

RESTORATION OF BIOGEOCHEMICAL INDICATORS IN POST-PYROGENIC BOGS

Gashkova L.P.*, Sinyutkina A.A.

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, г. Томск

*gashkova-lp@rambler.ru

Citation: Gashkova L.P., Sinyutkina A.A. 2025. Restoration of biogeochemical indicators in post-pyrogenic bogs. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(4): 177-187.

DOI: 10.18822/edgcc693476

АННОТАЦИЯ

Мониторинг последствий природных пожаров необходим для формирования подходов защиты окружающей среды, сохранения стабильности экосистем. Изучение как постпирогенных, так и прилегающих к ним участков позволяет сравнивать уровни аэрогенного загрязнения и прогнозировать скорость восстановления нарушенных территорий. Особенно контрастно дисбаланс элементов выявляется на верховых болотах с преимущественно атмосферным питанием в условиях дефицита большинства элементов. Объектами для мониторинга последствий пожара послужили три болотных массива, расположенные в таёжной и лесотундровой зонах. В представленной работе производится оценка изменения элементного состава торфа выгоревших и прилегающих к ним болот спустя 6-8 лет после пожара. Используются сравнительно-географический, биогеохимический и аналитический методы. Элементный состав растений, торфа и подстилающей породы определён методом масс-спектрометрии. В результате мы выяснили, что в торфе исследованных участков происходят процессы как накопления, так и выщелачивания элементов, характерные для постпирогенных болот. Обнаружено, что на болотах, расположенных в лесотундре, по сравнению с объектами в таёжной зоне в два и более раза ниже содержание P, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Pb и в три раза ниже содержание Cu в подстилающей торф породе. Коэффициенты концентрации содержания элементов в торфе относительно подстилающей породы более высокие в зоне лесотундры и превышают 1 для элементов P, Ca, Mn, Zn и Cd.

Ключевые слова: верховое болото, элементный состав, подстилающая порода, торф, пирогенная трансформация, коэффициент концентрации.

ABSTRACT

Wildfires have profound impacts on biodiversity, greenhouse gas emissions and other environmental components [Gajendiran et al., 2024; Li et al., 2025]. Bogs, as peat deposits, are particularly vulnerable to fire [Rybina et al., 2015]. The areas most frequently affected are those disturbed by human activity, and in such mires the area affected by fire reaches several square kilometers [Sinyutkina et al., 2024]. Fires lead to complex physical and biogeochemical transformations that affect all components of the ecosystem [Granged et al., 2011]. When exposed to high temperatures and burning of organic material during a fire in a mire, a charred layer is formed in place of the vegetation cover, which leads to an increase in the hydrophobicity of the peat and an increase in the level of runoff [Leonard et al., 2017; Wu et al., 2020]. All the main processes of change in the chemical composition of the peat deposit in response to the impact on the mire are most indicative in the high peat layer [Stepanova, Pokrovsky, 2011]. The transformation of the main processes of leaching and accumulation of elements occurs in the upper layer of peat [Dymov et al., 2022; Gashkova, 2022]. Atmospheric and hydrological transfer of elements during a fire occurs intensively therefore changes affect not only the burned sites but the impact of the fire also affects adjacent territories [Kala, 2023; Kuzmina et al., 2022; Ortíz-Rodríguez et al., 2019]. Biogeochemical parameters of the ecosystem are restored over a long period [Belkova et al., 2016]. Therefore, the processes of change in the chemical composition of the peat deposit occur continuously over many years. In the first years after a fire, the concentration of most elements and the pH of the soil increase during the process of restoring acidity and vegetation cover, the ratio of elements continues to change [Stavrova et al., 2019]. The most indicative change in the elemental composition of peat is tracked through the ratio of the element content in peat to its content in the underlying rock [Efremova et al., 2003]. This article presents the results of monitoring the elemental composition of peat and underlying rock in raised bogs 6–8 years after a fire.

The objects of the study were mires located on the West Siberian Plain. We explored three mires. Two mires are located in the taiga zone, in the interfluvium of the Bakchar and Iksha rivers (areas BB and BF), and on the terrace of the Bakchar river (UBB and UBF). The third mire (palsa) is located in the forest-tundra zone, between the Pur and Nadym rivers (PB and PF). The fire in the BF and PF sites occurred in 2016, and in the UBF site in 2014. We conducted research from 2022 to 2024, in the burned sites and in sites immediately adjacent to the burned sites, but not disturbed

by fire. Before the fire, both sites from each of the bogs were similar in vegetation, depth, and peat deposit structure. We previously published a detailed description of the studied bogs [Sinyutkina et al., 2024]. In each of the 10m² test plots, we collected samples of plants (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench), peat from the root zone and the rock underlying the peat. In the palsa between the Pur and Nadym rivers, we measured the depth of frozen rocks. We analyzed the selected samples for botanical composition and element content: Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd и Pb mass spectrometric method (ICP-MS) at the “Plasma” chemical-analytical center (PerkinElmer, CIHA). Sample preparation was performed using a Speedwave microwave digestion method (Berghof, Germany) after preliminary acid digestion. To interpret the data, we calculated concentration coefficients (KK) – the ratio of the element's concentration in the topsoil to its concentration in the underlying rock. We processed the data using Microsoft Excel.

This work is part of a comprehensive monitoring of post-pyrogenic restoration of bogs, conducted since 2017. Between 2022 and 2024, some changes in the content of elements were identified in both post-pyrogenic and adjacent sites.

The underlying rock in the studied areas varies in granulometric composition. In the palsa sandy deposits characteristic of this area lie beneath the peat layer [Voronova, Grebenyuk, 2018]. In sites of bogs in the taiga zone, blue-gray gleyed loams typical of organogenic acidic soils [Karavaeva, 1978, p. 71-74] represent the underlying rocks. The depth of the frozen layer on the palsa varied between 40 and 60cm. The content of elements in the underlying rock varies slightly; no changes in the concentration of elements were noted over three years of observation. No differences were found between samples from burnt and pristine sites within the same mire. In addition, the content of K and Na does not differ significantly across all sites. At the same time, in the mire between the Pur and Nadym rivers, the content of elements P, Mg, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn and Pb is significantly lower than in other mires (Table 1). Comparing the KK in post-pyrogenic and adjacent sites it was found that in most post-pyrogenic sites, compared to unburned sites, the KK of the elements Ca, Fe, Cu, Zn and Pb was increased. However, in most sites the KK does not reach 1. The exception is the sites of the palsa, where KK>1 was found for the elements P, Ca, Mn, Zn and Cd (Table 1).

The peat deposit in the areas of the palsa was 50-75 cm in the botanical composition, *Sphagnum balticum* (Russ.) Russ.ex C.Jens. co-dominated together with *Sph. fuscum* (Schimp.) H.Klinggr. In areas in the taiga zone, the thickness of the peat deposit varied from 250 to 300 cm; the top layer of the deposit (0-20 cm) at all points was represented by high-moor sphagnum fuscum peat with a small admixture of shrubs and cotton grass. We compared the elemental composition of peat collected over three years and found changes in the concentration of some of the elements examined. To determine trends in element content over time, a linear approximation method was used. A trend with an approximation coefficient greater than 0.8 was considered significant. In the root-inhabited peat layer in all post-pyrogenic sites from 2022 to 2024, a trend towards an increase in the concentration of Mg, K, Mn and Ca and a decrease in the concentration of Na, Zn, Pb and Cd is observed (Figure 1).

In sites located adjacent to burnt areas from 2022 to 2024, no increase in the content of elements was observed in the upper peat layer, but a trend towards a decrease in the content of Zn, Pb and Cd was recorded (Figure 2).

The vegetation cover in sites located adjacent to burnt areas did not change after the fire; in post-pyrogenic sites, restoration of the vegetation cover began already in the first year after the fire with the active restoration of the shrub layer. [Sinyutkina et al., 2024]. In all studied sites, *Chamaedaphne calyculata* had fully recovered to its pre-fire abundance by 2022. Therefore, during the period considered in this article, the dwarf shrubs made a major contribution to the change in the chemical composition of the upper part of the peat deposit. As in peat, a downward trend in Na, Zn, Pb, and Cd content was observed in all sites from 2022 to 2024, and the concentration of Fe and Cu in leaves decreased. In post-pyrogenic sites, as in peat, an increase in the concentration of K, Mg, Ca, and Mn was observed over the three years (Figure 3).

In sites of bogs not affected by fire, but located next to burnt ones, no increase in the concentration of elements in the leaves of *Ch. calyculata* was observed, but, as in peat, an increase in the concentration of K, Mg, Ca and Mn was found (Figure 4).

The change in the elemental composition of the upper peat layer that we discovered during the restoration of the bog is natural, since the upper part of the peat deposit reacts most sensitively to the post-pyrogenic transformation of the bog, which was noted earlier [Stepanova, Pokrovsky, 2011; Dymov et al., 2022]. Post-pyrogenic decrease in the concentration of Zn, Pb and Cd over three years indicates a gradual leaching of elements mineralized and condensed from smoke particles during the fire [Gray, Dighton, 2006; Alves et al., 2010]. This reduction occurs because the acidity of the peat, which decreased after the fire, begins to increase in subsequent years during the process of bog restoration, increasing the mobility of heavy metals [Lipatov et al., 2016; Colin et al., 2024]. When studying the soils of the interfluvium of the Pur and Nadym rivers, researchers noted a lower content of elements compared to the taiga zone [Romanenko et al., 2020], which we also noted, in particular, as a lower content of P, Mg, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn and Pb in the underlying rock in sites in the forest-tundra.

The content of elements in peat is directly related to the chemical composition of plants, the litter of which begins to influence the biogeochemical situation in post-pyrogenic areas, due to the rapid restoration of the shrub layer, which began already in the first year after the fire [Sinyutkina, Gashkova, 2025]. In the leaves of plants in post-pyrogenic areas, as well as in peat, over the course of three years, we found an accumulation of the elements Mg, K, Mn and Ca, which, as noted (Stavrova et al., 2019), are actively absorbed by plants from ash in the first years after a fire. In

addition, ash and charred remains continue to enter the soil for several years after the fire, as a result of the destruction of the charred forest stand [Ukrainsev et al., 2016].

The high levels of CC that we noted for all forest-tundra areas are explained by both the low levels of elements in the underlying rock, which are characteristic of this region [Romanenko et al., 2020], and airborne pollution associated with the activities of oil and gas production enterprises, which affects the elemental composition of peat [Voronova, Grebenyuk, 2018]. The higher KK of the elements Ca, Fe, Cu, Zn and Pb in post-pyrogenic areas, compared to unburned ones, indicates that the process of restoring the elemental composition of peat has not yet ended; according to some authors, such a process can drag on for several decades [Leonard et al., 2017; Mergelov, 2015].

In the upper layer of peat, 6-8 years after the fire, in post-pyrogenic and adjacent areas, processes of restoration of the elemental composition continue to occur. The most noticeable changes are reflected in the fact that over the course of three years, the concentrations of Zn, Pb and Cd have gradually decreased both in post-pyrogenic sites and in adjacent sites. Concentration coefficients show the residual impact of post-pyrogenic changes and the specific characteristics of certain sites. Regional characteristics are expressed in the low element content in the underlying rock of bogs located in the forest-tundra zone compared to those in the taiga zone.

Keywords: raised bog, elemental composition, underlying rock, peat, pyrogenic transformation, concentration coefficient.

Используемые сокращения

BB – ненарушенный участок болота в междуречье Бакчара и Иксы;
BF – постпирогенный участок болота в междуречье Бакчара и Иксы;
UBB – ненарушенный участок болота на террасе р. Бакчар;
UBF – постпирогенный участок болота на террасе р. Бакчар;
PB – ненарушенный участок болота в междуречье Пура и Надыма;
PF – постпирогенный участок болота в междуречье Пура и Надыма;
SD – стандартное отклонение (standard deviation);
KK – коэффициент концентрации.

ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары коренным образом влияют на биоразнообразие, выбросы парниковых газов и другие компоненты окружающей среды [Gajendiran et al., 2024; Li et al., 2025]. Пожары на болотах особенно опасны из-за вероятности возгорания торфа [Rybina et al., 2015]. Наиболее часто страдают территории, нарушенные в результате деятельности человека, причем на таких болотах площадь поражённых огнём участков достигает нескольких квадратных километров [Sinyutkina et al., 2024]. Пожары приводят к сложной физической и биогеохимической трансформации, затрагивающей все компоненты экосистемы [Granged et al., 2011]. В результате воздействия высоких температур и выгорания органического материала при пожаре на болоте образуется обугленный слой на месте растительного покрова, что приводит к увеличению гидрофобности торфа и повышению уровня стока [Leonard et al., 2017; Wu et al., 2020]. Все основные процессы изменения химического состава торфяной залежи как ответная реакция воздействия на болото сильнее проявляются в верхнем слое торфа [Stepanova, Pokrovsky, 2011]. Верхний слой торфа больше всего трансформируется во время пожара, в нём происходят основные процессы выщелачивания и накопления элементов [Dymov et al., 2022; Gashkova, 2022]. Атмосферный и гидрологический перенос элементов при пожаре происходит интенсивно, изменения затрагивают не только выгоревшие участки, влияние пожара сказывается и на сопредельных территориях [Kala, 2023; Kuzmina et al., 2022; Ortíz-Rodríguez et al., 2019]. Восстановление биогеохимических параметров экосистемы происходит на протяжении многих лет [Belkova et al., 2016], поэтому процессы изменения химического состава в торфяной залежи проходят непрерывно. В первые годы после пожара увеличивается концентрация большинства элементов и pH почвы, в процессе восстановления кислотности и растительного покрова соотношение элементов продолжает изменяться [Stavrova et al., 2019]. Наиболее показательно изменение элементного состава торфа отслеживается через отношение содержания элемента в торфе к его содержанию в подстилающей породе [Efremova et al., 2003]. Целью данного исследования стало определение степени восстановления элементного состава основных компонентов верховых болот спустя 6-8 лет после пожара. Для достижения цели исследования ставились следующие задачи: отбор проб и химический анализ подстилающей породы, торфа и растений в течение 3 лет; сравнение элементного

состава отобранных образцов; определение трендов изменения химического состава исследованных компонентов болот.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования стали верховые болота, расположенные на Западно-Сибирской равнине. Рассмотрены три болотных массива. Два болота находятся в таёжной зоне, в междуречье Бакчара и Иксы (участки ВВ и ВВ) и на террасе р. Бакчар (UBB и UBF). Третье, плоскобугристое болото, расположено в лесотундровой зоне, в междуречье Пура и Надыма (PB и PF). Пожар на участках ВВ и PF произошёл в 2016 г., а на участке UBF – в 2014 г. Исследования проводились с 2022 по 2024 г. на выгоревших участках и на непосредственно прилегающих к выгоревшим, но ненарушенных участках. До пожара пары участков с каждого из болотных массивов были сходны по растительности, глубине и строению торфяной залежи. Мощность торфяной залежи колеблется от 50 до 300 см, выгоревшего слоя – от 0 до 2 см. Растительный покров на прилегающих к выгоревшим участкам после пожара не изменился, на постпирогенных участках восстановление растительного покрова началось уже в первый год после пожара с активного возобновления кустарничкового яруса. В кустарничковом ярусе каждого участка присутствует *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, её листья вносят наибольший вклад в состав опада. Более подробное описание исследованных болот опубликовано нами ранее [Sinyutkina et al., 2024]. На каждой из пробных площадок размером 10 м² отобраны пробы растений (*Ch. calyculata*), торфа из прикорневой зоны (в пределах 0-20 см) и породы, подстилающей торф. Отобранные образцы анализировались на ботанический состав по ГОСТ 28245-89 и содержание элементов: Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd и Pb масс-спектрометрическим методом (ICP-MS) [Hall, 1992] в химико-аналитическом центре «Плазма» (PerkinElmer, США). Пробоподготовка осуществлялась методом микроволнового разложения Speedwave (Berghof, Германия). Для интерпретации данных посчитаны коэффициенты концентрации – отношение концентрации элемента в верхнем слое торфа к его концентрации в подстилающей породе. Полученные данные обработаны при помощи Microsoft Excel и Statsoft Statistica. Сравнение выборок и определение значимости различий проводилось при помощи непараметрического критерия Манна – Уитни ($p < 0.05$). Для определения трендов изменения содержания элементов во времени применялся метод линейной аппроксимации. Учитывая короткий исследуемый период, значимыми мы принимали только тренды, коэффициент аппроксимации (R^2) которых был выше 0.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данная работа является частью комплексного мониторинга постпирогенного восстановления болот, проводимого с 2017 года. В период с 2022 по 2024 год выявлены некоторые изменения содержания элементов как на постпирогенных, так и на прилегающих к ним участках.

Подстилаящая порода на исследованных участках варьирует по гранулометрическому составу. На плоскобугристом болоте под слоем торфа залегают песчаные отложения, характерные для данной территории (Voronova, Grebenyuk, 2018). На участках болот в таёжной зоне подстилаящие породы представлены сизыми оглеенными суглинками, типичными для органогенных кислых почв [Karavaeva, 1978, с. 71-74]. Содержание элементов в подстилаящей породе варьирует незначительно, и на протяжении трёх лет наблюдений изменений концентрации элементов не отмечено. Различий между пробами подстилаящей породы с выгоревших и ненарушенных участков в пределах одного болотного массива также не обнаружено. Кроме того, содержание K и Na достоверно не различается на всех участках. В то же время на болотном массиве в междуречье Пура и Надыма содержание элементов P, Mg, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn и Pb значимо ниже, чем на остальных болотах (Табл. П1).

При сравнении коэффициентов концентрации обнаружено, что на всех постпирогенных участках по сравнению с невыгоревшими повышен КК элементов Fe, Mn и Pb. Однако на большинстве участков таёжной зоны КК не достигает 1. Исключение составляют КК Cd на участке ВВ, КК Mn и Pb на участке UBF, на плоскобугристом болоте $КК > 1$ для элементов P, Ca, Mn, Zn и Cd (Табл. П1, Рис. 1).

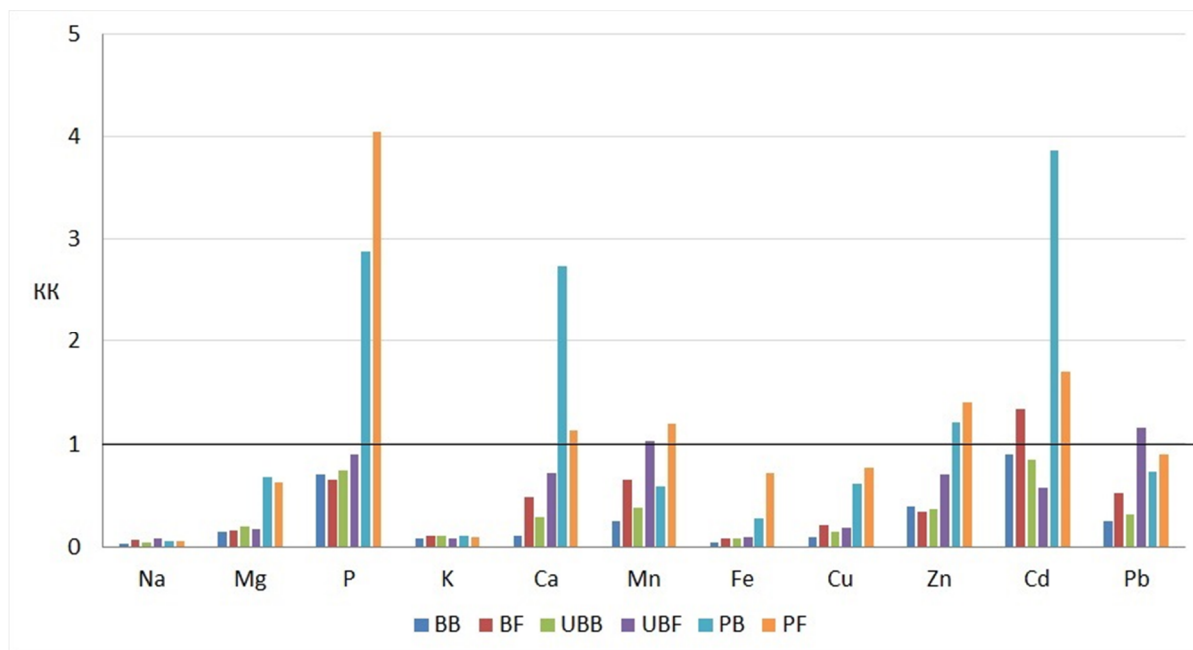


Рис. 1. Коэффициенты концентрации элементов (торф/подстилающая порода)

BB – ненарушенный участок болота в междуречье Бакчара и Иксы;
 BF – постпирогенный участок болота в междуречье Бакчара и Иксы;
 UBB – ненарушенный участок болота на террасе р. Бакчар;
 UBF – постпирогенный участок болота на террасе р. Бакчар;
 PB – ненарушенный участок болота в междуречье Пура и Надыма;
 PF – постпирогенный участок болота в междуречье Пура и Надыма.

Fig. 1. Element concentration ratios (peat/underlying rock)

BB – pristine mire site on the Bakchar and Ikksa interfluvium;
 BF – post-pyrogenic mire site on the Bakchar and Ikksa interfluvium;
 UBB – pristine mire site on the river Bakchar terrace;
 UBF – post-pyrogenic mire site on the river Bakchar terrace;
 PB – pristine mire site on the Pur and Nadym interfluvium;
 PF – post-pyrogenic mire site on the Pur and Nadym interfluvium.

В ботаническом составе верхнего слоя (0-20 см) торфяной залежи на всех исследованных участках доминирует *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H.Klinggr. На участках плоскобугристого болота присутствует примесь *Sph. balticum* (Russ.) Russ.ex C.Jens. На участках в таёжной зоне добавляются остатки кустарничков и пушицы.

В элементном составе верхнего слоя торфа спустя 6-8 лет после пожара на каждом из исследованных болот среднее содержание Na, Ca, Mn и Pb на постпирогенных участках выше по сравнению с невыгоревшими (Табл. П2). Но наиболее контрастные различия отмечены на террасе р. Бакчар между участками UBB и UBF в соотношении содержания Na (на UBF концентрация выше в 1.8 раза), Mn (на UBF концентрация выше в 3 раза), Zn (на UBF концентрация выше в 2 раза) и Pb (на UBF концентрация выше в 3.3 раза). Сопоставляя элементный состав торфа постпирогенного и прилегающего к нему участков на каждом из болотных массивов, можно предположить, что на болоте, расположенном на террасе р. Бакчар, процессы восстановления баланса элементов происходят более медленно, чем на остальных исследованных болотных массивах. Данное болото, в отличие от остальных исследованных объектов, расположено рядом с населёнными пунктами и испытывает постоянную антропогенную нагрузку, что может затруднять процессы его восстановления.

На постпирогенных участках в результате сравнения элементного состава торфа по годам в течение трёх лет обнаружили изменения концентрации некоторых элементов. В корнеобитаемом слое торфа на всех постпирогенных участках с 2022 по 2024 год отмечается тренд на увеличение концентрации Mg, K, Mn и Ca и на уменьшение концентрации Na, Zn, Pb и Cd (Рис. 2). На рисунке приведены графики только для элементов с достоверными трендами аппроксимации.

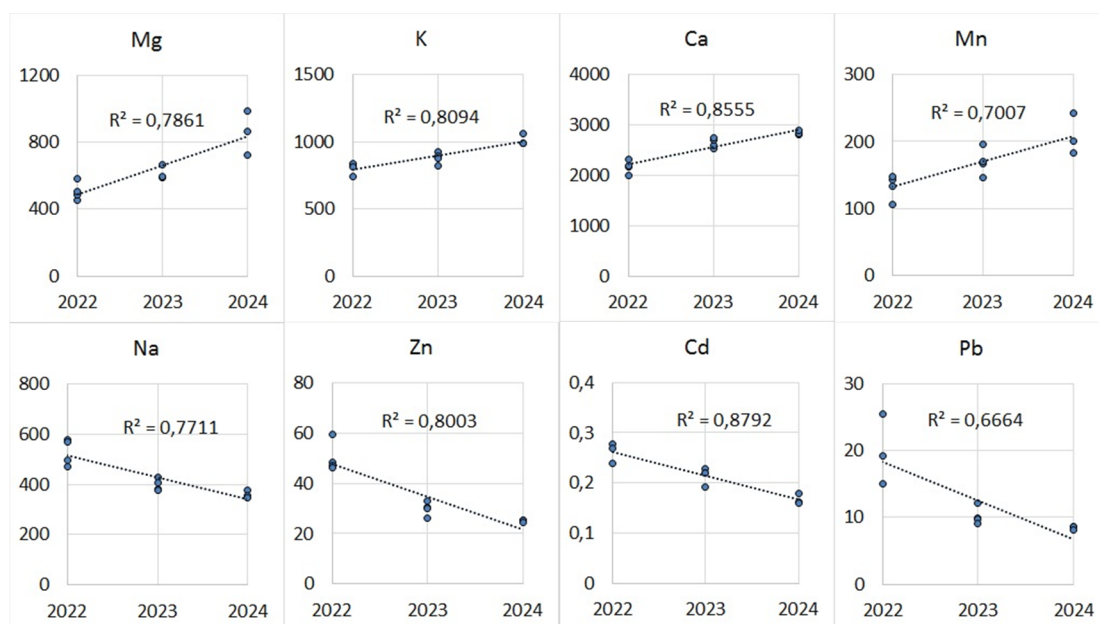


Рис. 2. Тренды изменения концентрации элементов в торфе (мг/кг) за 3 года на постпирогенных участках

Fig. 2. Trends in changes in the concentration of elements in peat (mg/kg) over 3 years in post-pyrogenic sites

На участках, прилегающих к выгоревшим, с 2022 по 2024 год в верхнем слое торфа не наблюдалось увеличения содержания элементов, но зафиксирован тренд на уменьшение содержания Zn, Pb и Cd (Рис. 3).

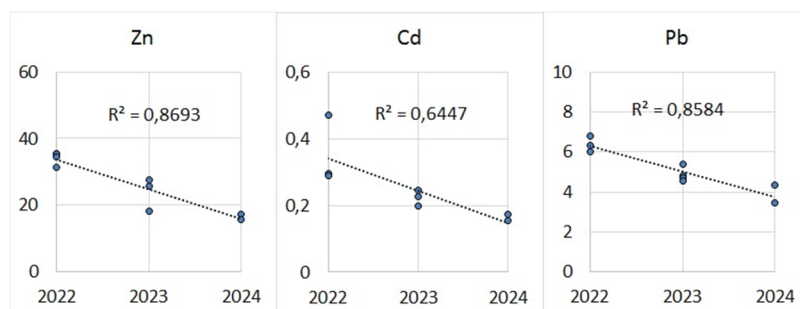


Рис. 3. Тренды изменения концентрации элементов в торфе (мг/кг) за 3 года на участках, прилегающих к выгоревшим

Fig. 3. Trends in changes in the concentration of elements in peat (mg/kg) over three years in sites adjacent to burnt areas

На всех исследованных участках *Chamaedaphne calyculata* к 2022 году полностью восстановила обилие, которое наблюдалось до пожара. Поэтому в период, рассматриваемый в данной статье, именно кустарнички внесли большой вклад в изменение химического состава верхней части торфяной залежи. Как и в торфе, на всех рассмотренных участках с 2022 по 2024 год наблюдается тренд на снижение содержания Na, Zn, Pb и Cd, а кроме того, в листьях снижается концентрация Cu. На постпирогенных участках как в торфе, так и в листьях в течение трёх лет наблюдается рост концентрации K, Mg, Ca и Mn (Рис. 4). При сравнении попарно постпирогенных и невыгоревших участков по содержанию элементов в листьях *Ch. calyculata* обнаружилось, что на постпирогенных участках наблюдается более высокая концентрация Zn и Cd (Табл. ПЗ).

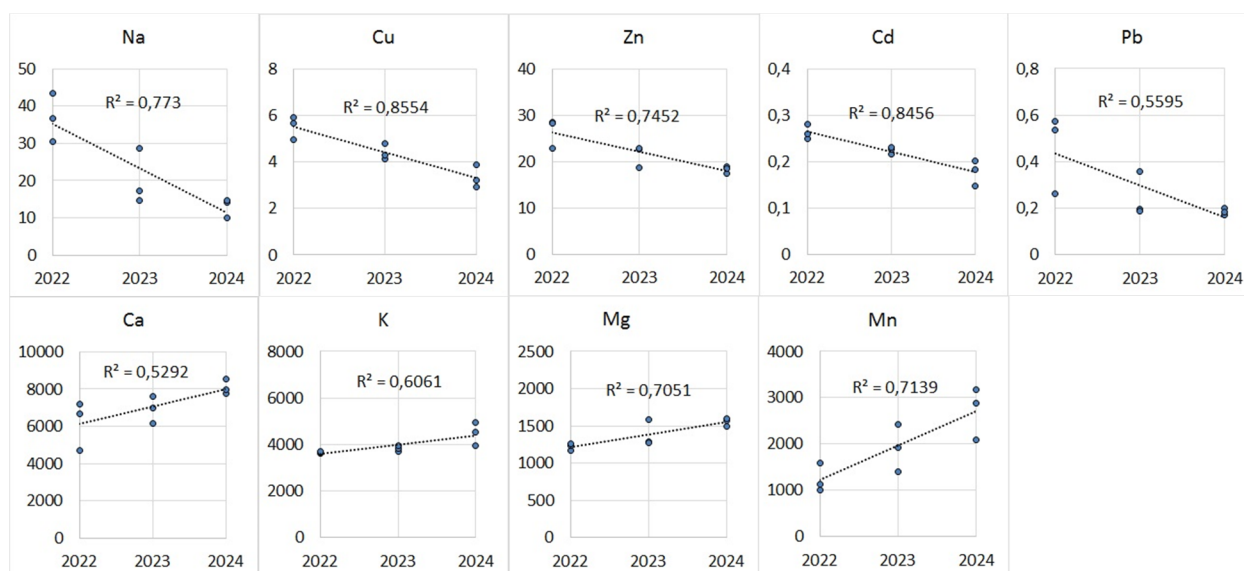


Рис. 4. Изменение концентрации элементов в листьях *Chamaedaphne calyculata* (мг/кг) за 3 года на постпирогенных участках

Fig. 4. Trends in changes in the concentration of elements in leaves of *Chamaedaphne calyculata* (mg/kg) in in post-pyrogenic sites

На участках болот, не пострадавших от огня, но прилегающих к выгоревшим, за три года наблюдения не увеличивалась концентрация элементов в листьях *Ch. calyculata*, но, как и в торфе, обнаружено понижение концентрации Zn, Pb и Cd, а кроме того, обнаружен тренд на снижение уровня содержания Fe и Cu (Рис. 5).

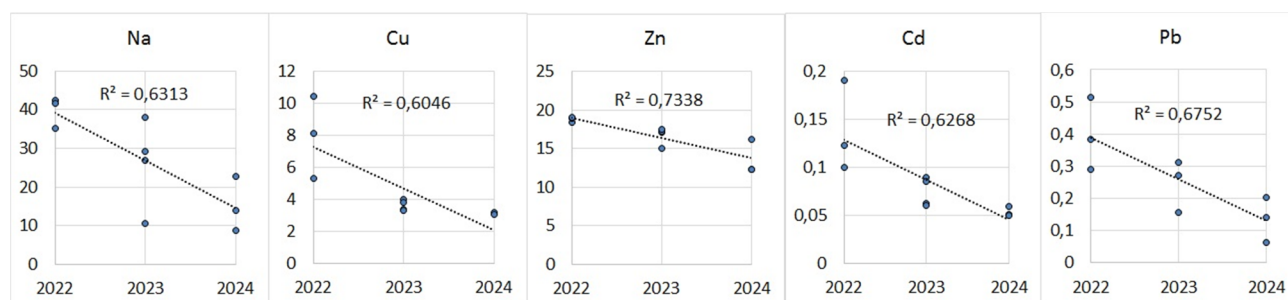


Рис. 5. Изменение концентрации элементов в листьях *Chamaedaphne calyculata* (мг/кг) за 3 года на участках, прилегающих к выгоревшим

Fig. 5. Trends in changes in the concentration of elements in leaves of *Chamaedaphne calyculata* (mg/kg) in sites adjacent to burnt areas

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования, проведённые нами в первые годы после пожара, показали, что на постпирогенных участках в результате выгорания растительности в верхнем слое торфа произошло накопление элементов и активное поглощение их растениями, что способствовало быстрому восстановлению растительности, в первую очередь кустарничкового яруса [Gashkova, Sinyutkina, 2025]. Обнаруженное нами в данном исследовании изменение элементного состава верхнего слоя торфа в процессе восстановления болота закономерно, поскольку верхняя часть торфяной залежи наиболее чутко реагирует на постпирогенную трансформацию болота, что отмечалось ранее [Stepanova, Pokrovsky, 2011; Dymov et al., 2022]. Постпирогенное снижение концентрации Zn, Pb и Cd на протяжении трёх лет свидетельствует о постепенном выщелачивании элементов, минерализованных и конденсированных из частиц дыма во время пожара [Gray, Dighton, 2006; Alves et al., 2010]. Такое снижение происходит благодаря тому, что кислотность торфа, снизившаяся после пожара, в последующие годы начинает повышаться в процессе восстановления болота, увеличивая

подвижность тяжёлых металлов [Lipatov et al., 2016; Colin et al., 2024]. При исследовании почв междуречья Пура и Надыма исследователями отмечается более низкое содержание элементов по сравнению с таёжной зоной [Romanenko et al., 2020]. Такое соотношение согласуется с зафиксированными нами низкими концентрациями P, Mg, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn и Pb в подстиляющей породе на участках болот в лесотундре.

Содержание элементов в торфе напрямую связано с химическим составом растений, опад которых начинает влиять на биогеохимическую обстановку постпирогенных участков, благодаря началу восстановления кустарничкового яруса, уже в первый год после пожара [Sinyutkina, Gashkova, 2025]. В листьях растений постпирогенных участков, как и в торфе, на протяжении трёх лет нами обнаружено увеличение содержания элементов Mg, K, Ca и Mn, которые, как отмечено [Stavrova et al., 2019], активно поглощаются растениями из золы в первые годы после пожара. Кроме того, зола и обугленные остатки в результате разрушения обгоревшего древостоя продолжают поступать в почву, обогащая её данными элементами на протяжении нескольких лет после пожара [Ukrainitsev et al., 2016].

Отмеченные нами для всех участков лесотундры высокие уровни КК объясняются как характерными для данного региона низкими уровнями элементов в подстиляющей породе [Romanenko et al., 2020; Pechkin et al., 2021], так и аэрогенным загрязнением, связанным с деятельностью нефтегазодобывающих предприятий, что отражается на элементном составе торфа [Voronova, Grebenyuk, 2018]. Более высокий КК элементов Ca, Fe, Cu, Zn и Pb на постпирогенных участках по сравнению с невыгоревшими указывает на то, что процесс восстановления элементного состава торфа ещё не закончился; по мнению некоторых авторов, такой процесс может затянуться на несколько десятилетий [Leonard et al., 2017; Mergelov, 2015].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования обнаружено, что спустя 6-8 лет после пожара на постпирогенных и прилегающих к ним участках болот продолжают происходить процессы восстановления. Установлено, что индикатором восстановления элементного состава постпирогенных верховых болот могут служить концентрации элементов Zn, Pb и Cd в торфе и листьях кустарничков. Восстановление элементного состава проявляется главным образом в снижении содержания данных элементов на протяжении трёх лет как на постпирогенных, так и на прилегающих к ним участках. Коэффициенты концентрации торфа относительно подстиляющей породы отражают остаточное влияние постпирогенных изменений и региональные особенности участков. На основании сравнения элементного состава торфа можно сказать, что медленнее других восстанавливается после пожара болото, испытывающее наибольший антропогенный пресс. Региональные особенности выражаются в низком содержании элементов в подстиляющей породе болот, расположенных в лесотундровой зоне, по сравнению с таёжными.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

ПРИЛОЖЕНИЕ / APPENDIX

Таблица П1. Среднее содержание элементов в подстиляющей породе (мг/кг, n=18) и коэффициенты концентрации (КК)

Table П1. Average content of elements in the underlying rock (mg/kg, n=18) and concentration coefficients (KK)

Участок	Na	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
ВВ	6242	2965	418	9826	5069	258	17337	25	59	0.19	17.4
SD	430	91	53	266	427	10	352	6	7	0.04	1.4
КК	0.03	0.14	0.70	0.08	0.11	0.24	0.05	0.1	0.39	0.89	0.24
ВФ	6652	3650	409	9330	4535	292	22172	27	78	0.17	15.9

Таблица П1. Продолжение.

Table П1. Continuation.

Участок	Na	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
SD	641	117	16	294	323	4	671	2	3	0.01	1.6
KK	0.06	0.16	0.66	0.10	0.48	0.65	0.08	0.21	0.34	1.34	0.52
UBB	7058	2538	415	9297	5620	167	16175	29	63	0.37	19.4
SD	261	70	31	269	48	11	552	3	3	0.03	1.2
KK	0.04	0.20	0.74	0.10	0.29	0.37	0.07	0.14	0.36	0.84	0.31
UBF	6505	2942	506	10595	4076	168	18691	29	65	0.01	16.7
SD	485	107	38	128	826	13	302	2	1	0.05	0.6
KK	0.08	0.17	0.90	0.08	0.71	1.02	0.09	0.19	0.70	0.57	1.15
PB	5802	1081	147	9530	699	116	9096	9	26	0.07	7.9
SD	694	18	29	126	34	2	870	1	0.4	0.01	0.6
KK	0.05	0.68	2.87	0.11	2.74	0.59	0.28	0.61	1.20	3.86	0.72
PF	6531	1488	159	9544	2401	121	8510	9	23	0.10	9.8
SD	160	38	28	271	385	3	376	0.1	5	0.01	0.1
KK	0.05	0.62	4.04	0.09	1.13	1.19	0.72	0.76	1.40	1.69	0.90

Примечание: Жирным шрифтом отмечены значения KK на постпирогенных участках, достоверно превышающие KK на участках того же болота, прилегающих к выгоревшим.

Таблица П2. Среднее содержание элементов в верхнем слое торфа (мг/кг, n=18)

Table П2. Average content of elements in the upper peat layer (mg/kg, n=18)

Участок	Na	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
BB	255	471	275	859	1340	100	1019	4	26	0.19	4.63
SD	39	46	107	231	248	68	353	1	9	0.03	0.91
BF	418	588	267	931	2159	191	1768	6	26	0.22	8.23
SD	57	6	34	97	130	45	423	1	4	0.04	1.50
UBB	280	505	306	940	1629	58	1158	4	22	0.30	5.90
SD	57	44	28	223	810	25	223	0.4	4	0.12	0.98
UBF	518	511	450	884	2827	170	1727	5	46	0.26	19.20
SD	79	61	57	105	59	23	662	1	12	0.02	5.16
PB	308	735	406	1058	1895	68	2513	5	31	0.28	5.70
SD	37	103	119	94	502	27	705	1	4	0.01	0.90
PF	343	927	621	877	2637	145	6123	7	33	0.16	8.80
SD	12	51	141	81	311	31	1382	1	11	0.00	0.66

Таблица П3. Среднее содержание элементов в листьях *Chamaedaphne calyculata* (мг/кг, n=18)Table П3. Average elemental content in *Chamaedaphne calyculata* leaves (mg/kg, n=18)

Участок	Na	Mg	P	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
BB	22	1101	660	3938	5680	1919	141	5	15	0.07	0.22
SD	10	145	53	573	2075	146	84	3	2	0.03	0.08
BF	35	1241	754	3823	7396	2548	84	4	20	0.22	0.49
SD	8	53	136	95	834	691	7	1	2	0.01	0.09
UBB	41	1747	963	3884	6955	927	77	6	17	0.12	0.29
SD	2	125	129	386	439	29	11	2	3	0.05	0.07
UBF	14	1338	985	3662	7573	2147	119	4	23	0.22	0.21
SD	3	113	92	32	319	203	42	1	4	0.05	0.04
PB	21	1322	874	4137	6022	1007	67	3	17	0.08	0.24
SD	8	139	101	807	397	245	8	0.4	1	0.01	0.19
PF	25	1582	886	4481	6207	1180	72	5	23	0.23	0.19
SD	7	9	47	408	1235	168	15	1	4	0.04	0.01

ЛИТЕРАТУРА

- Alves C.A., Gonçalves C., Pio C.A., Mirante F., Caseiro A., Tarelho L., Freitas M.C., Viegas, D.X. 2010. Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland. *Atmospheric Environment*, 44(25): 3024-3033. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.05.010
- Belkova T.A., Perminov V.A., Alekseev N.A. 2016. Review of ecological and economic impacts of peat fires. *XXI century. Technosphere safety*; 1(3): 35-44 (In Russian). [Белькова Т.А., Перминов В.А., Алексеев Н.А. 2016. Обзор эколого-экономических последствий торфяных пожаров // XXI век. Техносферная безопасность. № 3. С. 35-44.]
- Colin P.R. McCarter C.P.R., Clay G.D., Wilkinson S.L., Sigmund G., Davidson S.J., Taufik M., Page S., Shuttleworth E.L., McLagan D., Chenier G., Clark A., Waddington J.M. 2024. Peat fires and legacy toxic metal release: An integrative biogeochemical and ecohydrological conceptual framework. *Earth-Science Reviews*, 256: 04867. DOI: 10.1016/j.earscirev.2024.104867
- Dymov A.A., Gorbach N.M., Goncharova N.N., Karpenko L.V., Gabov D.N., Kutyavin I.N., V Startsev.V., Mazur A.S., Grodnitskaya I.D. 2022. Holocene and recent fires influence on soil organic matter, microbiological and physico-chemical properties of peats in the European North-East of Russia. *Catena*, 217: 106449. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106449.
- Efremova T.T., Efremov S.P., Onuchin A.A. Kutsenogii K.P., Peresedov V.F. 2003. Biogeochemistry of Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, and U in a low moor peat deposit of the Ob'-Tom' interfluvium. *Eurasian Soil Science*. 36(5):501-510.
- Gajendiran K., Kandasamy S., Narayanan M. 2024. Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research*, 240(2): 117537. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117537
- Gashkova L.P. 2022. Influence of fire on the distribution of elements in the peat deposit of the bog. *Geosphere Research*, 1: 118-125. DOI: 10.17223/25421379/22/9
- Gashkova L.P., Sinyutkina A.A. 2025. Assessment of post-fire transformation of element uptake by plants in bogs in the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 336(9): 227-238. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4924
- Granged A.J.P., Zavala L.M., Jordán A., Bárcenas-Moreno G. 2011. Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma*, 164(1-2): 85-94. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.05.017
- Gray D.M., Dighton J. 2006. Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6): 1469-1477. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.11.003
- Hall G.E.M. 1992. Inductively coupled plasma mass spectrometry in geoanalysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 44(1-3): 201-249. DOI: 10.1016/0375-6742(92)90051-9.
- Kala C.P. 2023. Environmental and socioeconomic impacts of forest fires: A call for multilateral cooperation and management interventions. *Natural Hazards Research*, 3(2): 286-294. DOI: 10.1016/j.nhres.2023.04.003
- Karavaeva N.A. 1973. Soils of the taiga of Western Siberia. Nauka, Moscow, 168 p. (In Russian). [Каваева Н.А. 1973. Почвы тайги Западной Сибири. Москва, Наука. 168 с.]
- Kuzmina D., Lim A.G., Loiko S.V., Pokrovsky O.S. 2022. Experimental assessment of tundra fire impact on element export and storage in permafrost peatlands. *Science of The Total Environment*, 853: 158701. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.158701
- Leonard J.M., Magaña H.A., Bangert R.K., Neary D.G., Montgomery W.L. 2017. Fire and Floods: The Recovery of Headwater Stream Systems Following High-Severity Wildfire. *Fire Ecology*, 13: 62-84. DOI: 10.4996/fireecology.130306284
- Li G., Sun L., Ji S., Li X., Cong J., Han D., Wang G., Gao C. 2025. Low-severity fire promote carbon emissions in permafrost peatlands of the Great Khingan Mountains, Northeast China. *Catena*, 252: 108870. DOI: 10.1016/j.catena.2025.108870
- Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V., Brekhov P.T. 2016. Spatial heterogeneity in the properties of high-moor peat soils under local pyrogenesis in northeastern Sakhalin. *Eurasian Soil Science*, 2016. 49(2): 238-250. DOI: 10.7868/S0032180X16020076
- Mergelov N.S. 2015. Post-pyrogenic Transformation of Soils and Soil Carbon Stocks in Sub-Tundra Woodlands of Kolyma Lowland: a Cascading Effect and Feedbacks. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, (3): 129-140 (In Russian). [Мергелов Н.С. 2015. Постпирогенная трансформация почв и запасов почвенного углерода в предтундровых редколесьях Колымской низменности: каскадный эффект и обратные связи // Известия Российской академии наук. Серия географическая. № 3. С. 129-140.] DOI: 10.15356/0373-2444-2015-3-129-140
- Ortíz-Rodríguez A.J., Muñoz-Robles C., Borselli L. 2019. Changes in connectivity and hydrological efficiency following wildland fires in Sierra Madre Oriental, Mexico. *Science of The Total Environment*, 655: 112-128. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.236
- Pechkin A.S., Shinkaruk E.V., Pechkina Yu.A., Krasnenko A.S., Kolesnikov R.A. 2021. Content of heavy metals and metalloids in pyrogenic northern taiga soils of the Nadym-Pur-Taz interfluvium. *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District*, 111(2): 112-123 (In Russian). [Печкин А.С., Шинкарук Е.В., Печкина Ю.А., Красненко А.С., Колесников Р.А. 2021. Содержание тяжелых металлов и металлоидов в пирогенных северотазовских почвах Надым-Пур-Тазовского междуречья // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. Т. 111 № 2. С. 112-123.] DOI: 10.26110/ARCTIC.2021.111.2.008
- Romanenko E.A., Moskovchenko D.V., Kudryavtsev A.A., Shigabaeva G.N. 2020. Mobile forms of metals in soils in the Nadym-Pur interfluvium (Western Siberia). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2: 136-145(In Russian). [Романенко Е.А., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А., Шигабаева Г.Н. 2020. Подвижные формы металлов в почвах Надым-Пуровского междуречья (Западная Сибирь) // Вестник Нижневартовского государственного университета. № 2. С. 136-145.] DOI: 10.36906/2311-4444/20-2/18
- Rybina T. A., Bazanov V. A., Golubina O. A., Sergeeva M. A. 2015. Studying the active layer of oligotrophic bogs in the Taiga zone of Western Siberia. *International Journal of Environmental Studies*, 72(3): 448-455. DOI: 10.1080/00207233.2015.1027588

- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A. 2024. Pyrogenic changes of bog vegetation and peat in Western Siberia. *Lomonosov Geography Journal*. 1: 78-88 (In Russian). [Синюткина А.А., Гашкова Л.П., Харанжевская Ю.А. Пирогенное изменение болотной растительности и торфа в Западной Сибири // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2024. Т. 79. № 1. С. 78-88]. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. 2025. Assessment of Post-Fire Vegetation Dynamics in a Raised Bog (Western Siberia) Based on Landsat Satellite Data. *Regional Geosystems*, 49(1), 112-127 (In Russian). [Синюткина А.А., Гашкова Л.П. 2025. Оценка постпирогенной динамики растительности верхового болота (Западная Сибирь) на основе спутниковых данных Landsat // Региональные геосистемы, 49, № 1. С. 112-127.] DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-112-127
- Stavrova N.I., Kalimova I.B., Gorshkov V.V., Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Bakkal I.Yu. 2019. Long-Term Postfire Changes of Soil Characteristics in Dark Coniferous Forests of the European North. *Eurasian Soil Science*. 52(2): 218-227. DOI: 10.1134/S1064229319020133
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S. 2011. Macroelements composition of raised bogs peat in the middle taiga of Western Siberia (the bogs complex Mukhrino). *Tomsk State University Journal*, 352: 211-214 (In Russian). [Степанова В.А., Покровский О.С. 2011. Макроэлементный состав торфа выпуклых верховых болот средней тайги Западной Сибири (на примере болотного комплекса «Мухрино» // Вестник Томского государственного университета. № 352. С. 211-214].
- Ukrainsev A.V., Plyusnin A.M., Zhambalova D.I. 2016. Using the chemical composition of snow to assess the long-term impact of forest fires on the ecological state of territories. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2: 56-62. (In Russian) [Украинцев А.В., Плюснин А.М., Жамбалова Д.И. 2016. Использование химического состава снега для оценки долгосрочного влияния лесных пожаров на экологическое состояние территорий // Вестник ВГУ, серия: География. геоэкология, № 2. С. 56-62.]
- Voronova I.V., Grebenyuk G.N. 2018. Engineering and geocryologic conditions of the Harampur oil-gas condensate field Pur-Tazovsky of entre rios. *Geology, Geography and Global Energy*, 2 (69): 48-57 (In Russian). [Воронова И.В., Гребенюк Г.Н. 2018. Инженерно-геокриологические условия Харампурского нефтегазоконденсатного месторождения Пур-Тазовского междуречья // Геология, география и глобальная энергия. № 2(69). С. 48-57.]
- Wu Y., Zhang N., Slater G., Waddington J.M., Lannoy Ch.F. 2020. Hydrophobicity of peat soils: Characterization of organic compound changes associated with heat-induced water repellency. *Science of The Total Environment*, 714: 136444. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136444.

Поступила в редакцию: 16.10.2025
 Переработанный вариант: 04.12.2025
 Принято в печать: 05.12.2025
 Опубликовано: 17.12.2025