

ГЕОХИМИЯ

УДК 556+504

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПИРОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ПО СОДЕРЖАНИЮ Cu, Pb, Zn И Cd В КОМПОНЕНТАХ ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)



Ю.А. Харанжевская^{1,2}, А.А. Синюткина¹, Л.П. Гашкова¹

¹ Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал СФНЦА РАН, Россия, Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, Томск

В статье проведена оценка пирогенной нагрузки и экологических последствий пожара 2016 г в пределах северо-восточных отрогов Васюганского болота. В 2016–2018 гг. был организован мониторинг атмосферных выпадений в пределах постпирогенного участка и за его границей, определялось содержание Cu и Pb, Zn, Cd в торфе, растениях, в болотных и речных водах. Установлено, что в составе атмосферных выпадений на постпирогенных участках повышается количество Zn в 2 раза, Pb – в 14, Cu – в 4, Cd – до 9 раз, а территория, связанная с загрязнением Zn и Pb в результате пожара 2016 г., охватывает зону в 8 км, что согласуется с розой ветров. Исследования (Щербов и др., 2016) показали, что в верхнем слое (0–5 см) торфяной залежи отмечается значительное повышение концентраций Cu, Zn, Cd, Pb в 3–6 раз относительно фоновой участка в 100 м от границы (РГ). По оценкам (Щербов и др., 2016) зона экстремального загрязнения тяжелыми металлами ограничивается в основном зоной интенсивного выгорания поверхности, однако и за ее пределами также отмечено существенное (в 2 раза) повышение концентрации Zn, Cd, Pb, за исключением Cu, преимущественно за счет миграции элементов с болотными водами. Содержание тяжелых металлов также достоверно возрастает на постпирогенных участках в *Sphagnum fuscum* и *Pinus sylvestris* в течение вегетационного периода.

Ключевые слова: торф, болотные воды, тяжелые металлы, пирогенная нагрузка, Васюганское болото, Западная Сибирь.

Введение

В настоящее время природные пожары приобрели катастрофические масштабы и стали реальным экологическим бедствием. Торфяные пожары вызывают долгосрочное задымление населенных пунктов и являются серьезной экологической проблемой для многих стран мира [Kunii et al., 2002; Rappold et al., 2011; Shcherbov, 2012; George et al., 2016; Gregory et al., 2018]. Торфяные пожары способны сохраняться на протяжении длительного времени (от недели до нескольких лет), несмотря на интенсивные выпадения атмосферных осадков и усилия по борьбе с ними [Page, Baird, 2016]. Зачастую очаги возгорания возникают в более отдаленных от инфраструктуры местностях, что осложняет доставку техники для их локализации. Несмотря на усовершенствование системы прогноза пожарной опасности количество пожаров не уменьшается год от года, и начиная с 1989 г. появилась выраженная тенденция к возрастанию горимости лесов и количества торфяных пожаров. Считается, что причиной значительного увеличения пожарной активности со второй половины XX в. послужили рост городов и повышение антропогенной нагрузки [Ganteaume et al., 2013; Lamentowicz et al., 2015]. Одновременно с этим причиной также являются наблюдаемые изменения климата, которые связаны с досто-

верным увеличением температуры воздуха и изменением характера циркуляции атмосферы на планете, что и приводит к увеличению частоты возникновения засушливых пожароопасных периодов [Dai, 2013; Shvidenko, Schepaschenko, 2013; Loginov et al., 2014; Huang et al., 2016].

Пирогенный фактор вносит существенный вклад в трансформацию органического вещества болот и динамику накопления углерода. При сжигании биомассы потери углерода из торфа в атмосферу составляют в среднем $3,2 \pm 0,4 \text{ кгC/m}^2$ [Turetsky et al., 2002]. Пожары на болотах приводят к изменению их растительного покрова [Benscoter, Vitt, 2008], химических и водно-физических свойств торфяной залежи, трансформации биогеохимических циклов элементов [Rosenburg et al., 2013; Guoping et al., 2015], способствуют выносу значительного количества загрязняющих веществ (тяжелых металлов, полиароматических углеводородов и др.) [Shcherbov, Lazareva, 2010; George et al., 2016], причиняя вред человеческому здоровью на территориях, значительно превосходящих площади возгорания [Betha et al., 2013; Hayasaka et al., 2014]. В последнее время участились пожары в пределах заболоченных территорий Западной Сибири. Исследования показали, что при верховых пожарах активно мигрируют Hg, Cd, As, Zn, Mg, а также ^{137}Cs , ^{90}Sr , в меньшей степени

Pu, Pb, повышается концентрация Ni, Co, Cr. В зависимости от типа пожара эмиссия элементов может достигать от 15 до 60% от исходного количества. По оценкам ежегодная эмиссия отдельных тяжелых металлов в результате пожаров в Сибири составляет от 1–2 (Hg, Cd, As, Sb) до тысяч тонн (Pb, Zn, Mn) [Щербов и др., 2015]. Таким образом, проблема природных пожаров и их экологических последствий для Западной Сибири остается весьма актуальной. **Цель** данной работы – оценка пирогенной нагрузки и экологических последствий пожара 2016 г. на участке северо-восточных отрогов Васюганского болота.

Объектом исследования является участок осушенного болота в бассейне р. Гавриловка (северо-восточные отроги Васюганского болота) в Бакчар-

ском районе Томской области, выгоревший в период с августа по октябрь 2016 г. Площадь выгоревшей территории составила 5,54 км². Территорию можно дифференцировать согласно трем классам пирогенной нагрузки, отличающимся по характеру повреждений почвенно-растительного покрова. Для участков 1-го класса пирогенной нагрузки характерна гибель древесного яруса и выгорание надземной части травяно-кустарничкового и полное выгорание мохового яруса на всех формах микрорельефа. Для участков 2-го класса пирогенной нагрузки отмечено частичное выгорание поверхности в пределах 40–60%. На участках 3-го класса пирогенной нагрузки наблюдаются частичное выгорание почвенного покрова и торфяной залежи, обгорание корней и повал деревьев (рис. 1).

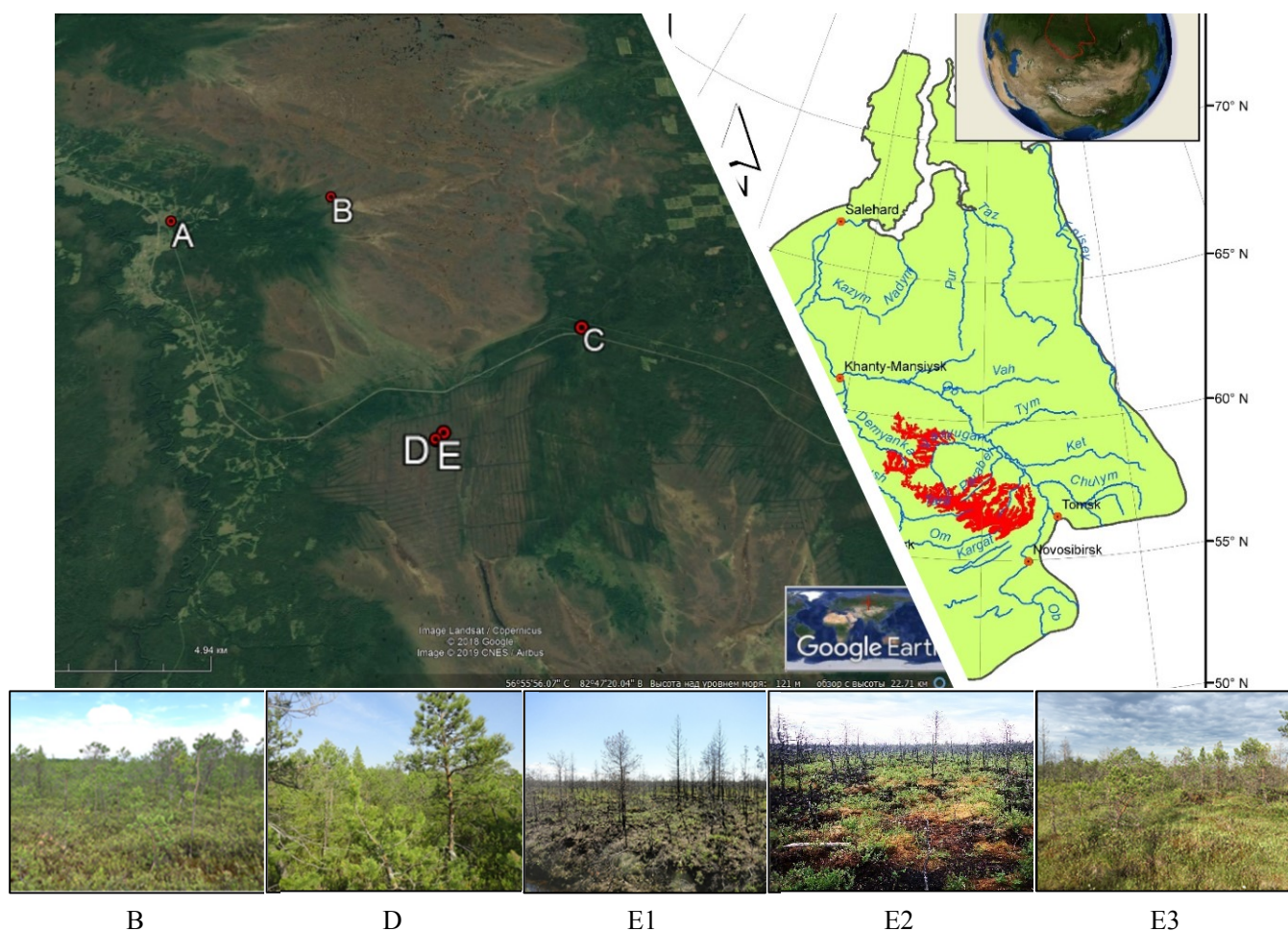


Рис. 1. Схема расположения территории исследования в пределах Васюганского болота

A – р. Ключ; B – сосново-кустарничково-сфагновое верховое болото (фоновый участок), C – р. Гавриловка; D – осушенное сосново-кустарничково-сфагновое верховое болото в 100 м от границы пожара; E1 – участок 1-го класса пирогенной нагрузки с выгоранием мохового и травяно-кустарничкового ярусов на всех формах микрорельефа; E2 – участок 2-го класса с частичным выгоранием поверхности в пределах 40–60%; E3 – локальный естественный участок болота внутри контура пожара

Fig. 1. The location of the study area within the Great Vasyugan Mire

A – Klyuch River; B – pine-shrub-sphagnum raised bog (background site); C – Gavrilovka River; D – drained pine-shrub-sphagnum raised bog within distance 100 m from the fire boundary; E1 – site 1st class of pyrogenic load with burnout of moss and grass-shrub layers on all forms of microrelief; E2 – site of class 2 with partial burnout of the surface (40–60%); E3 – local pristine area of the bog inside the fire contour

Методика исследований

Для оценки пирогенной нагрузки в 2016–2018 гг. был организован мониторинг атмосферных выпадений Cu и Pb, Zn, Cd в пределах пирогенного участка и за его границей, определялось содержание тяжелых металлов в болотных водах, речных водах, в торфе и растениях. Отбор проб производился в пределах четырех пунктов осушенного сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота в бассейне р. Гавриловка: ПГ1 – участок 1-го класса пирогенной нагрузки с выгоранием мохового и травяно-кустарничкового ярусов на всех формах микрорельефа, ПГ2 – участок 2-го класса с частичным выгоранием поверхности в

пределах 40–60%, ПГ3 – локальный естественный участок болота внутри контура пожара, РГ – участок в 100 м за границей пожара. В качестве фоновой территории был принят аналогичный участок сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота в бассейне р. Ключ в 8 км на северо-запад от выгоревшей территории. Для анализа миграционной активности тяжелых металлов также проводился отбор проб речных вод в реках Гавриловка и Ключ. Анализ атмосферных выпадений Cu и Pb, Zn, Cd осуществлялся методом пассивного отбора проб атмосферного оседания пыли по содержанию частиц на 1 м^2 за интервал времени 1 месяц с применением пластиковых пробоотборников, установленных на 2 м (рис. 2).



Рис. 2. Мониторинг атмосферных выпадений с применением методики Геологической службы США

Fig. 2. Monitoring of atmospheric deposition using the methodology of the US Geological Survey

В пробоотборниках на сетку, закрепленную на 3–4 см ниже края, помещают стеклянные шарики [Reheis, 2003]. Пробоотборники перед установкой тщательно промываются дистиллированной водой. Отбор проб торфа проводился с применением торфяного бура ТБГ-66 по генетическим горизонтам в соответствии с видами торфа и степенью разложения. Пробы болотных и речных вод отбирали специально подготовленным пробоотборником с глубины 30–50 см в стерильные пробирки.

Для анализа содержания Cu и Pb, Zn, Cd были отобраны типичные виды болотных растений *Chamaedaphne calyculata*, *Pinus silvestris*, *Sphagnum fuscum*. Анализ проб производился после предварительного кислотного разложения методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-МС) в Химико-аналитическом центре «Плазма».

Результаты и их обсуждение

Анализ данных по пробоотборнику, установленному в пределах контура пожара, показал, что в составе атмосферных выпадений достоверно повышается количество Zn в 2 раза, Pb – в 14 раз, Cu – в 4 раза, Cd – до 9 раз (рис. 3). В целом территория, связанная с загрязнением Zn и Pb в результате пожара 2016 г. охватывает зону в 8 км, что согласуется с розой ветров.

Такой вывод был сделан по результатам анализа атмосферных выпадений по пробоотборнику, установленному в пределах верхового сосново-кустарничково-сфагнового участка Васюганского болота в 8 км на северо-запад от участка пожара. Так, в 2016 г. были отмечены сопоставимые величины модуля аэрального поступления Zn, модуль, равный $0,4\text{ мг/м}^2$ месяц, отмечен в 2016 и 2018 г. на участке пожара.

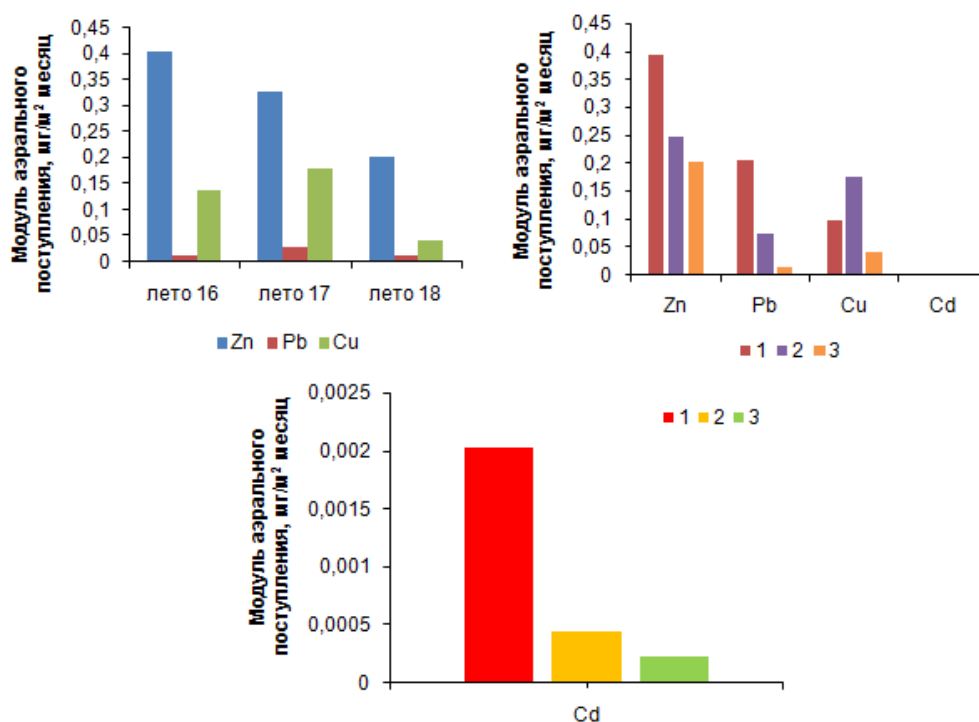


Рис. 3. Модуль аэрального поступления Zn, Cu, Pb, Cd в зоне влияния пожара 2016 г.

1 – ПГ1, 2 – РГ, 3 – фоновый участок сосново-кустарничково-сфагнового болота в 8 км

Fig. 3. The module of the aerial input of Zn, Cu, Pb and Cd in the zone of influence of the fire in 2016

1 – PG1, 2 – RG, 3 – background site of a pine-shrub-sphagnum bog, 8 km from the fire area

Таким образом, модуль аэрального поступления Zn в летний период 2018 г. в пределах участка пожара составляет 0,4 мг/м² месяц, тогда как на расстоянии 100 м в пределах аналогичного участка (РГ) модуль снижается до 0,25 мг/м² месяц, что практически соответствует фоновой территории; на участке естественного сосново-кустарничково-сфагнового болота в бассейне р. Ключ в 8 км на северо-запад модуль составил 0,2 мг/м² месяц. Модуль аэрального поступления Pb существенно ниже и на участке пожара составил 0,2 мг/м² месяц, снижаясь более чем в 2 раза на расстоянии 100 м от контура пожара и достигая минимальных значений на расстоянии 8 км от пирогенного участка. Модуль аэрального поступления Cu имеет неоднозначную закономерность и повышается относительно фона в стометровой зоне за границей пожара больше, чем в его пределах. Модуль аэрального поступления Cd существенно повышается на пирогенном участке до 0,002 мг/кг, снижаясь в 5 раз в стометровой зоне. Ретроспективный анализ показал снижение концентрации Zn и Cu в составе атмосферных выпадений в 2018 г. в сравнении с 2016 г. Анализ данных по содержанию Cu в торфяной залежи мониторинговых пунктов в пожарном контуре (ПГ1, ПГ2, ПГ3) и за его пределами в 100 м (РГ) показал достоверное увеличение концен-

трации элемента в верхнем слое 0–5 см в 3–6 раз относительно фона только в пределах двух участков, для которых характерно выгорание поверхности. Так, в пределах ПГ1 содержание Cu составило 13,4 мг/кг, а в пределах ПГ2 равно 23,5 мг/кг (см. рис. 4–7).

Содержание Zn достоверно увеличивается в 3 раза относительно фона в слое 0–5 см в пределах ПГ1 и ПГ2, концентрация составляет 70,1 и 69,6 мг/кг соответственно. В пределах ПГ3 так же, как и на участке за пределами пожарного контура (РГ), повышение концентрации Zn отмечается не на поверхности, а в слое 20–30 см (ПГ3) и 15–20 см (РГ) а содержание изменяется в пределах 44 и 41,8 мг/кг соответственно, что связано с процессами миграции Zn с болотными водами.

Содержание Cd также повышается в слое 0–5 см торфяной залежи до экстремальных величин 0,77 и 1,04 мг/кг (в 3–4 раза выше фона) в пределах ПГ1 и ПГ2 соответственно. Для участка ПГ3 повышение концентрации Cd в верхнем слое 0–5 см не обнаружено, однако концентрации элемента повышаются в слое 20–30 см до величин 0,42 мг/кг, что в 2 раза превышает фоновые концентрации, характерные для РГ (0,27 мг/кг). В верхнем слое ПГ1 и ПГ2 отмечается также существенное повышение Pb до величин 53,4 и 36,5 мг/кг соответственно, что в 4–6 раз превышает фоновое содержание в 100 м от границы по-

жара РГ (8,12 мг/кг). Между тем следует отметить повышение концентрации Pb в слое 20–30 см (ПГЗ) и в слое 15–20 см (РГ), что свидетельствует об ак-

тивной миграции элемента с болотными водами в толще торфяной залежи. Повышение концентрации Pb в этом случае составляет до 14,8–16,5 мг/кг.

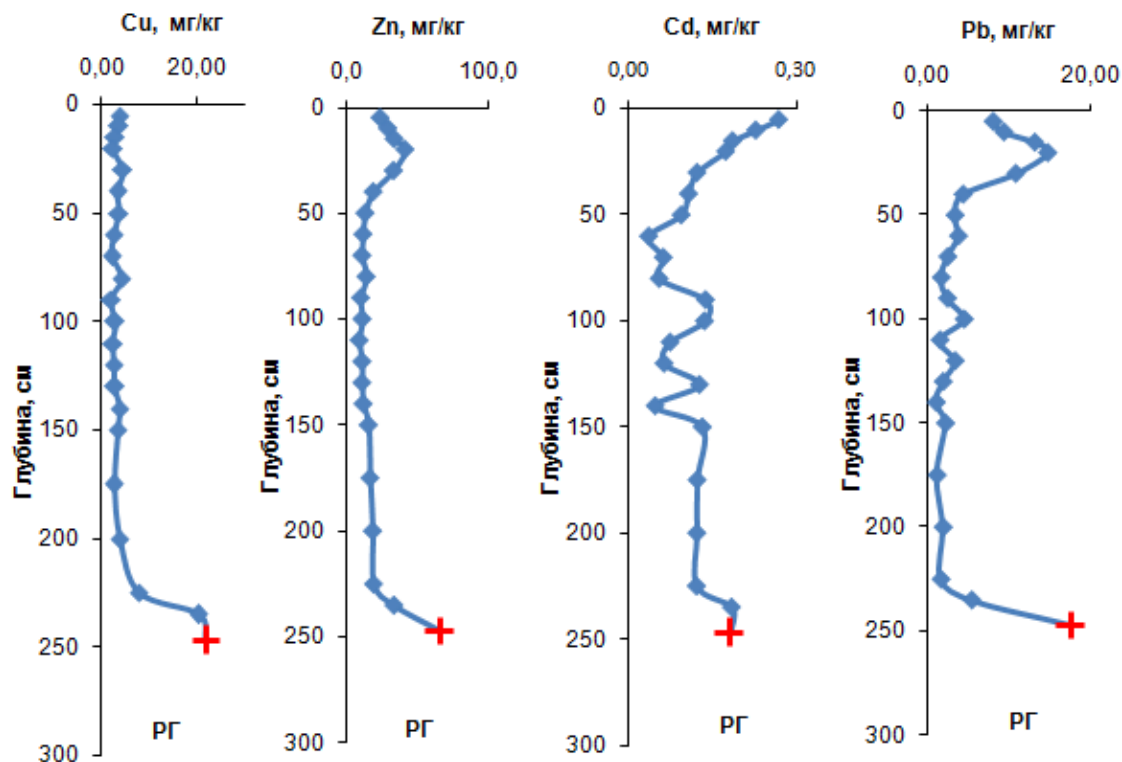


Рис. 4. Изменение Zn, Pb, Cu и Cd по глубине торфяной залежи (красным отмечено содержание в подстилающих породах)

Fig. 4. Distribution of Zn, Pb, Cu and Cd in the peat deposit (the content in the underlying rocks is marked in red)

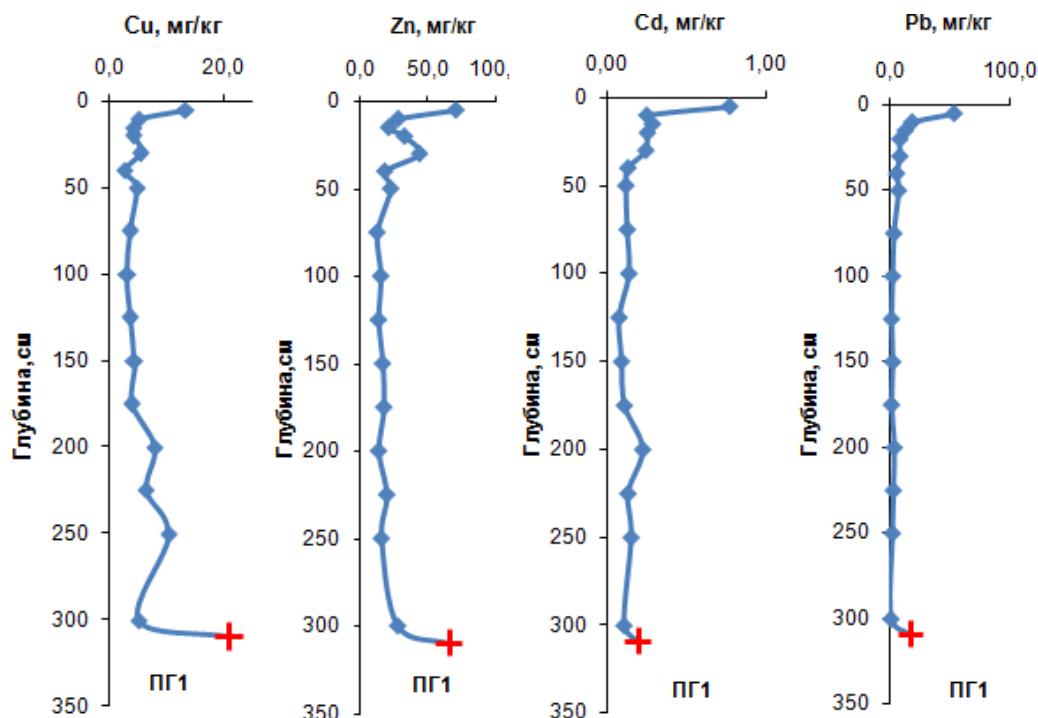


Рис. 5. Изменение Zn, Pb, Cu и Cd по глубине торфяной залежи в зоне максимальной пирогенной нагрузки, 1-й класс (красным отмечено содержание в подстилающих породах)

Fig. 5. Distribution of Zn, Pb, Cu and Cd in the peat deposit within the zone of maximum pyrogenic load, class 1 (the content in the underlying rocks is marked in red)

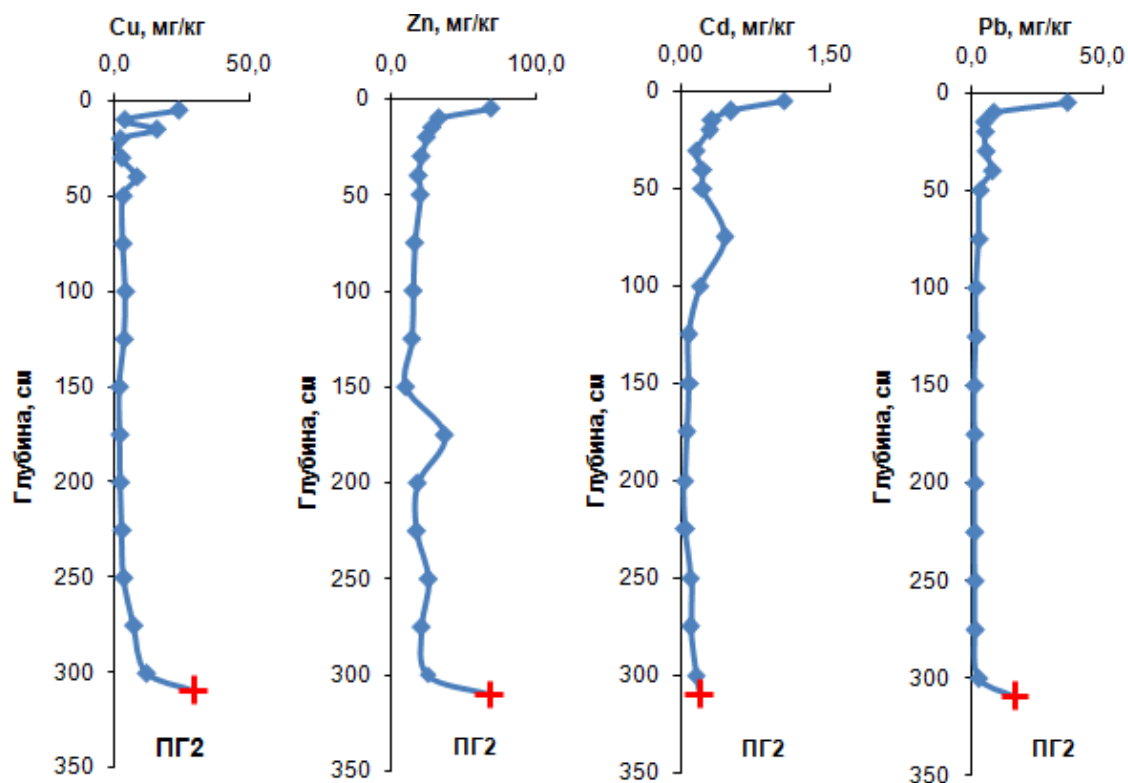


Рис. 6. Изменение Zn, Pb, Cu и Cd по глубине торфяной залежи в зоне пирогенной нагрузки, 2-й класс (красным отмечено содержание в подстилающих породах)

Fig. 6. Distribution of Zn, Pb, Cu and Cd in the peat deposit within the zone of pyrogenic load, class 2 (the content in the underlying rocks is marked in red)

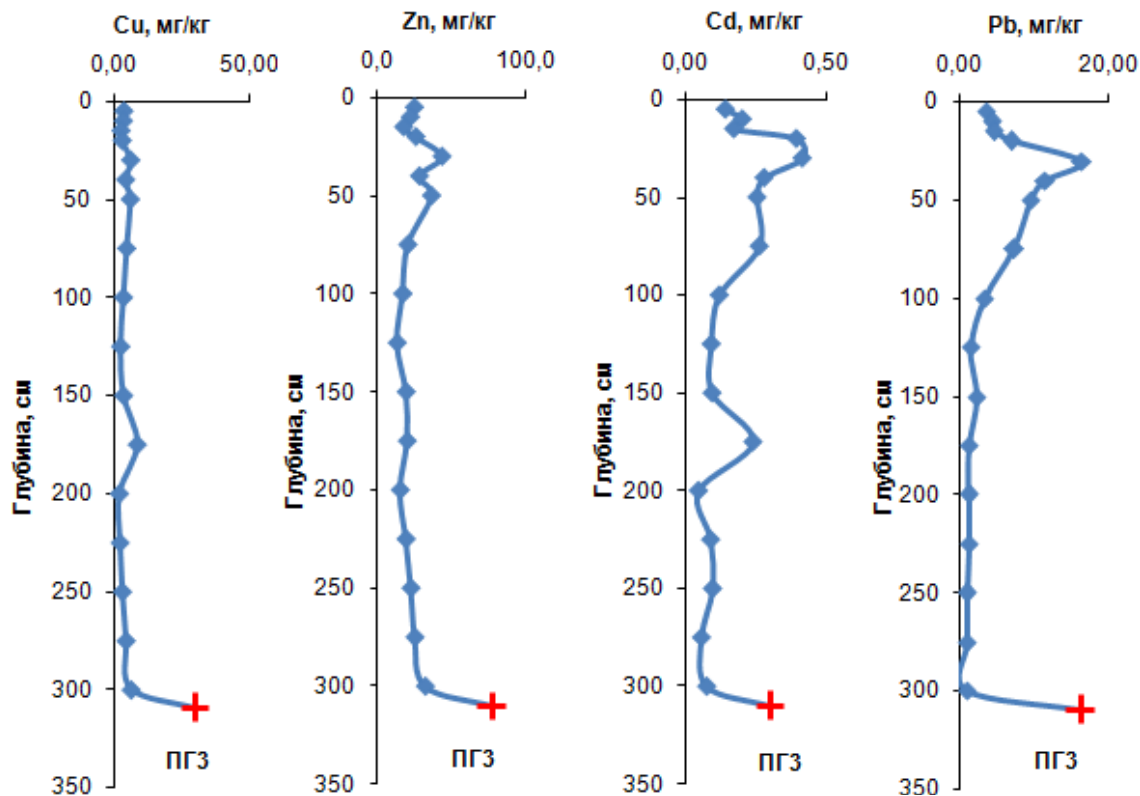


Рис. 7. Изменение Zn, Pb, Cu и Cd по глубине торфяной залежи в пределах локального естественного участка болота внутри контура пожара (красным отмечено содержание в подстилающих породах)

Fig. 7. Distribution of Zn, Pb, Cu and Cd in the peat deposit within the local pristine area of the bog inside the fire contour (the content in the underlying rocks is marked in red)

Таким образом, в результате пожара 2016 г. в верхнем слое (0–5 см) торфяной залежи отмечается значительное повышение концентраций Cu, Zn, Cd, Pb в 3–6 раз относительно фоновой участка в 100 м от границы (РГ). Зона экстремального загрязнения тяжелыми металлами ограничивается в основном зоной интенсивного выгорания поверхности, однако и за ее пределами также отмечено существенное (в 2 раза) повышение концентрации Zn, Cd, Pb, за исключением Cu, преимущественно за счет миграции элементов с болотными водами.

Анализ данных по болотным водам показал достоверное повышение Cu, Zn, Cd, Pb в болотных водах и водах водоприемника – р. Гавриловка. В болотных водах ПГ1–ПГ3 отмечается повышение содержания Cu в июне, августе и сентябре в 1,3–10 раз относительно фоновой участка низкого яма в бассейне р. Ключ в 8 км (п. 3), в 100 м от контура пожара также отмечается повышение концентрации Cu в болотных водах в мае (рис. 8). Повышение Zn в болотных водах пирогенного участка в сравнении с фоновым (в 8 км) отмечается в течение практически всего сезона. Максимальные превышения фоновых концентраций отмечаются в сентябре: ПГ1 – в 4,5 раза, ПГ2 – в 1,55 раза, ПГ3 – в 1,3 раза. Обращают на себя внимание более высокие концентрации в болотных водах ПГ2 и ПГ3 в течение сезона (за исключением сентября), что связано, вероятно, с

более интенсивным выносом элементов с болотными водами на ПГ1 при более существенном выгорании верхнего слоя торфяной залежи. В июле и августе отмечается снижение концентраций Zn в соответствии со снижением уровней болотных вод. Содержание Cd в болотных водах пирогенного участка (преимущественно ПГ2 и ПГ3), а также в 100 м за пределами пожара достоверно превышает фоновые концентрации в 7 раз (за исключением августа). В сезонной динамике следует отметить постепенное увеличение концентрации Cd в болотных водах к августу–сентябрю. Повышение Pb в болотных водах пирогенного участка в сравнении с фоновым (в 8 км) отмечается в течение практически всего сезона (в 1,7–3 раза). Экстремальное повышение концентраций Pb в болотных водах (в 25 раз относительно фона) наблюдается в конце сезона на участке 1-го класса пирогенной нагрузки с полным выгоранием поверхности (ПГ1). Сопоставление данных по речным и болотным водам показало активную миграцию элементов, максимум концентрации Zn, Cd, Zn, Pb в канале отмечается в мае–июне, а в р. Гавриловка – в июле, кроме Cd, который активно мигрирует в июне. Сопоставление концентраций элементов в водах рек Гавриловка и Ключ показало повышение в 1,5–2 раза концентраций Cu и Zn в июле, сентябре в пределах пирогенного участка и в 2–4 раза Cd и Pb с июня по сентябрь (рис. 9).

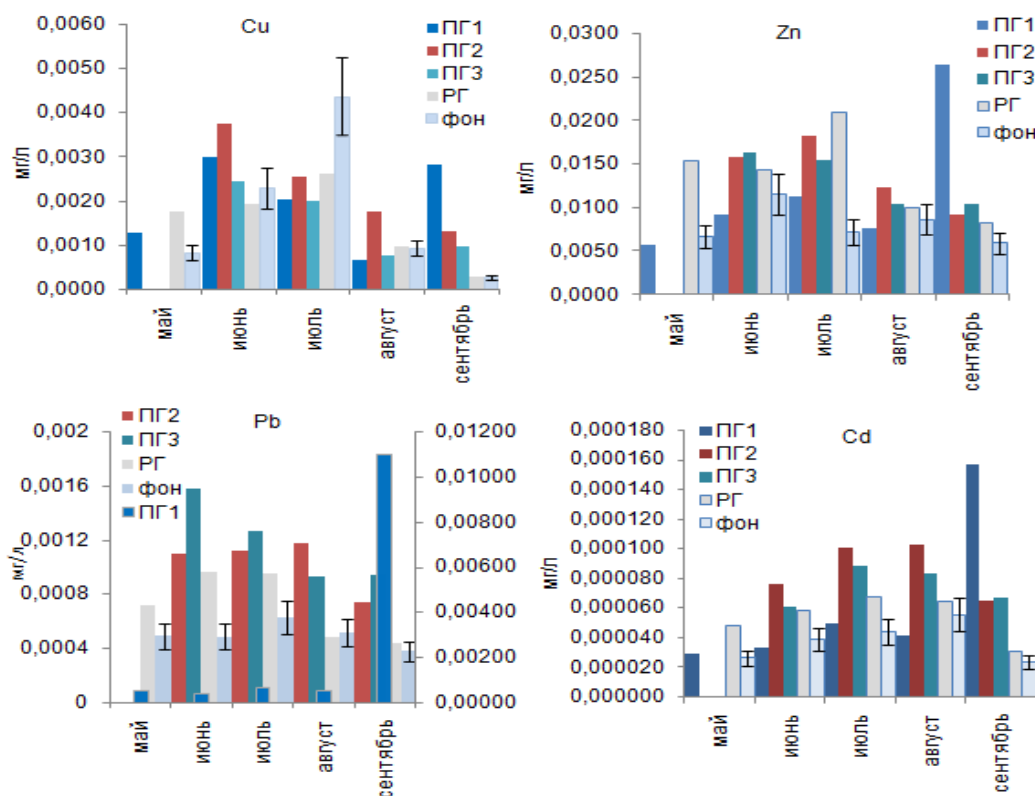


Рис. 8. Динамика содержания Cu, Zn, Cd, Pb в болотных водах в пределах пирогенного участка Васюганского болота в 2018 г.

Fig. 8. Water content of Cu, Zn, Cd and Pb within the pyrogenic area of the Great Vasyugan Mire in 2018

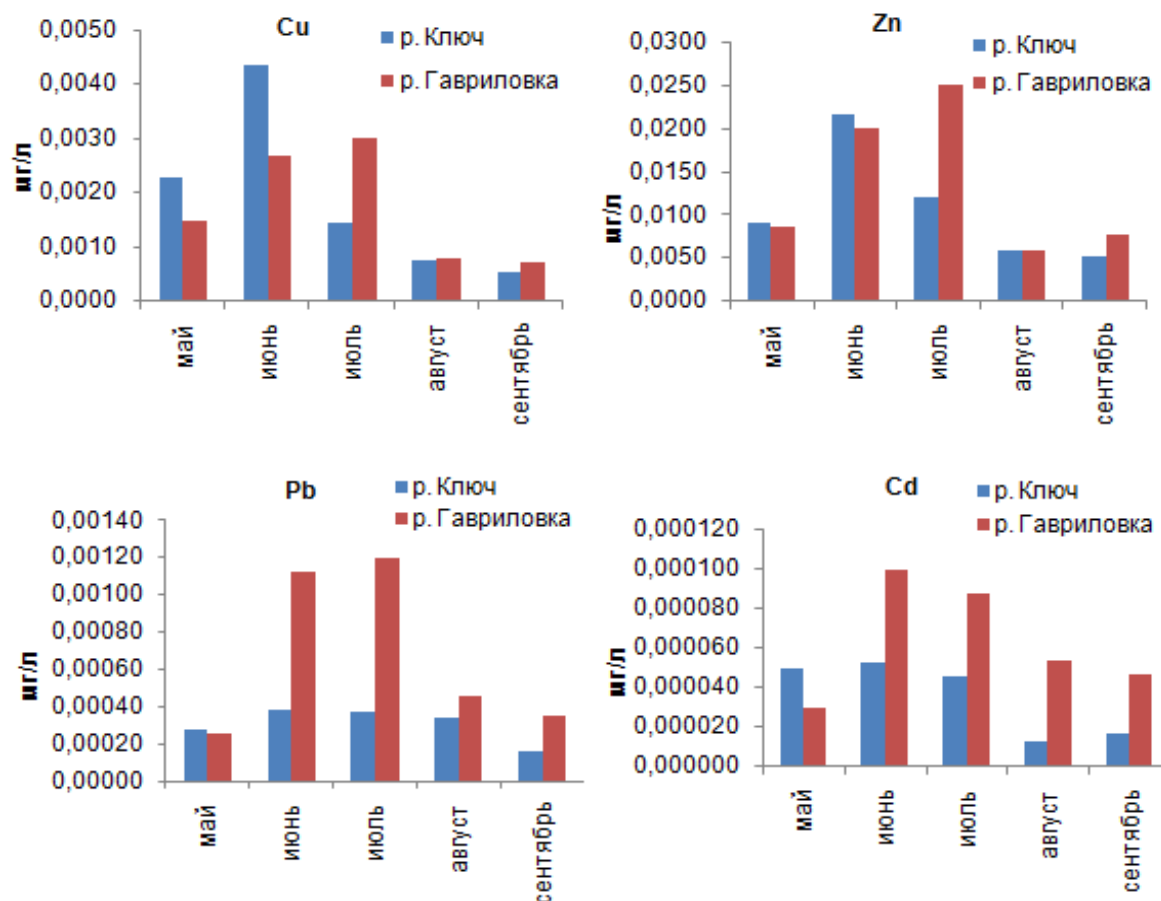
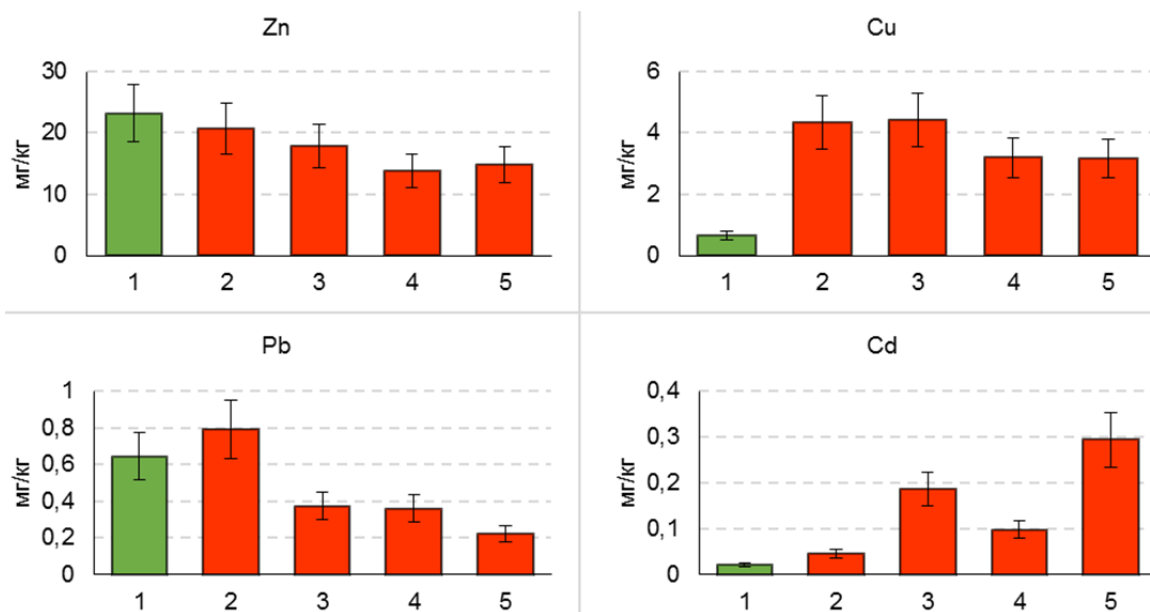
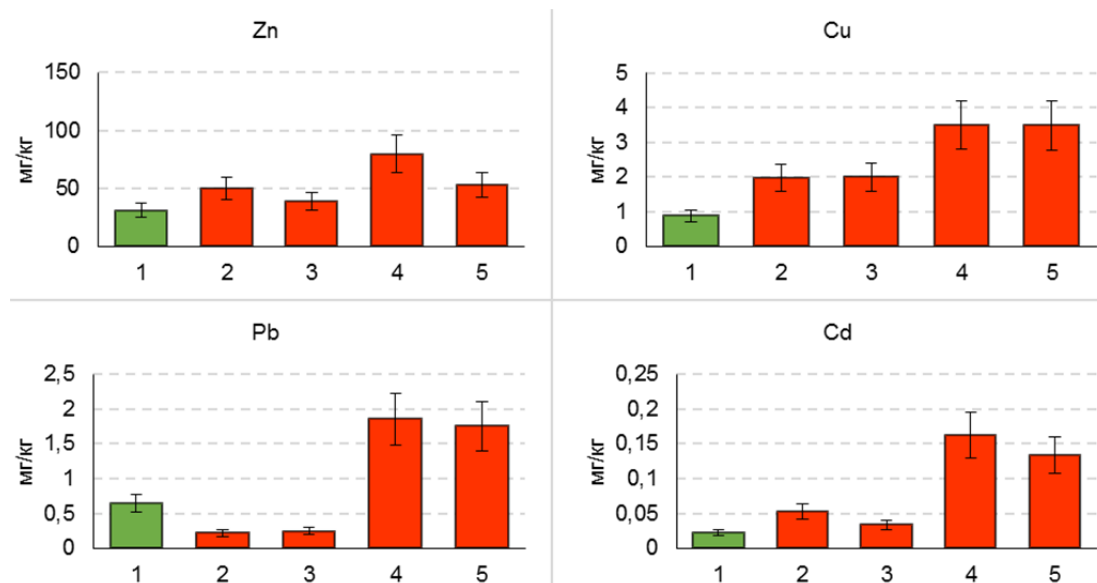


Рис. 9. Динамика содержания Cu, Zn, Cd, Pb в речных водах в 2018 г.

Fig. 9. River water content of Cu, Zn, Cd and Pb in 2018

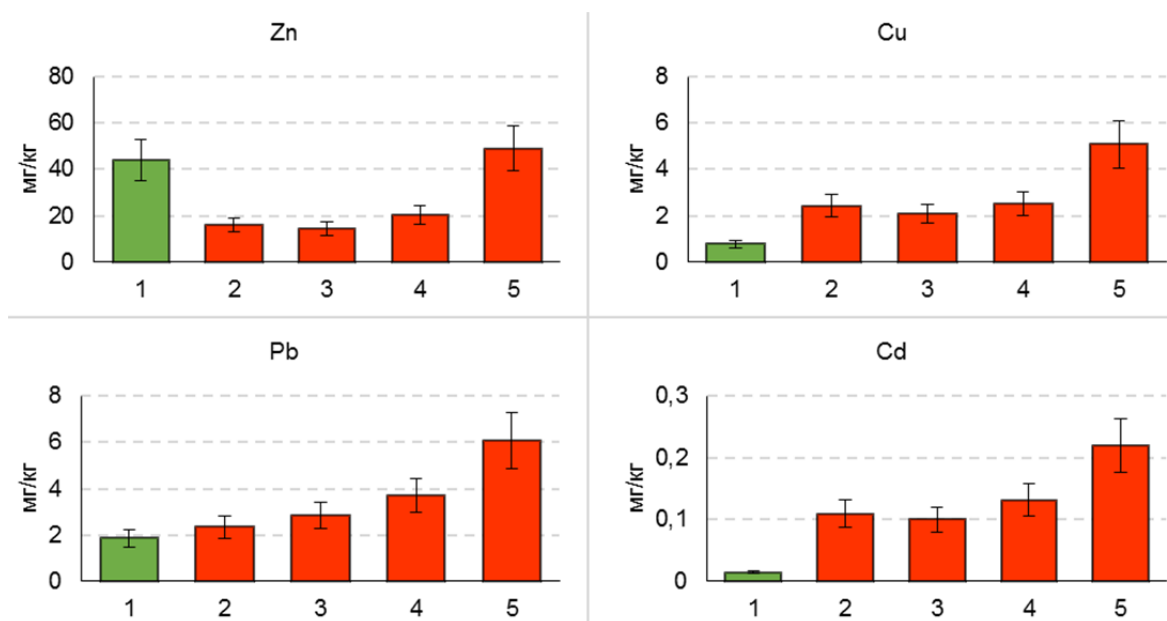
Рис. 10. Содержание тяжелых металлов в *Chamaedaphne calyculata*
1 – фоновые значения, 2 – РГ, 3 – ПГЗ, 4 – ПГ2, 5 – ПГ1Fig. 10. The content of heavy metals in *Chamaedaphne calyculata*
1 – background values, 2 – RG, 3 – PG3, 4 – PG2, 5 – PG1

Рис. 11. Содержание тяжелых металлов в *Pinus sylvestris*

1 – фоновые значения, 2 – РГ, 3 – ПГ3, 4 – ПГ2, 5 – ПГ1

Fig. 11. The content of heavy metals in *Pinus sylvestris*

1 – background values, 2 – RG, 3 – PG3, 4 – PG2, 5 – PG1

Рис. 12. Содержание тяжелых металлов в *Sphagnum fuscum*

1 – фоновые значения, 2 – РГ, 3 – ПГ3, 4 – ПГ2, 5 – ПГ1

Fig. 12. The content of heavy metals in *Sphagnum fuscum*

1 – background values, 2 – RG, 3 – PG3, 4 – PG2, 5 – PG1

Содержание Cu наиболее сильно возросло (в 7 раз), по сравнению с фоном, на участках РГ и ПГ3, расположенных рядом с постпирогенными участками. На ПГ1 и ПГ2, наиболее сильно пострадавших от пожара, концентрация Cu в *Chamaedaphne calyculata* увеличилась в 5 раз. Содержание Cd увеличивается в 2–10 раз, по сравнению с фоном на

постпирогенных и соседних с ними участках. Содержание всех рассмотренных элементов в *Pinus sylvestris* значительно увеличивается, по сравнению с фоном, на постпирогенных участках ПГ1 и ПГ2. Концентрация Zn наиболее возрастает (в 2,6 раза по сравнению с фоном) на ПГ2. Концентрация Cu в *Pinus sylvestris* возрастает в 2 раза на соседних с га-

рию РГ и ПГЗ, и в 3 раза на постпирогенных ПГ1 и ПГ2 (см. рис. 10–12).

Содержание Cd увеличивается в *Pinus sylvestris* в 1,5–2 раза на РГ и ПГЗ и в 6–8 раз – на ПГ1 и ПГ2. Содержание элементов в *Sphagnum fuscum* наиболее закономерно по отношению к другим видам, увеличивается по мере увеличения влияния пожара. Максимальные значения зафиксированы на наиболее выгоревшем участке ПГ1. Исключение составляет содержание Zn. Очевидно, что его фоновая концентрация в *Sphagnum fuscum* выше, чем содержание на пострадавшем от пожара болоте.

Содержание Zn, Cu, Pb и Cd в растениях рассматривалось на четырех участках болота, в разной степени пострадавших от пожара. В качестве модельных были выбраны виды – доминанты каждого яруса: *Pinus sylvestris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*. В качестве фоновых значений использованы средние для данных видов с болот юго-восточной части Западной Сибири [Гашкова, 2016].

В результате сравнения полученных нами данных выяснилось, что содержание Zn и Pb в *Chamaedaphne calyculata* на постпирогенных участках не только не увеличивается, но даже немного снижается по сравнению с фоновыми значениями и участком РГ.

Заключение

Таким образом, через год после пожара в верхнем слое (0–5 см) торфяной залежи отмечается значительное повышение концентраций Cu, Zn, Cd, Pb в 3–6 раз относительно фонового участка в 100 м от границы (РГ). Зона экстремального загрязнения тяжелыми металлами ограничивается в основном зоной интенсивного выгорания поверхности, однако, и за ее пределами также отмечено существенное (в 2 раза) повышение концентрации Zn, Cd, Pb, за ис-

ключением Cu, преимущественно за счет миграции элементов с болотными водами.

Содержание тяжелых металлов в растениях, как правило, достоверно возрастает на участках, соседних с пожаром, но, еще в большей мере увеличивается на постпирогенных участках. Из рассмотренных видов растений наиболее показательно увеличивается содержание тяжелых металлов с возрастанием влияния пирогенного фактора у *Sphagnum fuscum* и *Pinus sylvestris*. Данные виды могут служить индикатором степени нарушения болота.

Анализ данных за 2018 г. показал, что через 2 года после пожара сохраняются высокие концентрации Cu, Zn, Cd, Pb в болотных водах и водах водоприемника – р. Гавриловка. В болотных водах отмечается превышение фонового содержания Zn, Cd, Pb в течение всего года, а Cu – в июне, августе и сентябре. Зачастую обращают на себя внимание более высокие в течение вегетационного периода концентрации Cu, Zn, Cd, Pb в болотных водах участка 2-го класса пирогенной нагрузки, для которого характерно частичное выгорание поверхности в пределах 40–60% (ПГ2) и экстремальное повышение содержания (до 25 раз относительно фона) в конце сезона на участке 1-го класса пирогенной нагрузки с полным выгоранием поверхности (ПГ1). Сопоставление концентраций элементов в водах р. Гавриловка с водоприемником фоновой территории – р. Ключ, показало повышение в 1,5–2 раза концентраций Cu и Zn в июле, сентябре в условиях пирогенного фактора, и в 2–4 раза Cd и Pb с июня по сентябрь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ по научному проекту № 18-44-700005 (определение содержания тяжелых металлов в компонентах болот пирогенного участка), а также в рамках государственного задания по теме ПНИ РАН № 0778-2019-0005 (мониторинг содержания тяжелых металлов в пределах фоновых территорий).

ЛИТЕРАТУРА

- Гашкова Л.П. Особенности накопления тяжелых металлов болотными растениями юго-востока Западной Сибири // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2016. № 4 (53). С. 146–159.
- Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Журкова И.С. Лесные пожары и их последствия (на примере сибирских объектов). Новосибирск : Гео, 2015. 154 с.
- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // Ecosystems. 2008. V. 11. P. 1054–1064. DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4
- Betha R., Pradani M., Lestari P., Joshi U.M., Reid J.S., Balasubramanian R. Chemical speciation of trace metals emitted from Indonesian peat fires for health risk assessment // Atmospheric Research. 2013. V. 122. P. 571–578. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.05.024
- Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models // Nature Climate Change 2013. V. 3 (1). P. 52–58. DOI: 10.1038/nclimate1633
- Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., Miguel-Ayanz J.S., Long-Fournel M., et al. A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe // Environmental Management. 2013. V. 51 (3). P. 651–662. DOI: 10.1007/s00267-012-9961-z
- George I.J., Black R.R., Geron C.D., Aure I.L.J., Haysa M.D., Prestond W.T., Gulletta B.K. Volatile and semivolatile organic compounds in laboratory peat fire emissions // Atmospheric Environment. 2016. V. 132. May. P. 163–170. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.02.025
- Gregory R.W., Akilu Y., Landis M.S., Hsu Y. Impacts of a large boreal wildfire on ground level atmospheric concentrations of PAHs, VOCs and ozone // Atmospheric Environment. 2018. V. 178. P. 19–30. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.01.013

- Guoping W., Xiaofei Yu., Kunshan B., Wei X., Chuanyu G., Qianxin L., Xianguo L.** Effect of fire on phosphorus forms in Sphagnum moss and peat soils of ombrotrophic bogs // *Chemosphere*. 2015. V. 119. P. 1329–1334. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.084
- Hayasaka H., Noguchi I., Putra E.I., Yulianti N., Vadrevu K.** Peat-fire-related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia // *Environmental Pollution*. 2014. V. 195. P. 257–266. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.06.031
- Huang J., Yu H., Guan X., Wang G., Guo R.** Accelerated dryland expansion under climate change // *Nature Climate Change*. 2016. № 6. Iss. 2. P. 166–171. DOI: 10.1038/nclimate2837
- Kunii O., Kanagawa S., Yajima I., Hisamatsu Y., Yamamura S., Amagai T., Ismail I.T.S.** The 1997 haze disaster in Indonesia: Its air quality and health effects // *Arch. Environ. Health*. 2002. № 57 (1). P. 16–22. DOI: 10.1080/00039890209602912
- Lamentowicz M., Slowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszan K., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Fialkiewicz-Kozel B., Jassey V.E.J., Laggoun-Defarge F., Kolaczek P.** Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in Western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive // *Quaternary Research*. 2015. № 84 (3). P. 312–325. DOI: 10.1016/j.yqres.2015.09.002
- Loginov S.V., Ippolitov I.I., Kharyutkina E.V.** The relationship of surface air temperature, heat balance at the surface, and radiative balance at the top of atmosphere over the Asian territory of Russia using reanalysis and remote-sensing data International // *Journal of Remote Sensing*. 2014. № 35 (15). P. 5878–5898. DOI: 10.1080/01431161.2014.945007
- Page S.E., Baird A.J.** Peatlands and global change: response and resilience // *Annu. Rev. Environ. Resource*. 2016. № 41. P. 35–57. DOI: 10.1146/annurev-environ-110615-085520
- Rappold A.G., Stone S.L., Cascio W.E., Neas L.M., Kilaru V.J., Carraway M.S., Szykman J.J., Ising A., Cleve W.E., Meredith J.T., Vaughan-Batten H., Deyneka L., Devlin R. B.** Peat bog wildfire smoke exposure in rural North Carolina is associated with cardiopulmonary emergency department visits assessed through syndromic surveillance // *Environ. Health Perspect.* 2011. № 119. P. 1415–1420. DOI: 10.1289/ehp.1003206
- Reheis M.S.** Dust deposition in Nevada. California and Utah. 1984–2002. U.S. Geological Survey. Open-File Report 03–138. 2003. 11 p.
- Rosenburg H.A., Alday J.G., Harris M.P.K., Allen K.A., Connor L., Blackbird S.J., Eyre G., Marrs R.H.** Changes in peat chemical properties during post-fire succession on blanket bog moorland // *Geoderma*. 2013. № 211–212. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.012
- Shcherbov B.L.** The role of forest floor in migration of metals and artificial nuclides during forest fires in Siberia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2012. № 5. P. 191. DOI: 10.1134/S1995425512020114
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V.** Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia // *Advances in Environmental Research*. 2010. № 4. P. 99–119.
- Shvidenko A., Schepaschenko D.** Climate Change and Wildfires in Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. № 6 (7). P. 683–692. DOI: 10.1134/S199542551307010X
- Turetsky M.R., Wieder R.K., Vitt D.H.** Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes // *Soil Biology Biochemistry*. 2002. № 34 (7). P. 907–912. DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00022-6

Авторы:

Харанжевская Юлия Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала СФНЦ РАН, доцент кафедры гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: kharan@yandex.ru

Синюткина Анна Алексеевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиала СФНЦ РАН, Томск, Россия.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Гашкова Людмила Павловна, кандидат географических наук, младший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиала СФНЦ РАН, Томск, Россия.

E-mail: gashkova-lp@rambler.ru

Geosphere Research, 2019, 4, 62–73. DOI: 10.17223/25421379/13/6

Yu.A. Kharanzhevskaya^{1,2}, A.A. Sinyutkina¹, L.P. Gashkova¹

¹ *Siberian Research Institute of Agriculture and Peat-branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

² *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

INTEGRAL ESTIMATION OF PYROGENIC LOADS ON THE CONTENTS OF Cu, Pb, Zn AND Cd IN THE COMPONENTS OF THE GREAT VASYUGAN MIRE (WESTERN SIBERIA)

The article assesses the pyrogenic load and the environmental consequences of the 2016 fire within the northeastern part of the Great Vasyugan mire. To assess the pyrogenic load in 2016–2018 monitoring of atmospheric deposition of Cu and Pb, Zn, Cd within the post-pyrogenic area and beyond was organized, the content of heavy metals in mire waters, river waters, in peat and plants was determined. Analysis of the data showed that the composition of atmospheric deposition in post-pyrogenic areas significantly increases the amount of Zn is 2 times, Pb is 14 times, Cu is 4 times, Cd is up to 9 times, and the territory associated with the pollution of Zn and Pb as a result of the 2016 fire covers an area of 8 km, which is consistent with a wind rose. Studies have shown that in the upper layer (0–5 cm) peat a significant increase in the concentrations of Cu, Zn, Cd, Pb is observed 3–6 times relative to the background site 100 m from the boundary. The zone of extreme pollution with heavy metals is limited mainly by the zone of intense burning of the surface, however, a significant (2-fold) increase in the concentration of Zn, Cd, and Pb, with the exception of Cu, is also observed outside it, mainly due to the migration of elements with waters. The content of heavy metals also significantly increases in post-pyrogenic areas in *Sphagnum fuscum* and *Pinus sylvestris*. In bog and river waters, a significant excess of background concentrations of Cu, Zn, Cd, Pb was also found to be a factor of 2–10. Noteworthy are the more often higher concentrations of Cu, Zn, Cd, Pb in the pore waters of the area of the pyrogenic load class 2 during the growing season which is characterised by partial burn up

of the surface within 40-60% and an extreme increase in the content (up to 25 times relative to the background) at the end of the season in the area of the first class of pyrogenic load with complete burn up of the surface.

Keywords: *peat, water, heavy metals, pyrogenic load, Great Vasyugan Mire, Western Siberia.*

REFERENCES

- Gashkova L.P. *Osobennosti nakopleniya tyazholykh metallov bolotnymi rasteniyami yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri* [The peculiarities of heavy metal accumulation in wetland plants of the South-East of Western Siberia] // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S.A. Yesenina*. 2016. № 4 (53). pp. 146–159. In Russian
- Shcherbov B.L., Lazareva Ye.V., Zhurkova I.S. *Lesnyye pozhary i ikh posledstviya (naprimere sibirskikh ob"yektov)* [Forest fires and their consequences (by the example of Siberian objects)]. Novosibirsk: Geo, 2015. 154 p. In Russian
- Benscoter B.W. and Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a post-fire chronosequence // *Ecosystems*. 2008. V. 11. pp. 1054–1064. DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4)
- Betha R., Pradani M., Lestari P., Joshi U.M., Reid J.S., Balasubramanian R. Chemical speciation of trace metals emitted from Indonesian peat fires for health risk assessment // *Atmospheric Research*. 2013. V. 122. pp. 571–578. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.05.024
- Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models // *Nature Climate Change* 2013. V. 3(1). pp. 52–58. DOI: 10.1038/nclimate1633
- Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., Miguel-Ayaz J.S., Long-Fournel M., et al. A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe // *Environmental Management*. 2013. V. 51 (3). pp. 651–662. DOI: 10.1007/s00267-012-9961-z
- George I.J., Black R.R., Geron C.D., Aurel I.J., Haysa M.D., Prestond W.T., Gulletta B.K. Volatile and semivolatile organic compounds in laboratory peat fire emissions // *Atmospheric Environment*. 2016. V. 132, May, pp. 163–170. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.02.025
- Gregory R.W., Aklilu Y., Landis M.S., Hsu Y. Impacts of a large boreal wildfire on ground level atmospheric concentrations of PAHs, VOCs and ozone // *Atmospheric Environment*. 2018. V. 178. pp. 19–30. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.01.013
- Guoping W., Xiaofei Yu., Kunshan B., Wei X., Chuanyu G., Qianxin L., Xianguo L. Effect of fire on phosphorus forms in Sphagnum moss and peat soils of ombrotrophic bogs // *Chemosphere*. 2015. V. 119. pp. 1329–1334. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.084
- Hayasaka H., Noguchi I., Putra E.I., Yulianti N., Vadrevu K. Peat-fire-related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia // *Environmental Pollution*. 2014. V. 195. pp. 257–266. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.06.031
- Huang J., Yu H., Guan X., Wang G., Guo R. Accelerated dryland expansion under climate change // *Nature Climate Change*. 2016. № 6. Iss. 2. pp. 166–171. DOI: 10.1038/nclimate2837
- Kunii O., Kanagawa S., Yajima I., Hisamatsu Y., Yamamura S., Amagai T., Ismail I T S. The 1997 haze disaster in Indonesia: Its air quality and health effects // *Arch. Environ. Health*. 2002. 57(1), pp. 16–22. DOI: 10.1080/00039890209602912
- Lamentowicz M., Słowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszán K., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Fiałkiewicz-Kozieł B., Jassey V.E.J., Laggoun-Defarge F., Kołaczek P. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in Western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive // *Quaternary Research*. 2015. 84(3). pp. 312–325. DOI: 10.1016/j.yqres.2015.09.002
- Loginov S.V., Ippolitov I.I., Kharyutkina E.V. The relationship of surface air temperature, heat balance at the surface, and radiative balance at the top of atmosphere over the Asian territory of Russia using reanalysis and remote-sensing data International // *Journal of Remote Sensing*. 2014. 35(15). pp. 5878–5898. DOI: 10.1080/01431161.2014.945007
- Page S.E., Baird A.J. Peatlands and global change: response and resilience // *Annu. Rev. Environ. Resource*. 2016. 41. pp. 35–57. DOI: 10.1146/annurev-environ-110615-085520
- Rappold A.G., Stone S.L., Cascio W.E., Neas L.M., Kilaru V.J., Carraway M.S., Szykman J.J., Ising A., Cleve W.E., Meredith J.T., Vaughan-Batten H., Deyneka L., Devlin R. B. Peat bog wildfire smoke exposure in rural North Carolina is associated with cardiopulmonary emergency department visits assessed through syndromic surveillance // *Environ. Health Perspect.* 2011, 119, pp. 1415–1420. DOI: 10.1289/ehp.1003206
- Reheis M.S. Dust deposition in Nevada, California. and Utah. 1984-2002. U.S. Geological Survey. Open-File Report 03-138. 2003. 11 p.
- Rosenburg H.A., Alday J.G., Harris M.P.K., Allen K.A., Connor L., Blackbird S.J., Eyre G., Marrs R.H. Changes in peat chemical properties during post-fire succession on blanket bog moorland // *Geoderma*. 2013. 211–212. pp. 98–106. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.012
- Shcherbov B.L. The role of forest floor in migration of metals and artificial nuclides during forest fires in Siberia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2012. 5. p. 191. DOI: 10.1134/S1995425512020114
- Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia // *Advances in Environmental Research*. 2010. 4. pp. 99–119.
- Shvidenko A., Schepaschenko D. Climate Change and Wildfires in Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. 6(7). pp. 683–692. DOI: 10.1134/S199542551307010X
- Turetsky M. R., Wieder R. K., Vitt D. H. Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes // *Soil Biology Biochemistry*. 2002. 34(7). pp. 907–912. DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00022-6

Author's:

Kharanzhevskaya Yulia A., Cand. Sci. (Geol.-Miner), Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat-branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor, Department of Hydrology, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: kharan@yandex.ru

Sinyutkina Anna A., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat-branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Gashkova Lyudmila P., Cand. Sci. (Geography), Junior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat-branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.

E-mail: gashkova-lp@rambler.ru