

Научная статья

УДК 502.7:574

doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-166-175

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА НА НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ КОМПОНЕНТАМИ БОЛОТ В ОКРЕСТНОСТЯХ Г. ТОМСКА

Людмила Павловна Гашкова

Сибирский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН, г. Томск, Россия

gashkova-lp@rambler.ru, Scopus Author ID: 57194219406, WoS Researcher ID: M-7651-2014, SPIN-код: 8729-9340, РИНЦ Author ID: 747354

Аннотация. В настоящее время города стали источником загрязнения природных ландшафтов. Воздушный перенос тяжёлых металлов изменяет геохимические циклы болот, получающих основное минеральное питание из атмосферы. На примере ключевых участков, которые расположены рядом с городами Томск и Северск, рассмотрено распределение тяжёлых металлов в компонентах болот. Исследования проводились на 7 болотах, 5 из которых расположены к северу от города, а 2 находятся на юго-западе от города. Концентрация Zn, Cu, Cd и Pb определялась в 4 видах растений (*Betula pubescens*, *Pinus sylvestris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Rhododendron tomentosum*), торфе и подстилающей породе. Обнаружено, что содержание данных элементов в растениях и торфе, а также интенсивность их поглощения выше на болотах, расположенных к северу от Томска в направлении основного переноса от господствующих в регионе южных ветров. Влияние города сказывается и в том, что в торфе всех рассмотренных нами участков концентрации тяжёлых металлов выше, чем в подстилающей породе. Кроме того, в процессе исследования выявлено, что древесные растения наиболее интенсивно поглощают Zn и Cu, а кустарнички накапливают Cd и Pb. Хотя абсолютные значения концентраций металлов в растениях и торфе не выходят за пределы фоновых значений, установленных для региона, применение геохимических коэффициентов позволяет выявить влияние промышленного загрязнения. Полученные результаты показывают, что болота могут служить чувствительными индикаторами загрязнения атмосферы в процессе мониторинга состояния окружающей среды.

Ключевые слова: биоиндикация, Zn, Cu, Cd, Pb, растения болот, торф, подстилающая порода, влияние города

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках НИР № 0533-2021-0004.

Для цитирования: Гашкова Л.П. Оценка влияния атмосферного переноса на накопление тяжёлых металлов компонентами болот в окрестностях г. Томска // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 1(68). С. 166–175. doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-166-175

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-166-175

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC TRANSPORT ON THE ACCUMULATION OF HEAVY METALS BY THE COMPONENTS OF THE MIRES AROUND TOMSK

Lyudmila P. Gashkova

Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – a branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology RAS, Tomsk, Russia

gashkova-lp@rambler.ru, Scopus Author ID: 57194219406, WoS Researcher ID: M-7651-2014, SPIN-code: 8729-9340, Author ID: 747354



Abstract. Cities have become a source of natural landscapes pollution. Air transport of heavy metals changes the geochemical cycles of bogs that receive their main mineral nutrition from the atmosphere. The paper studies the distribution of heavy metals in the mire components through the example of key sites located near the cities of Tomsk and Seversk. The research was carried out on 7 mires, 5 of which are located to the north of the city and 2 are in the southwest of the city. The concentrations of Zn, Cu, Cd, and Pb were determined in 4 plant species (*Betula pubescens*, *Pinus sylvestris*, *Chamaedaphne calyculata* and *Rhododendron tomentosum*), peat, and bedrock. It has been found that the content of these elements in plants and peat, as well as the intensity of their absorption, is higher in the mires located north of Tomsk, in the direction of the main transfer from the southern winds prevailing in the region. The influence of the city is also manifested in the fact that in the peat of all the sites that were examined, the concentration of heavy metals is higher than in the bedrock. The study has revealed that woody plants most intensively absorb Zn and Cu, while shrubs accumulate Cd and Pb. The absolute values of metal concentrations in plants and peat do not go beyond the background values established for the region, but the use of geochemical coefficients makes it possible to reveal the effect of industrial pollution. The study shows that mires can serve as sensitive indicators of atmospheric pollution in the process of monitoring of the state of environment.

Keywords: bioindication, Zn, Cu, Cd, Pb, mire plants, peat, bedrock, influence of the city

Funding: The study was conducted with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under research project No. 0533-2021-0004.

For citation: Gashkova, L.P. (2024). Influence of atmospheric transport on the accumulation of heavy metals by the components of the mires around Tomsk. *Geographical Bulletin*. No. 1(68). Pp. 166–175. doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-166-175

Введение

Примеси городского воздуха, в том числе и металлы, являются основной причиной болезней, связанных с загрязнением окружающей среды [6, 22]. Основными источниками тяжёлых металлов в атмосфере г. Томска являются топливно-энергетический комплекс, печное отопление, свалки отходов и автотранспорт [7]. В почве наблюдается превышение уровня тяжёлых металлов, по сравнению с природными [9], хотя среднегодовые показатели концентрации металлов не превышают уровня нормативов [7]. Загрязнение атмосферы города зависит не только от наличия источников загрязнения, но и от направления ветра, рельефа [11] и характера подстилающей поверхности [18]. С учётом всех факторов моделирование распределения потоков загрязняющих веществ становится непростой задачей. Для г. Томска проведены исследования, иллюстрирующие атмосферные потоки в пределах города [1, 9, 19, 23]. Определено влияние выбросов промышленных предприятий на накопление элементов в эпифитных мхах [12, 20, 21].

Болота, расположенные вокруг г. Томска, испытывают антропогенную нагрузку в виде вытаптывания, атмосферного загрязнения, осушения и торфодобычи. Такое воздействие приводит к частым пожарам и изменению биогеохимических циклов, отражающихся на уровне содержания в почве доступных для растений элементов и изменении интенсивности поглощения элементов растениями. Поэтому растения обычно применяются для биоиндикации состояния воздуха и почвы [24, 27, 30, 32, 39, 41, 44, 45]. Однако необходимо комплексное исследование степени влияния атмосферного переноса на накопление элементов растениями болот.

Целью нашей работы было выяснить интенсивность накопления и поглощения элементов растениями болот в окрестностях г. Томска. Особенности наших исследований являются использование болотных растений, которые растут на торфе, не имеют связи с минеральным грунтом и получают питание только за счет атмосферного переноса; параллельный отбор проб растений и торфа, позволяющий определить интенсивность поглощения элементов растениями; выбор ключевых участков, позволяющий учитывать направление основного переноса воздушных масс. Результаты исследования позволят оценить степень изменения геохимических условий на болотах под влиянием городских выбросов. В ходе исследования мы пытались ответить на несколько вопросов: 1) какие факторы влияют на содержание элементов в торфе и растениях болот в окрестностях г. Томска; 2) влияет ли атмосферный перенос городского воздуха на интенсивность накопления элементов растениями; 3) какие виды растений болот наиболее интенсивно поглощают тяжёлые металлы.

Объекты и методы

Объекты исследования находятся в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины. В качестве ключевых выбраны семь участков болот, пять из которых расположены к северу от г. Томска, два участка расположены на юго-западе от города (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Характеристика объектов исследования
Characteristics of the research objects

№	Направление от города	Тип болота	Антропогенная нагрузка	Координаты
1N	Север	Верховое	Атмосферный перенос	56°48'41,0"с. ш. 84°42'55,6" в. д.
2N	Север	Верховое	Атмосферный перенос	56°45'49,4"с. ш. 84°46'17,3" в. д.
3N	Север	Верховое	Атмосферный перенос	56°52'29,2"с. ш. 84°58'55,1" в. д.
4N	Север	Верховое	Атмосферный перенос, осушение, торфодобыча	56°51'48,1"с. ш. 84°40'03,0" в. д.
5N	Север	Переходное	Атмосферный перенос, осушение	56°51'46,4"с. ш. 84°39'20,8" в. д.
6W	Юго-запад	Переходное	Атмосферный перенос, осушение	56°23'51,2"с. ш. 84°39'28,4" в. д.
7W	Юго-запад	Переходное	Атмосферный перенос, осушение	56°23'50,2"с. ш. 84°39'19,8" в. д.

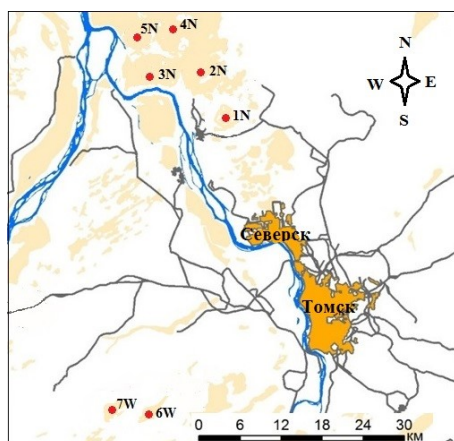


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования
Fig. 1. Location of the research objects

По климатическому районированию в окрестностях г. Томска слабо засушливые, достаточно теплые условия летом и умеренно холодные, малоснежные зимы [25]. Преобладает южное и юго-западное направление ветра, ветренных дней более 200 за год [5]. Растительность на объектах представлена в основном сосново-кустарничково-сфагновыми сообществами, с примесью березы на верховых болотах и березы, осины и болотных трав на переходных болотах. В качестве биоиндикаторов выбраны четыре вида: *Pinus sylvestris* L., *Betula pubescens* Ehrh., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench и *Rhododendron tomentosum* Harmaja. Для анализа на содержание Zn, Cu, Cd и Pb отобраны листья и хвоя растений, а также верхний (0–20 см) слой торфа и подстилаящая торф порода в непосредственной близости от данных растений. Анализ отобранных образцов проводился на базе производственного объединения «Плазма» масс-спектрографическим методом.

Активность поглощения элементов из почвы вычислялась двумя способами:

1. Коэффициент биологического поглощения (КБП), рассчитанный как отношение концентрации элемента в золе растения к его концентрации в почве [17];
2. Коэффициент биоконцентрации (КБК) (Bioconcentration Factor), рассчитанный как отношение концентрации элемента в растениях к его концентрации в почве. Для расчёта данного коэффициента использовались концентрации в абсолютно сухом веществе растений и торфа [48];
3. Коэффициент концентрации (КК), отражающий соотношение содержания элемента в торфе к его содержанию в подстилаящей породе.

Экология и природопользование
Гашикова Л.П.

Статистическая обработка результатов проводилась непараметрическими методами. Зависимость между переменными определялась при помощи коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Достоверность отличий определялась тестами Манна-Уитни и Крускала-Уоллиса.

Результаты

Результаты сравнения концентрации элементов в тканях растений показали, что видоспецифичность проявляется в разной степени для каждого элемента. Наибольшие различия между видами растений наблюдаются в накоплении Zn. Различия в содержании Zn у *B. pubescens* и *R. tomentosum* составляют более 10 раз. *B. pubescens* содержит в тканях достоверно больше Zn, чем у других рассмотренных видов, причем на всех участках (рис. 2). Меньше, чем *B. pubescens*, Zn содержит *P. sylvestris*, разница достигает 3,7 раз. Другие виды, *C. calyculata* и *R. tomentosum*, содержат ещё более низкие концентрации Zn и по этому признаку значимо не различаются между собой. Содержание Cu достоверно выше в тканях древесных растений, чем в тканях кустарничков, а Cd и Pb, наоборот, больше содержатся в кустарничках.

Учитывая преобладающее направление ветра, сравнивали данные с участков, расположенных к северу и юго-западу от города. Сравнение показало значимые отличия ($p < 0,05$) по содержанию элементов в растениях. Во всех видах растений с западных участков содержание Zn, Cu, Cd и Pb ниже, чем с северных. Наибольшие из всех видов различия между северными и юго-западными участками наблюдаются по содержанию Zn у *P. sylvestris* и *R. tomentosum* (почти в 2 раза), по содержанию Cd – у *B. pubescens* и *C. calyculata* (более 10 раз), по содержанию Cu – у *P. sylvestris* (более 3 раз). Интересно, что все виды растений на юго-западных участках содержат примерно одинаковое количество Cu, в то же время на северных участках значения концентраций Cu различаются между собой.

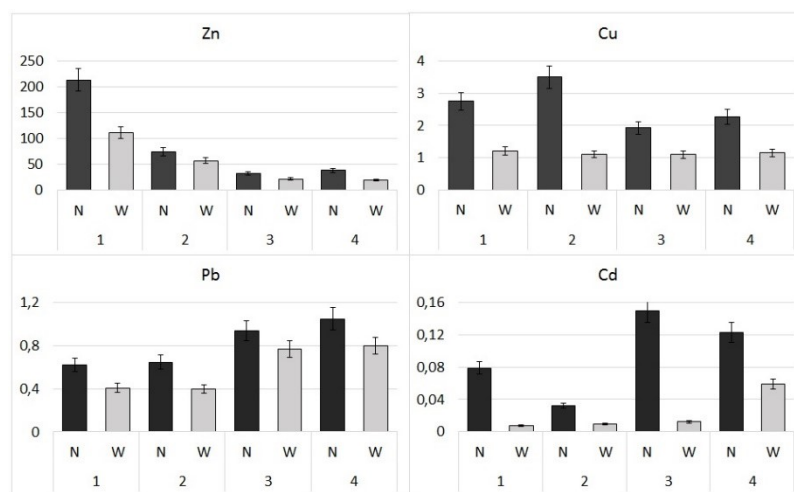


Рис. 2. Содержание элементов в растениях на участках к северу (N) и западу (W) от города (1 – *Betula pubescens*; 2 – *Pinus sylvestris*; 3 – *Chamaedaphne calyculata*; 4 – *Rhododendron tomentosum*)
Fig. 2. Content of elements in plants in areas north (N) and west (W) of the city (1 – *Betula pubescens*; 2 – *Pinus sylvestris*; 3 – *Chamaedaphne calyculata*; 4 – *Rhododendron tomentosum*)

Так же, как и в растениях, в торфе большинства северных участков содержится достоверно больше исследованных элементов, чем в юго-западных. Максимальные различия в торфе обнаружены по содержанию Pb между участками 3N и 6W. Сравнение концентрации элементов в подстилающей породе не показало значимых различий для Cu, Cd и Pb между западными и северными участками, а содержание Zn на западных участках даже незначительно выше.

Содержание элементов в подстилающей породе на всех объектах ниже, чем в торфе (табл. 2). На северных участках КК значимо выше, чем на юго-западных ($p < 0,05$).

Экология и природопользование
Гашикова Л.П.

Кроме того, в результате анализа данных по содержанию элементов в растениях и торфе обнаружена отрицательная зависимость от мощности торфяной залежи и положительная корреляция с уровнем болотных вод.

Таблица 2

Содержание элементов* (мг/кг) в торфе (Т) и подстилающей породе (ПП) на участках болот и их коэффициент концентрации (КК)
Content of elements* (mg/kg) in peat (T) and bedrock (ПП) in mire areas and their concentration coefficient (КК)

Участок (количество проб)	Zn			Cd			Pb			Cu		
	T	ПП	КК	T	ПП	КК	T	ПП	КК	T	ПП	КК
1N (n=20)	108 (21)	15,1 (3)	7,2	0,19 (0,03)	0,01 (0,001)	16,3	12 (2,6)	3,8 (0,6)	3,1	4,3 (0,8)	1,9 (0,3)	2,3
2N (n=15)	97,5 (19)	26 (5,1)	3,7	0,18 (0,03)	0,01 (0,002)	16,3	7,9 (1,3)	2,3 (0,4)	3,5	4,4 (0,9)	3,1 (0,5)	1,4
3N (n=20)	90,2 (18)	17 (3,2)	5,2	0,12 (0,01)	0,014 (0,007)	9,2	13 (2,8)	2,6 (0,5)	5,0	6,4 (1,2)	5,4 (1)	1,2
4N (n=20)	94,8 (19)	15,8 (3)	6,0	0,13 (0,02)	0,02 (0,002)	6,8	8,8 (1,6)	3,3 (0,6)	2,7	5(1)	2,2 (0,3)	2,2
5N (n=20)	90,9 (17)	17 (3,1)	5,4	0,16 (0,03)	0,018 (0,002)	8,5	6,2 (0,9)	2,4 (0,4)	2,6	5,6 (1,2)	5 (0,9)	1,1
6W (n=10)	75,3 (14)	24 (4,6)	3,1	0,1 (0,02)	0,02 (0,004)	5,1	5,6 (0,6)	3,7 (0,6)	1,5	3,8 (0,7)	4,6 (0,8)	0,8
7W (n=20)	83,6 (16)	24,2 (4,5)	3,5	0,1 (0,02)	0,02 (0,003)	5,6	8,1 (1,2)	3,8 (0,5)	2,1	4 (0,8)	4,6 (0,9)	0,9

*Средние значения, в скобках указано стандартное отклонение.

*Average values, standard deviation is indicated in brackets

Рассматривая интенсивность поглощения элементов с помощью сравнения КБП и КБК, мы обнаружили, что наибольшая активность поглощения Zn обнаружена у *B. pubescens* на северных участках. Немного менее активно поглощает Zn *P. sylvestris*. Но только для *B. pubescens* обнаружено КБК выше 1, что говорит об активном накоплении Zn данным видом (рис. 3). Для *B. pubescens* и *P. sylvestris* обнаружена положительная корреляция содержания Zn в растениях и в торфе. На северных участках с более загрязнённым торфом растения накапливали больше Zn, и у данных видов значения КБК самые высокие. Обнаружено, что вид растения влияет на значение коэффициента сильнее, чем расположение участка, разные виды растений накапливают элементы с разной интенсивностью. Кустарнички *C. calyculata* и *R. tomentosum* интенсивнее накапливают Cd, а древесные *B. pubescens* и *P. sylvestris* аккумулируют Zn и Cu.

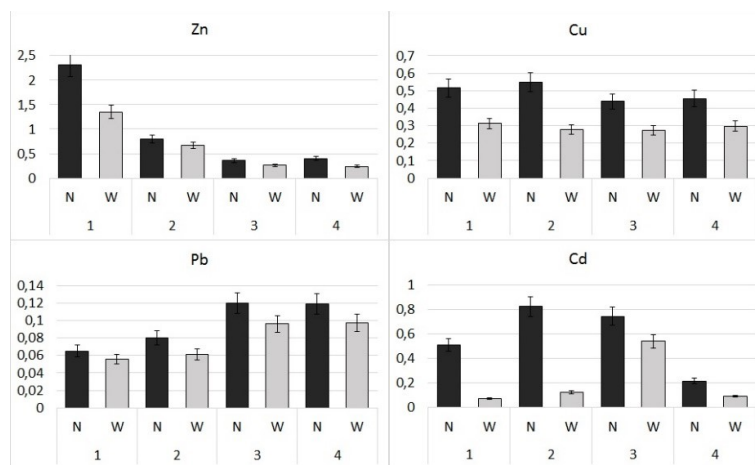


Рис. 3. Коэффициенты биоконцентрации (КБК) элементов на участках к северу (N) и юго-западу (W) от города (1 – *Betula pubescens*; 2 – *Pinus sylvestris*; 3 – *Chamaedaphne calyculata*; 4 – *Rhododendron tomentosum*)

Fig. 3. Bioconcentration factors (BCFs) of elements at sites north (N) and southwest (W) of the city (1 – *Betula pubescens*; 2 – *Pinus sylvestris*; 3 – *Chamaedaphne calyculata*; 4 – *Rhododendron tomentosum*)

Обсуждение результатов

Уровень содержания рассматриваемых элементов в растениях болот в окрестностях города оказался сопоставимым с данными других авторов, работающих в Западной Сибири [2, 3, 13, 14, 15, 26, 42]. Полученные нами результаты высокого содержания Zn в листьях *B. pubescens*, по сравнению с другими видами, подтверждаются многими исследователями [2, 29, 38]. Обнаруженные нами концентрации Cu в растениях не превышают содержание элементов в тех же видах на соседних территориях [2, 14].

Торф на участках болот, расположенных как с северной, так и с юго-западной стороны от города, содержит Zn в пределах данных, опубликованных для Европы и Западной Сибири [8, 13, 26, 28, 42]. Содержание Cu и Pb в торфе исследованных нами болот согласуется с результатами для Западной Сибири [8, 13, 46], но ниже европейских данных [28]. Концентрация Cd в торфе находится на уровне или выше средних значений для торфов Западной Сибири [4, 8, 10, 13, 14]. Фоновые концентрации тяжёлых металлов в подстилающей породе обычно ниже, чем в торфяных почвах [16]. Превышение концентрации Zn, Cu, Cd и Pb в торфе по отношению к подстилающей породе говорит о том, что присутствует атмосферный источник поступления данных элементов, приводящий к обогащению торфа [34], что подтверждается и в данной работе. Обнаруженная зависимость содержания элементов в растениях и торфе от уровня болотных вод объясняется тем, что чем сильнее осушено болото, тем активнее разлагается торф, увеличивается концентрация зольных элементов, доступных для растений. Увеличение мощности торфяной залежи в процессе развития болота приводит к потере связи с подстилающей породой и изменению концентрации элементов в верхних слоях торфа [2, 16, 38], поэтому обнаружена зависимость уровня содержания элементов от мощности торфа.

КБП и КБК в пределах одного вида коррелируют между собой, но при сопоставлении интенсивности поглощения элементов у некоторых видов растений соотношения меняются, поскольку проявляется существенная разница в величине зольности между видами. При сравнении интенсивности поглощения у разных видов растений болот показательней оказался КБК, демонстрирующий отношение двух органических сред (растений и торфа). На болоте, где корневая система растений не достигает минеральной почвы, для которой разрабатывался классический КБП [17], правильнее применять КБК [48]. При использовании данного коэффициента очень показательна граница в величине КБК, равной 1. Если КБК больше 1, то принято считать, что растение способно накапливать большие дозы данного элемента, особенно на загрязнённых территориях [33, 36]. Кроме того, использование данного коэффициента даёт возможность сравнить интенсивность поглощения видов в разных регионах мира, например интенсивность поглощения Zn березой подтверждается при помощи КБК в работах многих авторов [28, 31, 40]. Способность *P. sylvestris* к накоплению Cd, Pb и Zn на загрязнённых почвах выявлена экспериментально [37]. Однако, по нашим данным, интенсивность поглощения Cd и Pb у кустарничков ещё выше, чем у *B. pubescens* и *P. sylvestris*. В результате сравнения северных и юго-западных участков подтверждается установленная ранее закономерность [29, 35], что под воздействием загрязнения интенсивность поглощения повышается.

Заключение

В процессе исследования выяснилось, что различия в накоплении элементов растениями проявляются как между видами, так и между модельными участками. *B. pubescens* и *P. sylvestris* интенсивнее поглощают Cu и Zn, а *C. calyculata* и *R. tomentosum* накапливают Cd и Pb. Несмотря на то, что концентрации Cd, Pb, Cu и Zn в торфе и растениях болот в окрестностях г. Томска находятся в пределах средних значений для Западной Сибири, о влиянии атмосферного загрязнения свидетельствуют следующие факты:

1. Растения и торф с болот, расположенных к северу от города, в зоне основного атмосферного переноса городских выбросов, содержат больше тяжёлых металлов, чем компоненты болот, расположенных на юго-западе от города.

Экология и природопользование

Гашикова Л.П.

2. На северных участках интенсивность поглощения элементов растениями выше, чем на юго-западных.

3. Концентрация Cd, Pb, Cu и Zn в торфе всех исследованных участков выше, чем в подстилающей породе, что свидетельствует об атмосферном источнике поступления элементов.

Библиографический список

1. Артамонова С.Ю., Рапута В.Ф., Девятова А.Ю. Экспериментальное исследование и численный анализ техногенного загрязнения в районе г. Северск (Томская область) // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 4, № 1. С. 141–146.
2. Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1986. 193 с.
3. Белоусов М.В., Цыбукова Т.Н., Березовская Т.П., Тихонова О.К., Басова Е.В., Зейле Л.А., Юсубов М.С. Элементный состав багульника болотного // Химия растительного сырья. 2002. № 4. С. 35–38.
4. Гендрин А.Г., Надоховская Г.А., Чемерис А.Н., Энгель И.В., Русинова Е.С. Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2006. № 2. 125 с.
5. География Сибири в начале XXI века. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2016. Т. 5. 447 с.
6. Горяев Д.В., Тихонова И.В. Воздействие атмосферных поллютантов предприятий металлургического производства на здоровье населения // Медицина труда и промышленная экология. 2016. Т. 1. С. 16–19.
7. Доклад «Об экологической ситуации в Томской области в 2021 году» // Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области. ОГБУ «Облкомприрода». 2022. 153 с.
8. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
9. Ильченко Н.В. Особенности радиальной дифференциации меди, кобальта, свинца и цинка в профиле кислых дерново-подзолистых почв в условиях промышленного города (на примере г. Томска) // Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия: Сборник статей. Том II. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2000. С. 94–101.
10. Ларина Н.С., Ларин С.И., Заботина О.Н. Динамика изменения содержания тяжелых металлов в верховых торфяниках юга Тюменской области // Успехи современного естествознания. 2004. № 10. С. 132–135.
11. Леженин А.А., Рапута В.Ф. Методы оценивания загрязнения атмосферы города по данным мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 159–166. doi: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-159-166.
12. Межибор А.М., Говоруха В.В. Использование эпифитных мхов для оценки загрязнения атмосферного воздуха ртутью при воздействии предприятий угольной энергетики // Труды Международной научной конференции молодых ученых и специалистов «Экология энергетики – 2017». М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 28–30.
13. Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
14. Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В. Элементный состав растений уренгойских тундр // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 130–136.
15. Московченко Д.В., Валева Э.И., Лаврентьев С.Ю. Геохимический мониторинг на территории природного парка «Нумто» // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2002. № 3. С. 3–10.
16. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. doi: 10.1134/S0032180X19020114.
17. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
18. Пьянова Э.А. Исследование трансформации воздушного потока надтермически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // Вычислительные технологии. 2005. Т. 30, Ч. 2. С. 106–111.
19. Рапута В.Ф., Леженин А.А. Оценка высоты подъема дымового факела по спутниковым снимкам // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 471–475. doi: 10.15372/AOO20200609.
20. Рогова Н.С., Рыжакова Н.К., Борисенко А.Л. Определение и анализ природного и антропогенного геохимического фона для метода мхов-биомониторов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 6. С. 58–63. doi: 10.18412/1816-0395-2019-6-58-63.
21. Рыжакова Н.К., Меркулов В.Г., Борисенко А.Л., Рогова Н.С. Биоиндикация загрязнения атмосферного воздуха химическими предприятиями // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 113. С. 254–258.
22. Рюмина Е.В. Влияние экологической обстановки на человеческий потенциал: аспект здоровья // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 9–1(48). С. 152–160. doi: 10.24411/2500-1000-2020-11002.
23. Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Шлычков В.А., Ленковская Т.Н. Формальдегидное загрязнение городской атмосферы и его зависимость от метеорологических факторов // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 5. С. 422–426.
24. Сысо А.И., Сиромля Т.И. Химические элементы и их соединения в почвах и растениях нативных и антропогенных экосистем Сибири // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2018. С. 137–150.
25. Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Классификация климатов и климатическое районирование Западно-Сибирской равнины // География и природ. Ресурсы. 2014. № 2. С. 11–21.
26. Цыбукова Т.Н., Иншиева Л.И., Тихонова О.К., Зейле Л.А., Юсубов М.С. Характеристика элементного состава торфяного сырья олиготрофного болота // Химия растительного сырья. 2000. № 4. С. 29–34.
27. Agarwal S., Mukherjee P., Pramanick P., Mitra A. Seasonal Variations in Bioaccumulation and Translocation of Toxic Heavy Metals in the Dominant Vegetables of East Kolkata Wetlands: a Case Study with Suggestive Ecorestorative Strategies // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2022. doi: 10.1007/s12010-022-04057-6.

Экология и природопользование
Гашикова Л.П.

28. Borgulat J., Mętrak M., Staszewski T., Wilkomirski B., Suska-Malawska M. Heavy Metals Accumulation in Soil and Plants of Polish Peat Bogs // Polish Journal of Environmental Studies. 2018. V. 27(2). P. 537–544. doi:10.15244/pjoes/75823.
29. Crowder A. Acidification, metals and macrophytes // Environmental Pollution. 1991. V. 71(2–4). P. 171–203. doi:10.1016/0269-7491(91)90032-R.
30. Dmichowski W., Gozdowski D., Brągoszewska P., Baczevska A.H., Suwara I. Phytoremediation of zinc contaminated soils using silver birch (*Betula pendula* Roth) // Ecological Engineering. 2014. V. 71. P. 32–35. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.07.053.
31. Fernandez-Fuego D., Bertrand A., Gonzalez A. Metal accumulation and detoxification mechanisms in mycorrhizal *Betula pubescens* // Environmental Pollution. 2017. V. 231(1). P. 1153–1162. doi:10.1016/j.envpol.2017.07.072.
32. Flem B., Reimann C., Fabian K. Excess Cr and Ni in top soil: Comparing the effect of geology, diffuse contamination, and biogenic influence // Science of The Total Environment. 2022. 843. 157059. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157059.
33. Galal T.M., Shehata H.S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution // Ecological Indicators. 2015. V. 48. P. 244–251. doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.013.
34. Gashkova L.P. Peat and bog plants as indicators of aerosol pollution // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. 1093 012023. doi:10.1088/1755-1315/1093/1/012023.
35. Gaskova L.P. Evaluation of heavy metal pollution in bogs of the Tomsk region on change in biogeochemical activity of ericaceous shrubs // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. 107(1). 012007. doi:10.1088/1755-1315/107/1/012007.
36. Kolon M., Kopeć M., Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Mróz L., Wąsowicz P., Rajsz A., Kempers A.J. *Sanionia uncinata*, *Racomitrium lanuginosum* and *Salix herbacea* as ecological indicators of metals in Iceland // Ecological Indicators. 2020. 112. 106058. doi:10.1016/j.ecolind.2019.106058.
37. Liu B., Wang S., Wang J., Zhang X., Shen Z., Shi L., Chen Y. The great potential for phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* // Science of The Total Environment. 2020. 719. 137475. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137475.
38. Mäkilä M., Nieminen T.M., Säävuori H., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L. Does underlying bedrock affect the geochemistry of drained peatlands? *Geoderma*. 2015. V. 239. P. 280–292. doi:10.1016/j.geoderma.2014.11.002.
39. Paják M., Halecki W., Gąsiorek M. Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach // *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 851–859. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.10.125.
40. Qihang W., Wang S., Thangavel P., Qingfei L., Zheng H., Jun B. and Qui R. Phytostabilization of *Jatropha curcas* L. in polymetallic acid mine tailings // *International Journal of Phytoremediation*. 2011. V. 13. P. 788–804. doi:10.1080/15226514.2010.525562.
41. Roque-Álvarez I., Sosa-Rodríguez F.S., Vázquez-Arenas J., Escobedo-Bretado M.A., Labastida I., Corral-Rivas J.J., Aragón-Piña A., Armienta M.A., Ponce-Peña P., Lara R.H. Spatial distribution, mobility and bioavailability of arsenic, lead, copper and zinc in low polluted forest ecosystem in North-western Mexico // *Chemosphere*. 2018. V. 210. P. 320–333. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.07.004.
42. Rudmin M., Wilson M.J., Wilson L., Savichev O., Yakich T., Shaldybin M., Ruban A., Tabakaev R., Ibraeva K., Mazurov A. Geochemical and mineralogical features of the substrates of the Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. // *Catena*. 2020. 194, 104781, doi:10.1016/j.catena.2020.104781.
43. Ryzhakova N.K., Babeshina L.G., Kondratyeva A.G., Sechnaya D.Y. Contents of macro-, microelements and long-lived radionuclides in the medicinal plants belonging to the wetland community of Siberian region, Russia // *Phytochemistry Letters*. 2017. V. 22. P. 280–286. doi:10.1016/j.phytol.2017.10.001.
44. Salazar M.J., Pignata M.L. Lead accumulation in plants grown in polluted soils. Screening of native species for phytoremediation // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 137. P. 29–36. doi:10.1016/j.gexplo.2013.11.003.
45. Serbula S.M., Miljkovic D.D., Kovacevic R.M., Ilic A.A. Assessment of airborne heavy metal pollution using plant parts and topsoil, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012. V. 76. P. 209–214. doi:10.1016/j.ecoenv.2011.10.009.
46. Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage // *Applied Geochemistry*. 2015. V. 53. P. 53–70. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.12.004.
47. Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Klink A., Kempers A.J. *Andromeda polifolia* and *Oxycoccus microcarpus* as pollution indicators for ombrotrophic bogs in the Western Sudety Mountains (SW Poland) // *Journal of Environmental Science and Health*. 2013. V. 48, Part A. P. 686–693. doi:10.1080/10934529.2013.744578.
48. Zayed A., Gowthaman S., Terry N. Phytoaccumulation of Trace Elements by Wetland Plants: I. Duckweed // *Journal of Environmental Quality*. 1998. V. 27. P. 715–721. doi:10.2134/jeq1998.00472425002700030032x.

References

1. Artamonova S.Yu., Raputa V.F., Devyatova A.Yu. (2016) Experimental study and numerical analysis of the technogenic pollution in the area of Seversk (Tomsk region). *Interexpo Geo-Siberia*, vol. 4, no. 1, pp. 141–146.
2. Bakhnov V.K. (1986) *Biogeochemical aspects of the mire-forming process*. Novosibirsk: Nauka, 1986, 193 p.
3. Belousov M.V., Tsybukova T.N., Berezovskaya T.P., Tikhonova O.K., Basova E.V., Zeile L.A., Yusubov M.S. (2002) Elemental composition of wild rosemary. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, no. 4, pp. 35–38.
4. Gendrin A.G., Nadokhovskaya G.A., Chemeris A.N., Engel I.V., Rusinova E.S. (2006) *Environmental support for the development of oil and gas fields*. Novosibirsk: State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, no. 2, 125 p.
5. *Geography of Siberia at the beginning of the XXI century* (2016). Novosibirsk: Academic publishing house «Geo», vol. 5, 447 p.

Экология и природопользование

Гашикова Л.П.

6. Goryaev D.V., Tikhonova I.V. (2016) Influence of ambient air pollutants released by metallurgic enterprises on public health. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, vol. 1, pp. 16–19.
7. On the environmental situation in the Tomsk region in 2021 (2022) // Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Tomsk Region. OGBU Oblkomprirroda, 153 p.
8. Ilyin V.B., Syso A.I. (2001) *Trace elements and heavy metals in soils and plants of the Novosibirsk region*. Novosibirsk: Publishing House of SO RAN, 229 p.
9. Ilchenko N.V. (2000) Peculiarities of radial differentiation of copper, cobalt, lead and zinc in the profile of acid soddy-podzolic soils in an industrial city (on the example of Tomsk). *Ore deposits. Mineralogy. Geochemistry*. Tomsk: National Research Tomsk State University, vol. 2, pp. 94–101.
10. Larina N.S., Larin S.I., Zabolotina O.N. (2004) Dynamics of changes in the content of heavy metals in high-moor peatlands in the south of the Tyumen region. *Uspekhi sovremennoi estestvoznaniya*, no. 10, pp. 132–135.
11. Lezhenin A.A., Raputa V.F. (2021) Methods for assessing the city atmosphere pollution according to monitoring data // *Interexpo Geo-Siberia*, vol. 4, no. 1, pp. 159–166. doi:10.33764/2618-981X-2021-4-1-159-166.
12. Mezhibor A.M., Govoruha V.V. (2017) The use of epiphytic mosses to assess atmospheric air pollution by mercury under the influence of coal-fired enterprises. *Proceedings of the International Scientific Conference «Energy Ecology – 2017»*. Moscow: MPEI Publishing House, pp. 28–30.
13. Moskovchenko D.V. (2006) Biogeochemical properties of the high bogs in Western Siberia // *Geography and Natural Resources*, no. 1, pp. 63–70.
14. Moskovchenko D.V., Moiseeva I.N., Khozyainova N.V. (2012) Elemental composition of plants of the Urengoy tundra. *Bulletin of ecology, forest science and landscape science*, no. 12, pp. 130–136.
15. Moskovchenko D.V., Valeeva E.I., Lavrentiev S.Yu. (2002) Geochemical monitoring on the territory of the natural park «Numto». *Bulletin of ecology, forest science and landscape science*, no. 3, pp. 3–10.
16. Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. (2019) Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, no. 4, pp. 422–439. doi:10.1134/S0032180X19020114.
17. Perelman A.I. (1975) *Geochemistry of the landscape*. M.: Higher School, 342 p.
18. Pyanova E.A. (2005) Investigation of the transformation of the air flow over the suprathemally and orographically inhomogeneous underlying surface. *Computational Technologies*, vol. 30(2), pp. 106–111.
19. Raputa V.F., Lezhenin A.A. (2020) Estimate the height of the smoke plume from satellite imagery // *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 33, no. 6, pp. 471–475. doi:10.15372/AOO20200609.
20. Rogova N., Ryzhakova N., Borisenko A. (2019) Definition and Analysis of Natural and Anthropogenic Geochemical Background for the Boss-Biomonitoring Method. *Ecology and Industry of Russia*, no. 23(6), pp. 58–63. doi:10.18412/1816-0395-2019-6-58-63.
21. Ryzhakova N.K., Merkulov V.G., Borisenko A.L., Rogova N.S. Bioindication of atmospheric air pollution by chemical enterprises. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2013, vol. 56, no. 113, pp. 254–258.
22. Ryumina E.V. (2020) The impact of the environment on human potential: the health dimension. *International journal of humanities and natural sciences*, no. 9–1(48), pp. 152–160. doi:10.24411/2500-1000-2020-11002.
23. Selegey T.S., Filonenko N.N., (Шлычков) V.A., Lenkovskaya T.N. (2013) Formaldehyde pollution of the urban atmosphere as a function of certain meteorological factors. *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 26, no. 5, pp. 422–426.
24. Syso A.I., Siromlya T.I. (2018) Chemical elements and their compounds in soils and plants of native and anthropogenic ecosystems of Siberia. *Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments*. Tyumen: Tyumen State University, pp. 137–150.
25. Trofimova I.E., Balybina A.S. (2014) Classification of climates and climatic zoning of the West Siberian Plain. *Geography and Natural Resources*, no. 2, pp. 11–21.
26. Tsybukova T.N., Inisheva L.I., Tikhonova O.K., Zeile L.A., Yusubov M.S. (2000) Characteristics of the elemental composition of peat raw materials from an oligotrophic bog. *Chemistry of plant raw materials*, no. 4, pp. 29–34.
27. Agarwal S., Mukherjee P., Pramanick P., Mitra A. (2022) Seasonal Variations in Bioaccumulation and Translocation of Toxic Heavy Metals in the Dominant Vegetables of East Kolkata Wetlands: a Case Study with Suggestive Ecorestorative Strategies. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, July, pp. 1–27. doi:10.1007/s12010-022-04057-6.
28. Borgulat J., Mętrak M., Staszewski T., Wiłkomirski B., Suska-Malawska M. (2018) Heavy Metals Accumulation in Soil and Plants of Polish Peat Bogs. *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 27(2), pp. 537–544. doi:10.15244/pjoes/75823.
29. Crowder A. (1991) Acidification, metals and macrophytes. *Environmental Pollution*, no. 71(2–4), pp. 171–203. doi:10.1016/0269-7491(91)90032-R.
30. Dmochowski W., Gozdowski D., Brągoszewska P., Baczewska A.H., Suwara I. (2014) Phytoremediation of zinc contaminated soils using silver birch (*Betula pendula* Roth.). *Ecological Engineering*, 2014, vol. 71, pp. 32–35. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.07.053.
31. Fernandez-Fuego D., Bertrand A., Gonzalez A. (2017) Metal accumulation and detoxification mechanisms in mycorrhizal *Betula pubescens*. *Environmental Pollution*, vol. 231(1), pp. 1153–1162. doi:10.1016/j.envpol.2017.07.072.
32. Flem B., Reimann C., Fabian K. Excess Cr and Ni in top soil: Comparing the effect of geology, diffuse contamination, and biogenic influence. *Science of The Total Environment*. 2022. 843. 157059. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157059.
33. Galal T.M., Shehata H.S. (2015) Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*, 2015, vol. 48, pp. 244–251. doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.013.
34. Gashkova L.P. (2022) Peat and bog plants as indicators of aerosol pollution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1093 012023. doi:10.1088/1755-1315/1093/1/012023.

Экология и природопользование

Гашкова Л.П.

35. Gaskova L.P. (2018) Evaluation of heavy metal pollution in bogs of the Tomsk region on change in biogeochemical activity of ericaceous shrubs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 107(1). 012007. doi:10.1088/1755-1315/107/1/012007.
36. Kolon M., Kopeć M., Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Mróz L., Wąsowicz P., Rajs A., Kempers A.J. (2020) *Sanionia uncinata*, *Racomitrium lanuginosum* and *Salix herbacea* as ecological indicators of metals in Iceland. *Ecological Indicators*, 112. 106058. doi:10.1016/j.ecolind.2019.106058.
37. Liu B., Wang S., Wang J., Zhang X., Shen Z., Shi L., Chen, Y. (2020) The great potential for phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris*. *Science of The Total Environment*, 719. 137475. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137475.
38. Mäkilä M., Nieminen T.M., Säävuori H., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L. (2015) Does underlying bedrock affect the geochemistry of drained peatlands? *Geoderma*, vol. 239, pp. 280–292. doi:10.1016/j.geoderma.2014.11.002.
39. Pająk M., Halecki W., Gąsiorek M. Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach. *Chemosphere*, vol. 168, pp. 851–859. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.10.125.
40. Qihang W., Wang S., Thangavel P., Qingfei L., Zheng H., Jun B. and Qui R. (2011) Phytostabilization of *Jatropha curcas* L. in polymetallic acid mine tailings. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 13, pp. 788–804. doi:10.1080/15226514.2010.525562.
41. Roque-Álvarez I., Sosa-Rodríguez F.S., Vazquez-Arenas J., Escobedo-Bretado M.A., Labastida I., Corral-Rivas J.J., Aragón-Piña A., Armenta M.A., Ponce-Peña P., Lara R.H. (2018) Spatial distribution, mobility and bioavailability of arsenic, lead, copper and zinc in low polluted forest ecosystem in North-western Mexico. *Chemosphere*, vol. 210, pp. 320–333. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.07.004.
42. Rudmin M., Wilson M.J., Wilson L., Savichev O., Yakich T., Shaldybin M., Ruban A., Tabakaev R., Ibraeva K., Mazurov A. (2020) Geochemical and mineralogical features of the substrates of the Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Catena*, 194, 104781, doi:10.1016/j.catena.2020.104781.
43. Ryzhakova N.K., Babeshina L.G., Kondratyeva A.G., Sechnaya D.Y. (2017) Contents of macro-, microelements and long-lived radionuclides in the medicinal plants belonging to the wetland community of Siberian region, Russia. *Phytochemistry Letters*, vol. 22, pp. 280–286. doi:10.1016/j.phytol.2017.10.001.
44. Salazar M.J., Pignata M.L. (2014) Lead accumulation in plants grown in polluted soils. Screening of native species for phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 137, pp. 29–36. doi:10.1016/j.gexplo.2013.11.003.
45. Serbula S.M., Miljkovic D.D., Kovacevic R.M., Ilic A.A. (2012) Assessment of airborne heavy metal pollution using plant parts and topsoil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 76, pp. 209–214. doi:10.1016/j.ecoenv.2011.10.009.
46. Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. (2015) Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*, vol. 53, pp. 53–70. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.12.004.
47. Wojtuń B., Samecka-Cymerman A., Kolon K., Klink A., Kempers A.J. (2013) *Andromeda polifolia* and *Oxycoccus microcarpus* as pollution indicators for ombrotrophic bogs in the Western Sudety Mountains (SW Poland). *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 48, part A, pp. 686–693. doi:10.1080/10934529.2013.744578.
48. Zayed A., Gowthaman S., Terry N. (1998) Phytoaccumulation of Trace Elements by Wetland Plants: I. Duckweed. *Journal of Environmental Quality*, vol. 27, pp. 715–721. doi:10.2134/jeq1998.00472425002700030032x.

Статья поступила в редакцию: 28.03.23, одобрена после рецензирования: 10.10.2023, принята к опубликованию: 14.03.2024.

The article was submitted: 28 March 2023; approved after review: 10 October 2023; accepted for publication: 14 March 2024.

Информация об авторе

Людмила Павловна Гашкова

кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального научного центра агроботехнологий Российской академии наук 634050, а/я № 1668, г. Томск, ул. Гагарина, 3

e-mail: gashkova-lp@rambler.ru

Information about the author

Lyudmila P. Gashkova

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – Branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences 3, Gagarina st., Tomsk, 634050, Russia