомассы, но и за счет смены структуры растительно-



го сообщества и функционирования экосистемы [Копотева, Купцова, 2016; Малащук, Филиппов, 2021]. Деструкция растительных остатков и потери органического вещества при разложении сосудистых растений и зеленых мхов значительно превышают таковые у сфагновых мхов [Gunnarsson, 2005; Bragazza et al., 2009; Копотева, Купцова, 2016]. Поэтому деградация основного вида-торфообразователя верховых болот – сфагновых мхов и замещение их зелеными мхами, снижает темпы аккумуляции углерода. До сих пор остается открытым вопрос: какой период после пожара необходим для восстановления пирогенного участка в исходное состояние и перехода болотной экосистемы из состояния источника углерода в состояние стока. Это определяет необходимость проведения комплексных исследований по оценке состояния и динамики постпирогенных участков болот на территории Томской области.

Целью исследования является оценка трансформации растительного покрова в результате пирогенной нагрузки, современного состояния и интенсивности восстановления пирогенного участка через пять лет после пожара с использованием наземных и спутниковых данных.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является участок Бакчарского болотного массива (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота) в бассейне р. Гавриловка, выгоревший в августе 2016 г. Согласно спутниковым данным *Landsat*, общая площадь распространения пожара составила 5,5 км², а выгоранию в большей степени оказалось подвержено осушенное сосново-кустарничково-сфагновое верховое болото (рис. 1) [Sinyutkina et al., 2020].

Территория исследования относится к подзоне южной тайги Западной Сибири. Четвертичные отложения представлены озерно-аллювиальными суглинками и глинами. Климат континентальный с длинной и холодной зимой и коротким и жарким летом. Согласно данным гидрометеорологической станции в с. Бакчар, среднегодовая температура составляет 0,23 °С, ежегодное количество осадков 473 мм [Ландшафты болот..., 2012]. В 1980 г. участок Бакчарского болотного массива был осушен с целью гидролесомелиорации. В пределах осушенного участка преобладают сосново-кустарничково-сфагновые верховые болота. В настоящее время отмечается снижение водопрпускной способности каналов вследствие их зарастания и заторфовывания. Более подробная характеристика осушенного участка Бакчарского болотного массива представлена в работах [Синюткина и др., 2018; Maloletko et al., 2018; Sinyutkina, 2021].

Оценка интенсивности восстановления растительного покрова постпирогенного участка через 5 лет после пожара выполнена с использованием данных полевых ландшафтных исследований, проведенных в 2021 г. на 15 модельных площадках. Полевые исследования включали следующие виды работ: геоботанические описания; определение частоты встречаемости видов мохового и травяно-кустарничкового ярусов, мощности горелого горизонта, уровня болотных вод с использованием метода линейной таксации вдоль линии профиля длиной 5 м с шагом 25 см. Определение расстояния точек полевых описаний до ближайшего осушительного канала проведено с использованием спутниковых данных.

Геоинформационное моделирование пространственно-временной неоднородности сукцессионной динамики проведено с использованием спутниковых данных *Sentinel-2* с разрешением 10 м в видимом диапазоне и 10–20 м в ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах за период 2016–2021 гг., включая снимки на даты до возникновения пожара (открытый доступ EarthExplorer.usgs.gov). Для анализа использовано 36 космических снимков за вегетационный период (май – сентябрь) после спектральной и атмосферной коррекции.

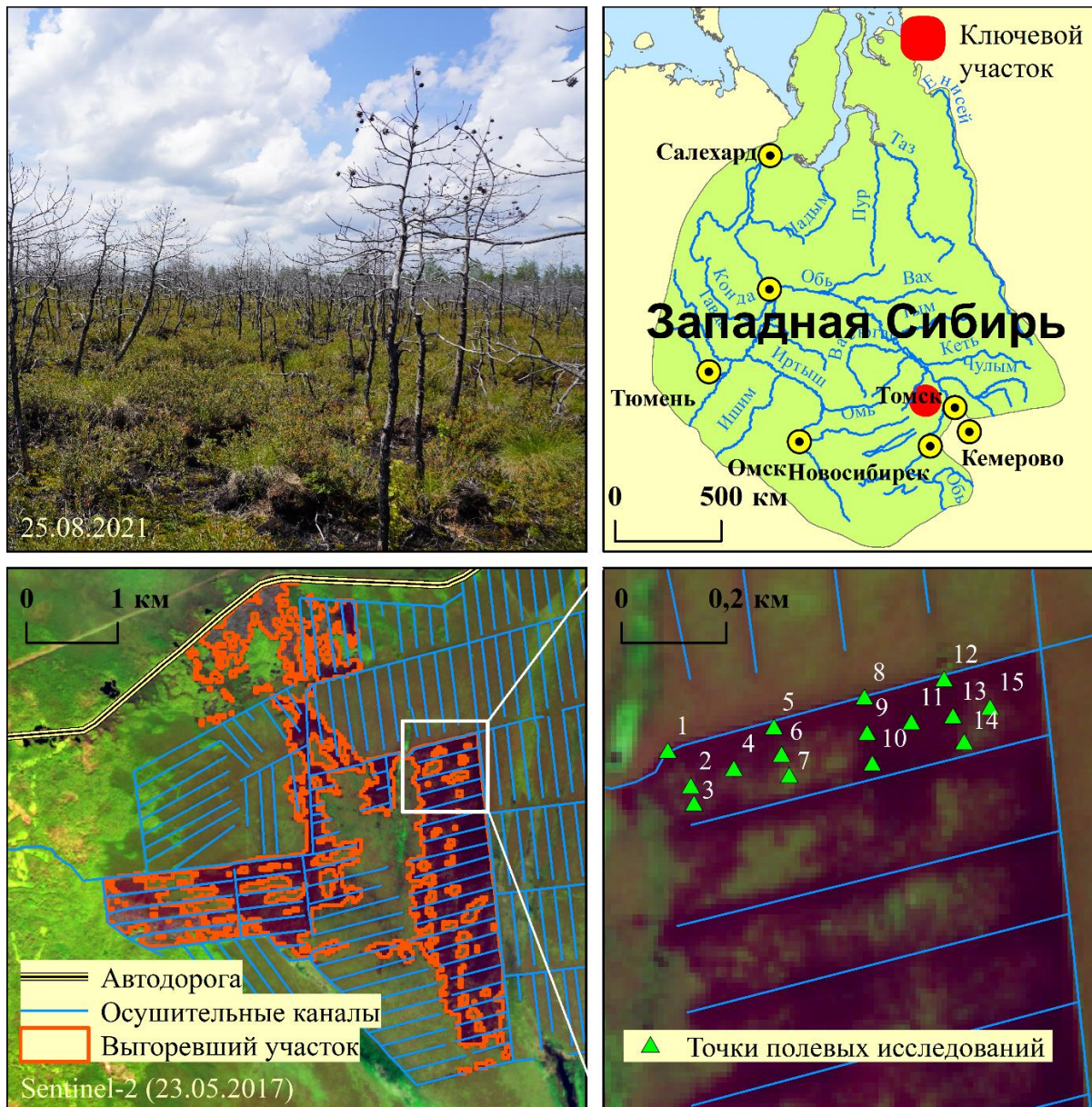
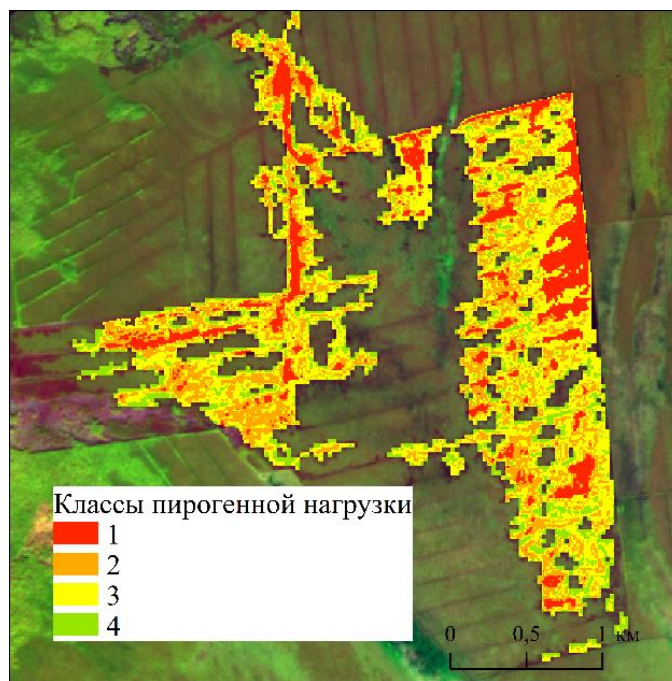


Рис. 1. Схема расположения объекта исследования
Fig. 1. Study area

Оценка пространственной неоднородности пирогенной нагрузки проведена в пределах контура выгоревшего сосново-кустарничково-сфагнового болота с использованием снимка от 23 мая 2017 г. (начало вегетационного периода в первый год после пожара). Классификация снимка выполнена в ГИС-пакете *Quantum GIS* (версия 3.22.1) с использованием плагина полуавтоматической классификации (SCP версия 7.6.0) по четырем спектральным каналам B04, B08, B08A, B12 с длинами волн соответственно 665, 842, 865 и 2190 нм, показавшими максимальные различия значений спектральной яркости между выделенными пространственными классами. Создание обучающих выборок проведено с использованием данных полевых исследований в соответствии с выделенными кластерами (переменные кластерного анализа: доля выгоревшей поверхности; проективное покрытие: зелеными мхами, сфагновыми мхами, кустарничками, подростом, древесным ярусом). Оценка временной динамики растительного покрова выполнена с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса *NDVI*, рассчитанного для каждого выделенного пространственного класса в пределах пирогенного участка, а также контура осушенного сосново-кустарничково-сфагнового болота за пределами пирогенного участка.

Результаты и их обсуждение

Площадь ключевого участка составляет 4,22 км², в том числе пирогенный участок 4,05 км², осушенное сосново-кустарничково-сфагновое болото за пределами пирогенного контура – 0,17 км². В пределах пирогенного контура выделено четыре пространственных класса, соответствующих участкам с разной степенью выгорания поверхности (рис. 2).



Классы пирогенной нагрузки:

- 1 – полностью выгоревшие участки;
- 2 – частично выгоревшие участки с высокой долей выгорания поверхности;
- 3 – частично выгоревшие участки со средней долей выгорания поверхности;
- 4 – частично выгоревшие участки с низкой долей выгорания поверхности

Рис. 2. Карта классов пирогенной нагрузки

Fig. 2. Map of pyrogenic load classes

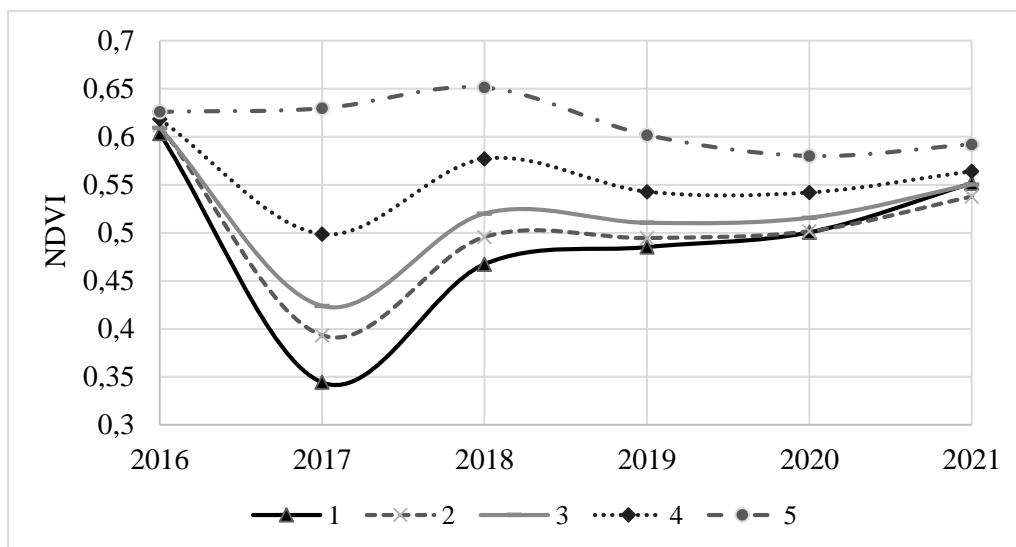
Частично выгоревшие контуры с высокой, средней и низкой долей выгорания занимают соответственно 27, 42 и 15 % площади ключевого участка. Контуры имеют пятнистый рисунок, большая степень выгорания характерна для участков вдоль каналов. Контуры с низкой долей выгорания обычно распространены узкой полосой вдоль невыгоревших участков внутри основного контура пирогенного участка. Согласно данным полевых исследований, уровень болотных вод на частично выгоревших площадках изменяется в пределах 20–30 см ниже поверхности. В пределах площадок с низкой долей выгорания поверхности (менее 40 %) горелый слой присутствует только в понижениях микрорельефа, а на положительных формах сохранилась моховая и кустарничковая растительность. Большую часть почвенного покрова на невыгоревших кочках занимает погибший *Sphagnum fuscum*. Для площадок характерна максимальная встречаемость сфагновых мхов и кустарничков, самая высокая доля *Sphagnum angustifolium* среди выгоревшего болота. Частота встречаемости *Polytrichum strictum* не превышает 0,5, на отдельных участках он совсем отсутствует. На площадках с более интенсивной пирогенной нагрузкой выгоранию были подвержены не только отрицательные, но и положительные формы микрорельефа, а общая доля выгоревшей поверхности достигала 75 %. В настоящее время происходит интенсивное зарастание *Polytrichum strictum*, частота встречаемости которого в пределах отрицательных форм достигает 1, и он отсутствует только на самых высоких элементах микрорельефа.

Полностью выгоревшие контуры занимают 16 % площади ключевого участка, расположены преимущественно вдоль осушительных каналов и часто имеют вытянутую форму. Согласно данным полевых исследований, полностью выгоревшие площадки характеризуются более низким уровнем болотных вод (30–42 см ниже поверхности). Для площадок характерно интенсивное зарастание *Polytrichum strictum*, частота встречаемости которого достигает 0,9. Сфагновые мхи здесь полностью отсутствуют, либо имеют низкую частоту встречаемости, не превышающую 0,2. Частота встречаемости кустарничков не превышает 0,3. Для площадок характерна большая доля открытой поверхности, достигающая 50 %.

На невыгоревшем участке осушенного болота среднее значение *NDVI* за весь период наблюдения 2016–2021 гг. составило 0,61. Максимальное значение (0,70) отмечено 1 августа 2018 г., низкие значения характерны для мая, когда *NDVI* изменяется в пределах 0,4–0,5 с минимумом в 2021 г. Рост значений обычно наблюдается до середины июня–начала июля, после чего происходит их стабилизация на уровне около 0,6. Во второй половине сентября отмечается некоторое снижение значений. Средняя амплитуда колебаний *NDVI* за вегетационный период составила 0,12. Для пирогенного участка среднее значение *NDVI* составило 0,50. Сезонная амплитуда колебаний *NDVI* в пределах всех выделенных классов пирогенного участка выше в сравнении с невыгоревшим. Отмечен рост амплитуды значений *NDVI* с увеличением доли выгорания поверхности от 0,14, на участках с низкой долей выгорания до 0,20, на полностью выгоревших участках. Увеличение амплитуды объясняется замещением вечнозеленых видов, характерных для сосново-кустарничковых болот – сосны и вересковых кустарничков, на листопадные виды – березу и осину. Таким образом, данный показатель может быть использован для оценки степени восстановления выгоревших участков к исходному состоянию.

В течение первой половины вегетационного периода (май – июль) 2016 г. до возникновения пожара все пространственные классы характеризовались схожими средними значениями *NDVI* (0,60–0,62) (рис. 3). В начале сентября 2016 г., сразу после пожара, значения *NDVI* пирогенного участка уменьшились в 1,3–1,9 раз в сравнении с фоновым невыгоревшим участком. Минимальное значение (0,10) было отмечено 23 мая 2017 г. в пределах полностью выгоревших участков, что соответствует практически полному отсутствию растительного покрова. В течение 2017 г. значения *NDVI* продолжали сохраняться низкими в пределах 0,2–0,5, что было ниже в сравнении с невыгоревшим участком в 1,8 раз в пределах полностью выгоревших участков и в 1,3–1,6 раз ниже в пределах частично выгоревших участков с разной степенью выгорания. С 2018 г. различия между невыгоревшим и пирогенными участками начали сокращаться, в 2018 г. наблюдается превышение значений *NDVI* в 1,1–1,4 раза, а в 2019–2020 гг. в 1,1–1,2 раза. В 2021 г. значения *NDVI* участков с низкой долей выгорания уже не отличаются от невыгоревшего участка, на остальных пирогенных участках продолжают сохраняться более низкие значения, но превышение значений невыгоревшего участка всего в 1,1 раза.

За период 2017–2021 гг. наиболее интенсивный рост значений *NDVI* (в 1,6 раз) был характерен для полностью выгоревших участков, наименьший – для частично выгоревших участков с низкой степенью выгорания (1,1 раз). Наиболее интенсивный рост был характерен для 2018 года, когда значения *NDVI* увеличились в 1,4 раза в пределах полностью выгоревших участков и в 1,2–1,3 раза – в пределах частично выгоревших, в сравнении с предыдущим годом. В 2019–2020 гг. незначительный рост наблюдался только в пределах полностью выгоревших участков (в 1,05 раз), в то время как на частично выгоревших участках значения *NDVI* сохранялись на одном уровне относительно невыгоревшего болота. Следует отметить, что от года к году уменьшалась разница значений *NDVI* между пирогенными участками с разной степенью выгорания от 1,4 раз в 2017 г. до 1,1 в 2019 г., в 2021 г. различия уже не наблюдаются.



1 – полностью выгоревшие участки; 2 – частично выгоревшие участки с высокой долей выгорания поверхности; 3 – частично выгоревшие участки со средней долей выгорания поверхности; 4 – частично выгоревшие участки с низкой долей выгорания поверхности; 5 – невыгоревший участок.

Рис. 3. Динамика среднесезонных значений *NDVI* за период 2016–2021 гг.

Fig. 3. Temporal dynamics of the *NDVI* values (average per vegetation season) for 2016–2021 years

Оценка состояния и интенсивности восстановления растительного покрова пирогенного участка через пять лет после пожара показала следующие закономерности. Зарастание сфагновыми мхами выгоревшей поверхности через пять лет после пожара минимально и отмечено не на всех площадках. Средняя встречаемость сфагновых мхов на выгоревшей поверхности составляет 0,14 и между площадками отличается в пределах 0–0,5. На полностью выгоревших площадках сфагновые мхи часто отсутствуют. Для всех площадок характерно интенсивное восстановление кустарничкового яруса за счет отрастания новых побегов от сохранившихся корневищ, зарастание осиной и березой со средним проективным покрытием 5–10 % и высотой около 20 см. На полностью выгоревших площадках зарастание происходит более интенсивно, максимальное проективное покрытие достигает 20 %, а высота 60 см. На отдельных площадках отмечено появление единичных всходов сосны высотой до 10 см. В растительном покрове пирогенного участка через 5 лет после пожара распространены виды, как типичные для ненарушенных верховых сосново-кустарничково-сфагновых верховых болот (*Pinus sylvestris*, *Chamaedaphne calyculata*, *Rhododendron tomentosum*, *Andromeda polifolia*, *Vaccinium uliginosum*, *Oxycoccus microcarpus*, *Sphagnum fuscum*, *S. magellanicum*, *S. balticum*, *S. angustifolium*), так и виды, отражающие постпирогенную трансформацию участка (*Betula pubescens*, *Populus tremula*, *Polytrichum strictum*).

Выявленные тенденции пирогенной трансформации и восстановления растительного покрова верховых болот в целом согласуются с результатами исследований, проведенных в других регионах [Вомперский и др., 2007; Thompson, Waddington, 2013; Kettridge et al., 2014; Moore et al., 2017; Малащук, Филиппов, 2021], но имеется ряд особенностей, характерных для выгоревшего участка Бакчарского болота. Например, в результате пожара на осушенном верховом болоте Вологодской области в течение 10–12 лет происходит замещение сосны березой, сфагновых мхов – на *Polytrichum* [Малащук, Филиппов, 2021]. На исследуемом нами ключевом участке через 5 лет после пожара уже отмечается присутствие видов сфагновых мхов не только на сохранившихся моховых подушках, но и на выгоревшей поверхности, а также появление всходов сосны.

В результате исследования на Бакчарском болоте отмечено, что для понижений микрорельефа характерна большая степень выгорания в сравнении с положительными формами. Полученная закономерность согласуется с исследованиями, проведенными на верховом сфагновом болоте в Канаде [Thompson, Waddington, 2013]. При этом авторами отмечено, что несмотря на меньшую глубину горения на положительных формах, для них характерно большее нарушение гидрологического равновесия и гидрологических условий, что будет сказываться на восстановлении сфагновой растительности. Это может быть связано с нарушением верхнего слоя торфяной залежи в результате пожара и нарушением водоотталкивающей способности поверхности, которая является одним из факторов, определяющих способность восстановления растительности на выгоревших участках [Moore et al., 2017]. Вероятно, торф приобретает водоотталкивающие свойства после высыхания под воздействием испарения при экстремальных температурах во время пожара [Kettridge et al., 2014]. Водоотталкивающая способность поверхности значительно выше на сгоревшем болоте и более выражена у зеленого мха в сравнении со сфагновым, вне зависимости от степени выгорания. Сфагновые мхи и сфагновый торф обладают низкой водоотталкивающей способностью и более эффективно удерживают воду. В результате выгорания способность мхов удерживать воду снижается, но в некоторых случаях в понижениях микрорельефа выгорание верхнего слоя и обнажение сфагнового торфа способствует снижению водоотталкивающей способности и более интенсивному восстановлению сфагновых мхов в сравнении с повышениями [Moore et al., 2017]. На изучаемом нами ключевом участке отмечено появление сфагновых мхов в выгоревших понижениях микрорельефа, что подтверждает рассмотренные закономерности.

Анализ спутниковых данных, в том числе с использованием вегетационных индексов, является наиболее часто используемым подходом для определения последствий пожара, оценки общей площади выгорания и постпирогенной динамики [Lees et al., 2018; Rein, Huang, 2021]. Проведенные нами исследования показали быстрый рост значений *NDVI* на пирогенном участке, которые через 4–5 лет после пожара уже практически достигли уровня невыгоревшего болота, главным образом за счет разрастания кустарничков и появления подроста осины и березы, обладающими большей фитомассой в сравнении с исходной растительностью сосново-кустарничково-сфагнового болота. Схожие результаты получены в результате исследования последствий пожара на болотах северной части Западной Сибири [Сизов и др., 2020]. На основе определения индекса *NDVI* представлены оценки объемов фитомассы на участках разновременных гарей. Отмечено увеличение запасов фитомассы в сравнении с фоновыми участками на старовозрастных гарях (2001, 1988, 1969 гг.). Для самых старых гарей характерны максимальные значения *NDVI*, что свидетельствует о длительности сохранения условий доминирования лиственной древесной растительности на месте сгоревшей мохово-лишайниковой [Сизов и др., 2020].

Заключение

В результате исследования получена оценка интенсивности восстановления растительного покрова постпирогенного участка на Бакчарском болотном массиве (отрог Большого Васюганского болота) через 5 лет после пожара 2016 г.; проведено геоинформационное моделирование пространственно-временной неоднородности сукцессионной динамики на постпирогенном участке с использованием материалов полевых исследований и спутниковых данных.

Полевые исследования на модельных площадках показали интенсивное зарастание *Polytrichum strictum* выгоревших понижений микрорельефа, возобновление сфагновых мхов как на моховых подушках с мертвым моховым покровом, так и в выгоревших понижениях со средней встречаемостью 0,14, отрастание кустарничков, появление подроста березы и осины и единичных всходов сосны. В результате геоинформационного анализа



пирогенного участка с использованием спутниковых данных *Sentinel-2* за период 2016–2021 гг. отмечено, что для большей части (84 %) пирогенного участка характерно частичное выгорание поверхности, а 16 % выгорело полностью. Стабилизация значений *NDVI* на уровне, близком к невыгоревшему болоту, произошла уже через 3–4 года после пожара за счет быстрого возобновления кустарничкового яруса и интенсивного зарастания видами, не характерными для верховых болот. Амплитуда внутрисезонных колебаний *NDVI* отличается между пирогенным и невыгоревшим участками болота, поэтому данный показатель может быть использован для оценки степени восстановления выгоревших участков к исходному состоянию. Несмотря на высокие значения вегетационного индекса, отражающие интенсивное зарастание пирогенного участка, полное восстановление экосистемной функции болота (накопление углерода) через 5 лет после пожара еще не произошло, что проявляется главным образом в низкой доле основных растений-торфообразователей на верховом болоте – сфагновых мхов.

Список литературы

- 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.
- Глухова Т.В., Сиринов А.А. 2018. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте. Почвоведение, 5: 580–588. DOI: 10.7868/S0032180X18050076.
- Копотева Т.А., Купцова В.А. 2016. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности. Экология, 1: 14–21. DOI: 10.7868/S0367059715060086.
- Ландшафты болот Томской области. 2012. Под ред. Н.С. Евсеевой. Томск, Издательство научно-технической литературы, 400 с.
- Малащук А.А., Филиппов Д.А. 2021. Постпирогенная динамика растительного покрова верхового болота Барское (Вологодская область). Трансформация экосистем, 4(1(11)): 104–121. DOI: 10.23859/estr-200512.
- Сизов О.С., Цымбарович П.Р., Ежова Е.В., Соромотин А.В., Приходько Н.В. 2020. Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 17(4): 137–153. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Малолетко А.А., Магур М.Г., Харанжевская Ю.А. 2018. Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири. Вестник Томского государственного университета. Биология, 43: 196–223. DOI: 10.17223/19988591/43/10.
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quintona W.L. 2021. Coupled Hydrological and Geochemical Impacts of Wildfire in Peatland-Dominated Regions of Discontinuous Permafrost. Science of the Total Environment, 782: 146841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841.
- Amani M., Salehi B., Mahdavi S., Brisco B. 2018. Spectral Analysis of Wetland Using Multi-Source Optical Satellite Imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 144: 119–136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005.
- Bacon K.L., Baird A.J., Blundell A., Bourgault M.-A., Chapman P.J., Dargie G., Dooling G.P., Gee C., Holden J., Kelly T., McKendrick-Smith K.A., Morris P.J., Noble A., Palmer S.M., Quillet A., Swindles G.T., Watson E.J., Young D.M. 2017. Questioning ten common assumptions about peatlands. Mire Peat, 19(12): 1–23. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.253.
- Bragazza L., Buttler A., Siegenthaler A., Mitchell E.A.D. 2009. Plant litter decomposition and nutrient release in peatlands. Carbon Cycling in Northern Peatlands, 184: 99–110. DOI: 10.1029/2008GM000815.
- Gunnarsson U. 2005. Global patterns of Sphagnum productivity. Journal of Bryology, 27(3): 269–279. DOI: 10.1179/174328205X70029.
- Peatlands mapping and monitoring – Recommendations and technical overview. 2020. Rome, FAO, 78 p.

- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S. M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. 2020. Recent Fire Regime in the Southern Boreal Forests of Western Siberia is Unprecedented in the Last Five Millennia. *Quaternary Science Reviews*, 244: 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.
- Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M. 2014. Burned and Unburned Peat Water Repellency: Implications for Peatland Evaporation Following Wildfire. *Journal of Hydrology*, 513: 335–341. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.019.
- Knox S.H., Dronova I., Sturtevant C., Oikawa P.Y., Matthes J.H., Verfaillie J., Baldocchi D. 2017. Using Digital Camera and Landsat Imagery with Eddy Covariance Data to Model Gross Primary Production in Restored Wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238: 233–245. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.020.
- Laine A.M., Mehtatalo L., Tolvanen A., Frolking S., Tuittil E.-S. 2019. Impacts of Drainage, Restoration and Warming on Boreal Wetland Greenhouse Gas Fluxes. *Science of the Total Environment*, 647: 169–181. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.390.
- Lees K.J., Quaife T., Artz R.R.E., Khomik M., Clark J.M. 2018. Potential for Using Remote Sensing to Estimate Carbon Fluxes Across Northern Peatlands – A Review. *Science of the Total Environment*, 615: 857–874. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.103.
- Lin S., Liu Ya., Huang X. 2021. Climate-Induced Arctic-Boreal Peatland Fire and Carbon Loss in the 21st Century. *Science of the Total Environment*, 796: 148924. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148924.
- Maloletko A.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A., Magur M.G., Voistinova E.S., Ivanova E.S., Chudinovskaya L.A., Khaustova A.A. 2018. Effects of Long-Term Drainage on Vegetation, Surface Topography, Hydrology and Water Chemistry of North-Eastern Part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211: 012033. DOI:10.1088/1755-1315/211/1/012033.
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. 2017. Towards Ecosystem-Based Restoration of Peatland Biodiversity. *Mire Peat*, 19(1): 1–36. DOI: 10.19189/MaP.2013.OMB.150.
- Minkinen K., Laine J. 1998. Long-Term Effect of Forest Drainage on the Peat Carbon Stores of Pine Mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(9): 1267–1275. DOI: 10.1139/x98-104.
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N., Petrone R.M., Devito K.J., Waddington J.M. 2017. Peatland Water Repellency: Importance of Soil Water Content, Moss Species, and Burn Severity. *Journal of Hydrology*, 554: 656–665. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.036.
- Rein G., Huang X. 2021. Smouldering Wildfires in Peatlands, Forests and the Arctic: Challenges and Perspectives. *Environmental Science and Health*, 24: 100296. DOI:10.1016/j.coesh.2021.100296.
- Sinyutkina A. 2021. Drainage Consequences and Self-Restoration of Drained Raised Bogs in the South-Eastern Part of Western Siberia: Peat Accumulation and Vegetation Dynamics. *Catena*, 205: 105464. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronotova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu.A. 2020. Post-Fire Ecological Consequences within the Drained Site of the Great Vasyugan Mire: Retrospective Water-Thermal Regime and Pyrogenic Disturbance Estimation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 408: 012037. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012037.
- Thompson D.K., Waddington J.M. 2013. Wildfire Effects on Vadose Zone Hydrology in Forested Boreal Peatland Microforms. *Journal of Hydrology*, 486: 48–56. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.014.

References

- Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Kovalev A.G. 2007. The Conditions and Consequences of Fires in Pine Forests on Drained Bogs. *Russian Journal of Forest Science*, 6: 35–44 (in Russian).
- Glukhova T.V., Sirin A.A. 2018. Losses of Soil Carbon Upon a Fire on a Drained Forested Raised Bog. *Eurasian Soil Science*, 51(5): 542–549 (in Russian). DOI: 10.1134/S1064229318050034.
- Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. 2016. Effect of Fires on the Functioning of Phytocenoses of Peat Bogs in the Middle-Amur Lowland. *Russian Journal of Ecology*, 47(1): 11–18 (in Russian). DOI: 10.1134/S1067413615060089.
- Landshafty bolot Tomskoy oblasti [Mire landscapes of Tomsk region]. 2012. Tomsk, Publ. nauchno-tehnicheskoy literatury, 400 p.



- Malashchuk A.A., Philippov D.A. 2021. Post-Pyrogenic Dynamics of the Vegetation Cover of the Barskoe Raised Bog (Vologda Region, Russia). *Ecosystem Transformation*, 4(1(11)): 104–121 (in Russian). DOI: 10.23859/estr-200512.
- Sizov O.S., Tsymbarovich P.R., Ezhova E.V., Soromotin A.V., Prikhodko N.V. 2020. Assessment of the Post-Pyrogenic Dynamics of Tundra Vegetation in the Northern Part of Western Siberia Over the Past 50 Years (1968–2018) Based on Detailed and High Resolution Remote Sensing Data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 17(4): 137–153 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153.
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A., Magur M.G., Kharanzhevskaya Y.A. 2018. Transformation of the Surface and Vegetation Cover of Drained Bogs in Tomsk Region. *Tomsk State University Journal of Biology*, 43: 196–223 (in Russian). DOI: 10.17223/19988591/43/10.
- Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quintona W.L. 2021. Coupled Hydrological and Geochemical Impacts of Wildfire in Peatland-Dominated Regions of Discontinuous Permafrost. *Science of the Total Environment*, 782: 146841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841.
- Amani M., Salehi B., Mahdavi S., Brisco B. 2018. Spectral Analysis of Wetland Using Multi-Source Optical Satellite Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144: 119–136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005.
- Bacon K.L., Baird A.J., Blundell A., Bourgault M.-A., Chapman P.J., Dargie G., Dooling G.P., Gee C., Holden J., Kelly T., McKendrick-Smith K.A., Morris P.J., Noble A., Palmer S.M., Quillet A., Swindles G.T., Watson E.J., Young D.M. 2017. Questioning ten common assumptions about peatlands. *Mire Peat*, 19(12): 1–23. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.253.
- Bragazza L., Buttler A., Siegenthaler A., Mitchell E.A.D. 2009. Plant litter decomposition and nutrient release in peatlands. *Carbon Cycling in Northern Peatlands*, 184: 99–110. DOI: 10.1029/2008GM000815.
- Gunnarsson U. 2005. Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of Bryology*, 27(3): 269–279. DOI: 10.1179/174328205X70029.
- Peatlands mapping and monitoring – Recommendations and technical overview. 2020. Rome, FAO, 78 p.
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S. M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. 2020. Recent Fire Regime in the Southern Boreal Forests of Western Siberia is Unprecedented in the Last Five Millennia. *Quaternary Science Reviews*, 244: 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.
- Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M. 2014. Burned and Unburned Peat Water Repellency: Implications for Peatland Evaporation Following Wildfire. *Journal of Hydrology*, 513: 335–341. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.019.
- Knox S.H., Dronova I., Sturtevant C., Oikawa P.Y., Matthes J.H., Verfaillie J., Baldocchi D. 2017. Using Digital Camera and Landsat Imagery with Eddy Covariance Data to Model Gross Primary Production in Restored Wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238: 233–245. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.020.
- Laine A.M., Mehtatalo L., Tolvanen A., Frolking S., Tuittil E.-S. 2019. Impacts of Drainage, Restoration and Warming on Boreal Wetland Greenhouse Gas Fluxes. *Science of the Total Environment*, 647: 169–181. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.390.
- Lees K.J., Quaipe T., Artz R.R.E., Khomik M., Clark J.M. 2018. Potential for Using Remote Sensing to Estimate Carbon Fluxes Across Northern Peatlands – A Review. *Science of the Total Environment*, 615: 857–874. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.103.
- Lin S., Liu Ya., Huang X. 2021. Climate-Induced Arctic-Boreal Peatland Fire and Carbon Loss in the 21st Century. *Science of the Total Environment*, 796: 148924. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148924.
- Maloletko A.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A., Magur M.G., Voistinova E.S., Ivanova E.S., Chudinovskaya L.A., Khaustova A.A. 2018. Effects of Long-Term Drainage on Vegetation, Surface Topography, Hydrology and Water Chemistry of North-Eastern Part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211: 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012033.
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. 2017. Towards Ecosystem-Based Restoration of Peatland Biodiversity. *Mire Peat*, 19(1): 1–36. DOI: 10.19189/MaP.2013.OMB.150.

- Minkkinen K., Laine J. 1998. Long-Term Effect of Forest Drainage on the Peat Carbon Stores of Pine Mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(9): 1267–1275. DOI: 10.1139/x98-104.
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N., Petrone R.M., Devito K.J., Waddington J.M. 2017. Peatland Water Repellency: Importance of Soil Water Content, Moss Species, and Burn Severity. *Journal of Hydrology*, 554: 656–665. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.036.
- Rein G., Huang X. 2021. Smouldering Wildfires in Peatlands, Forests and the Arctic: Challenges and Perspectives. *Environmental Science and Health*, 24: 100296. DOI:10.1016/j.coesh.2021.100296.
- Sinyutkina A. 2021. Drainage Consequences and Self-Restoration of Drained Raised Bogs in the South-Eastern Part of Western Siberia: Peat Accumulation and Vegetation Dynamics. *Catena*, 205: 105464. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu.A. 2020. Post-Fire Ecological Consequences within the Drained Site of the Great Vasyugan Mire: Retrospective Water-Thermal Regime and Pyrogenic Disturbance Estimation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 408: 012037. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012037.
- Thompson D.K., Waddington J.M. 2013. Wildfire Effects on Vadose Zone Hydrology in Forested Boreal Peatland Microforms. *Journal of Hydrology*, 486: 48–56. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.014.

*Поступила в редакцию 12.04.2022;
поступила после рецензирования 05.05.2022;
принята к публикации 06.05.2022*

*Received April 12, 2022;
Revised May 05, 2022;
Accepted May 06, 2022*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Синюткина Анна Алексеевна, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского научного центра агробиотехнологий РАН, г. Томск, Россия

Гашкова Людмила Павловна, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского научного центра агробиотехнологий РАН, г. Томск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Sinyutkina, senior researcher of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia

Lyudmila P. Gashkova, senior researcher of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia