

УДК 504.53:631.4

**ЭКОЛОГО-БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЧВ
ГОРНО-ЛЕСНОГО ПОЯСА БАСЕЙНА ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА****^{1,2}Ельчинова О.А., ^{1,2}Кузнецова О.В., ²Рождественская Т.А.,
¹Кайзер М.И., ^{1,2}Вышникова Т.В.**¹*Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, e-mail: eoa59@mail.ru;*²*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, e-mail: rtamara@iwwer.ru*

Исследовано содержание биогенных (Cu, Zn, Mn) и токсичных (Pb, Cd) элементов в гумусово-аккумулятивных горизонтах горно-лесных почв (бурых и серых), надземной фитомассе и корнях растений, отобранных на участках, сопряженных с почвенными разрезами, и лесной подстилке бассейна Телецкого озера. Установлено, что наибольшей подвижностью в исследуемых типах почв обладает кадмий (26,9–30,9%), наименьшей и примерно одинаковой – биогенные элементы: медь (3,4–5,2%) и цинк (3,2–5,3%), марганец (5,1–5,4%). Содержание подвижных форм металлов в почве находится в сильной корреляционной зависимости с валовым (для обоих типов почв $r = 0,99$). Определены коэффициенты биологического поглощения (< 1) и биогеохимической подвижности (< 8). Максимальные содержания элементов обнаружены в корнях и лесной подстилке. Лесная подстилка концентрирует все исследованные элементы и в дальнейшем является потенциальным источником поступления их в почву. Корневая система в большей степени препятствует поступлению в растения избытка токсикантов (Cd), чем биогенных элементов (Cu, Zn, Mn). Неодинаковое распределение свинца по частям растительных ассоциаций, произрастающих на разных типах почв, связано не только с наличием корневого барьера, но и с тем, что этот элемент поглощается растением пассивно. Концентрации исследованных элементов в почвах не превышают величин ОДК и ПДК, принятых в России и за рубежом. Уровень валового содержания свинца в почвах горно-лесного пояса характеризуется как «низкий», меди и цинка – «средний», кадмия – «высокий». Установленные значения содержания подвижных форм цинка можно отнести к таким градациям, как «низкое», меди и свинца – «среднее», кадмия – «повышенное», что свидетельствует об отсутствии загрязнения исследованных почв тяжелыми металлами.

Ключевые слова: биогенные и токсичные элементы, почвы, лесная подстилка, надземная фитомасса, корни, коэффициенты биологического поглощения и биогеохимической подвижности

**ECOLOGICAL AND BIOGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF SOILS
OF THE MOUNTAIN FOREST BELT OF THE TELETSKOE LAKE BASIN****^{1,2}Elchinina O.A., ^{1,2}Kuznetsova O.V., ²Rozhdestvenskaya T.A.,
¹Kayzer M.I., ^{1,2}Vyshnikova T.V.**¹*Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, e-mail: eoa59@mail.ru;*²*Institute for Water and Environmental Problems of SB RAS, Barnaul, e-mail: rtamara@iwwer.ru*

The content of biogenic (Mn, Zn, Cu) and toxic (Pb, Cd) elements in soils, aboveground phytomass, roots and litter of the mountain-forest belt (brown and gray) of the Teletskoye Lake basin were investigated. It was found that the greatest mobility in the studied soil types has cadmium (26.9–30.9%), the smallest and approximately the same biogenic elements – copper (3.4–5.2%) and zinc (3.2–5.3%), manganese (5.1–5.4%). The content of mobile forms of metals in the soil is strongly correlated with the gross (for both types of soils $r = 0,99$). The coefficients of biological absorption (< 1) and biogeochemical mobility (< 8) were determined. The maximum content of elements found in the forest litter. Forest litter concentrates all the studied elements and in the future is a potential source of their entry into the soil. The root system is more likely to prevent excess toxicants (Cd) from entering the plant than nutrients (Cu, Zn, Mn). The unequal distribution of lead by parts of plant associations growing on different types of soil is due not only to the presence of the root barrier, but also to the fact that this element is absorbed by the plant passively. The concentrations of all the studied elements in soils did not exceed the values of the Approximate Permissible Concentrations and Maximum Allowable Concentrations adopted in Russia and abroad. The level of gross content of lead in soils of mountain-forest zone is characterized as «low», copper and zinc – «middle», cadmium – «high». The established values of the content of mobile forms of zinc can be attributed to gradations as «low», copper and lead – «middle», cadmium – «high», which indicates the absence of contamination of the studied soils with heavy metals.

Keywords: biogenic and toxic elements, soils, forest litter, overground phytomass, roots, biological absorption coefficients and biogeochemical mobility

Сложная, динамическая система «почва – растение» играет важную роль в обменных процессах, предопределяя биогеохимический круговорот, включая в пищевые цепи не только биогенные, но и токсические вещества разной биологической активности. Поэтому в экологические исследования рационально включать не только изучение почвенного покрова, но и оценивать в целом систему «почва – растение», так

как буферные свойства почв и защитные возможности растений могут менять поведение металлов в экологической цепи. По выражению В.В. Добровольского [1], идеи и подходы биогеохимии весьма перспективны для развития экологии.

Экологическая оценка биохимической ситуации в лесном поясе Горного Алтая в целом дана С.Н. Балькиным с соавторами [2, 3]. Одним из основных ре-

креационных районов Республики Алтай является бассейн Телецкого озера – объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО (1998 г.). Часть его территории входит в Алтайский государственный природный биосферный заповедник (АГПБЗ), созданный в 1932 г. в целях сохранения и изучения уникального природного комплекса Телецкого озера и Прителецкой тайги. Другая часть (поселения Артыбаш, Яйлю, водопад Корбу, бассейны рек Чулышман и Башкаус) в летний период подвергаются антропогенной нагрузке в результате деятельности туристической отрасли, которая с каждым годом возрастает. Поэтому оценка современного состояния данной территории весьма актуальна и крайне необходима.

Цель исследования: эколого-биогеохимическая оценка почв горно-лесного пояса бассейна Телецкого озера.

Материалы и методы исследования

Основу почвенного покрова горно-лесного пояса бассейна Телецкого озера составляют горно-лесные бурые и горно-лесные серые почвы. Горно-лесные бурые почвы формируются под кедрово-лиственничными широколиственными или зеленомошными типами леса. Почвообразующим материалом служат продукты выветривания – в основном элювий и элювио-делювий коренных пород. Толща содержит много скелета, мелкоземистая часть тяжело- и среднесуглинистая. Органического вещества в виде грубого гумуса в верхней части профиля много (до 15%). Однако в горизонте А содержание гумуса значительно меньше и с глубиной оно убывает. Реакция среды кислая.

Горно-лесные серые почвы распространены под темнохвойными или березово-

осиновыми лесами с хорошо развитым высокоствольным. Чаще всего формируются на бескарбонатных тяжелых суглинках и глинах. Содержание гумуса варьирует в широких пределах – от 4 до 10%. Горно-лесные серые почвы характеризуются слабокислой или кислой реакцией среды.

Отбор проб проводили общепринятыми в почвоведении и агрохимии методами. В настоящей работе представлены данные содержания химических элементов в гумусовом горизонте ($A_{\text{дер}} + A$). Надземную фитомассу и подстилку отбирали с площади 1 м² на участках, сопряженных с почвенными разрезами. Отбор растительных проб проводили в фазу цветения, когда отмечается максимальное поступление химических элементов в надземную массу. Корни отмывали сначала в проточной воде, затем – дистиллированной. Определение содержания тяжелых металлов (марганца, меди, цинка, свинца, кадмия) проводили вольтамперометрическим методом. Подвижные формы элементов извлекали ацетатно-аммонийным буфером (рН 4,8). При обработке полученной информации использовали вариационно-статистический и корреляционный методы.

Результаты исследования и их обсуждение

Наиболее распространенным в экологической оценке почв является подход, состоящий в определении валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов. Варьирование, как валового содержания, так и подвижных форм отдельных элементов, в почвах невелико. Максимальные содержания в почвах отмечены для биогенных элементов. В то время как токсичных элементов значительно меньше (таблица).

Содержание биогенных и токсичных элементов, мг/кг

Объект	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn
Горно-лесная бурая почва					
Почва (В)*	9,50 ± 0,60	0,68 ± 0,06	17,30 ± 1,20	58,7 ± 6,10	468,6 ± 36,4
Почва (II)**	0,52 ± 0,04	0,21 ± 0,01	0,60 ± 0,06	1,9 ± 0,14	25,5 ± 2,3
Корни	0,89 ± 0,06	0,18 ± 0,02	0,71 ± 0,06	10,2 ± 0,99	34,7 ± 2,6
Подстилка	0,45 ± 0,03	0,14 ± 0,01	4,42 ± 0,36	15,1 ± 1,13	140,9 ± 11,7
Надземная масса	0,20 ± 0,01	0,01 ± 0,00	2,44 ± 0,26	11,2 ± 1,08	61,5 ± 5,9
Горно-лесная серая почва					
Почва (В)	7,70 ± 0,70	0,93 ± 0,09	13,60 ± 1,40	31,9 ± 2,90	535,0 ± 47,1
Почва (II)	0,97 ± 0,06	0,25 ± 0,01	0,70 ± 0,06	1,7 ± 0,15	27,6 ± 2,03
Корни	0,36 ± 0,03	0,01 ± 0,00	2,20 ± 0,19	8,0 ± 0,57	125,6 ± 10,9
Подстилка	0,71 ± 0,07	0,18 ± 0,00	8,70 ± 0,09	11,6 ± 1,01	103,3 ± 9,4
Надземная масса	0,68 ± 0,07	0,12 ± 0,01	3,30 ± 0,02	5,7 ± 0,47	21,0 ± 1,9

Примечание. * – валовое содержание; ** – содержание подвижных форм, извлеченных ацетатно-аммонийным буфером (рН 4,8).

Содержание подвижных форм металлов в почве находится в сильной корреляционной зависимости с валовым (для обоих типов почв $r = 0,99$). Степень подвижности – это условный показатель доступности растениям микроэлементов-металлов. Содержание подвижных форм тяжелых металлов подвержено сильным колебаниям, что определяется составом и свойствами почв, влиянием растений, а также свойствами конкретного элемента. В исследованных почвах степень подвижности сильно варьирует. Наибольшей подвижностью в исследуемых типах почв обладает кадмий (26,9–30,9%), наименьшей и примерно одинаковой – медь (3,4–5,2%) и цинк (3,2–5,3%). Что согласуется с данными, приведенными В.Б. Ильиным [4] для незагрязненных лесных почв Западной Сибири. Подвижность марганца составляет 5,1–5,4%.

По шкале экологического нормирования для почв со слабокислой реакцией среды по А.И. Обухову [5] уровень валового содержания свинца в почвах горно-лесного пояса характеризуется как «низкий», меди и цинка – «средний», кадмия – «высокий». Установленные значения содержания подвижных форм цинка можно отнести к градациям как «низкое», меди и свинца – «среднее», кадмия – «повышенное». Выше изложенное свидетельствует об отсутствии загрязнения исследованных типов почв тяжелыми металлами.

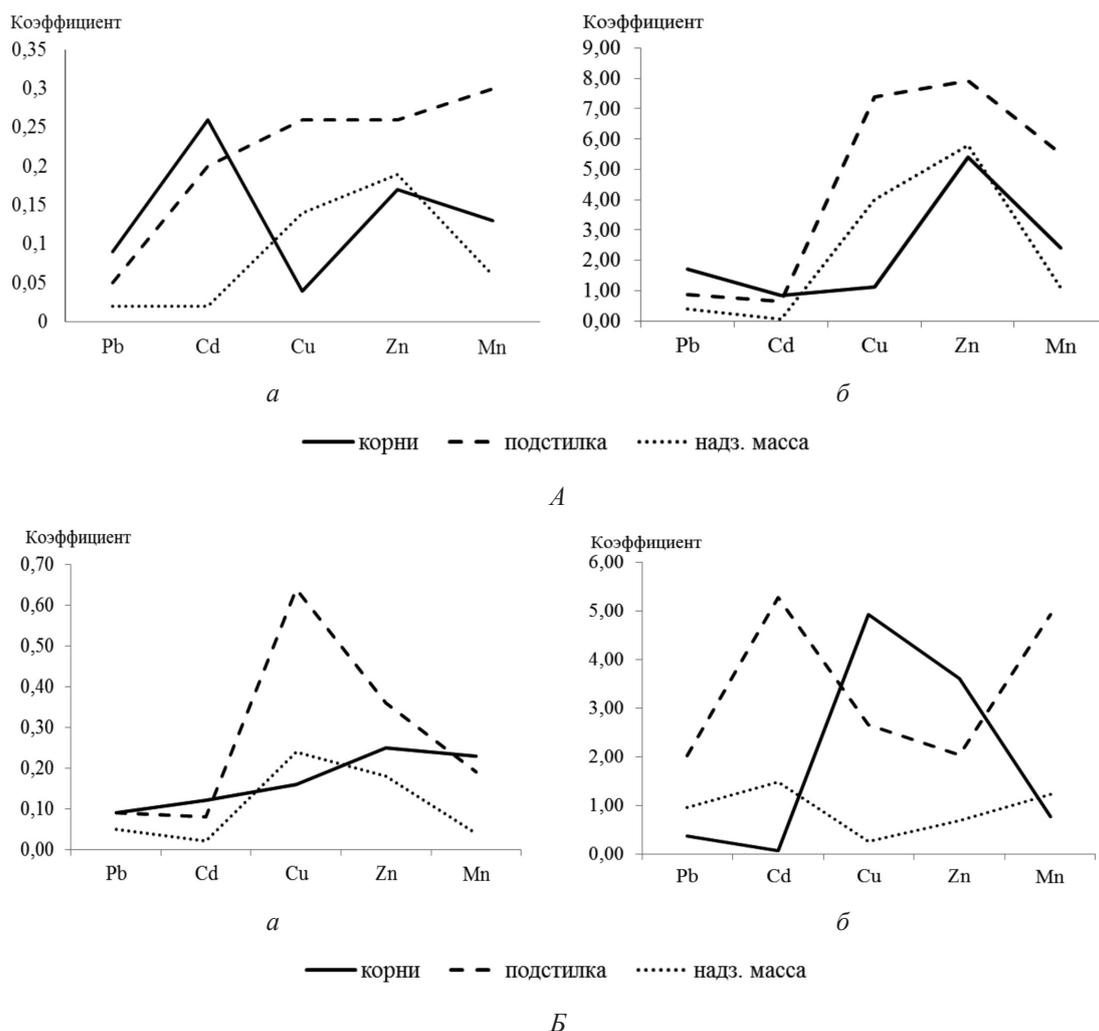
Содержание в почве химических элементов и сопряженная с этим транслокация их в растения – сложный процесс, на который влияют множество факторов. Снижение содержания элементов в растениях является свидетельством ограниченного поглощения их последними в связи с наличием физиолого-биохимических барьеров поглощения и достаточно низкой подвижностью микроэлементов.

Корневая система в большей степени препятствует поступлению в растения избытка токсикантов (Pb, Cd), чем биогенных элементов (Cu, Zn, Mn). Способность корневой системы растений задерживать избыточные ионы обусловлена совокупным действием морфологических структур и химических реакций неспецифической природы, к которым относятся поясок Каспари, обменная емкость корней, многочисленные органические соединения, образующие с элементами малоподвижные соединения. Корень способствует механической задержке или ад-

сорбции на стенках клеток, уменьшению их подвижности или изоляции [4]. Вид растительности и тип их корневой системы достаточно сильно влияют на накопление одного и того же элемента в корнях.

Уровень концентрации химических элементов в надземной части растений контролируется процессами их транспорта из корневой системы. Ограничение процессов транслокации в вегетативные органы можно оценить, сравнивая аккумуляционную способность корневой и надземной частей растений. Оно, как правило, имеет место в условиях природного или техногенного загрязнения. При отсутствии же загрязнения механизмы корневой защиты не вступают в действие и возможно специфическое распределение элемента по органам и тканям растений. Так, содержание биогенных элементов (марганца и меди) в корневой системе ниже, чем в надземной массе. Цинк распределяется практически равномерно между надземной и подземной массой. Токсичных же элементов (свинца и кадмия) в корнях растительности, развитой на горно-лесной бурой почве, накапливается больше, чем в надземной массе.

При изучении поведения химических элементов в лесных ландшафтах подстилки имеют наиболее важное значение из всех компонентов. Активные биогеохимические процессы, протекающие в подстилках, из-за постоянно поступающего органического материала, высокие депонентные свойства по отношению к выпадающим из атмосферы химическим компонентам – все эти качества ставят лесные подстилки в ряд природных объектов, играющих исключительную роль биогеохимического барьера на пути миграции элементов в лесных ландшафтах [6]. При рассмотрении концентраций элементов в подстилке горно-лесных серых и бурых почв, необходимо учитывать соотношение лиственных и хвойных пород, меньшую скорость деструкции хвои и способность накапливать тот или иной химический элемент. Например, в хвое содержание биогенных элементов выше, чем в листьях. Поэтому лесная подстилка, образующаяся на горно-лесной бурой почве, сформированной под кедрово-лиственничными лесами, содержит больше марганца и цинка, чем подстилка, образованная на горно-лесной серой почве под березово-осиновыми лесами.



Коэффициенты биологического поглощения (а) и биогеохимической подвижности (б) элементов в горно-лесной серой (А) и горно-лесной бурой почвах (Б)

Распределение металлов в системе «почва – растение» зависит от различных условий. Количественно степень взаимосвязи химических элементов в этой системе и характеристика региональных биогеохимических особенностей выражается коэффициентом биологического поглощения, который представляет собой отношение содержания элементов в золе растений к их валовому содержанию в почве, на которой произрастает данное растение. Коэффициент биологического поглощения отражает скорее потенциальную биогеохимическую подвижность элементов. Доступность и степень использования растениями того или иного элемента характеризуется коэффициентом биогеохимической подвижности. Это отношение

содержания элементов в растении к содержанию подвижных форм элементов в почве. Величины рассчитанных коэффициентов представлены на рисунке.

Максимальные коэффициенты биологического поглощения и биогеохимической подвижности выявлены для биогенных элементов, минимальные – для токсичных. По величине коэффициента биологического поглощения отдельные части растительных ассоциаций на обоих типах почв можно расположить в следующие убывающие ряды: для биогенных элементов – лесная подстилка > корни > надземная масса; для токсичных элементов – корни ≥ лесная подстилка > надземная масса. Соотношение содержаний подвижных форм элементов в гумусово-аккумулятив-

ных горизонтах почв и сухом веществе разных частей растительных ассоциаций различается в десятки раз. Концентрация как биогенных, так и токсичных элементов, за исключением свинца в горно-лесной серой почве, в сухой массе корней превышает содержание их доступных форм в почве. В надземной массе растений концентрируются только биогенные элементы, а содержание токсичных по сравнению с почвой снижается. На более активное поглощение подвижных форм меди и марганца в лесных ландшафтах Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника указывают П.Р. Енчилик, Е.Н. Асеева, И.Н. Семенов [7].

По данным этих же авторов, с увеличением увлажненности ландшафтов усиливается и поглощение цинка. Исследованная территория характеризуется повышенным атмосферным увлажнением (в Прителецкой тайге может выпадать до 1000 мм осадков в год). Кроме того, горно-лесные бурые и горно-лесные серые почвы, формирующиеся под пологом лесной растительности, практически постоянно находятся в состоянии повышенной увлажненности. Вышесказанное относится к незагрязненным территориям. В условиях же техногенного загрязнения содержание цинка в корнях может почти в 3 раза превышать его содержание в стеблях и листьях [8].

Для кадмия характерно акропетальное распределение по органам растения. Ведущую роль здесь играет корневой барьер, поэтому транслокация в надземные органы слабая [9]. На поведение свинца в системе «почва – растение» оказывает влияние не только наличие корневого барьера, но и тот факт, что этот элемент поглощается растением пассивно. Этим, вероятно, можно объяснить неодинаковое распределение токсиканта по частям растительных ассоциаций, произрастающих на разных типах почв. В горно-лесных бурых почвах при более кислой реакции среды свинец поглощается интенсивнее, но большая часть его локализуется в корнях. В горно-лесных серых почвах с менее кислой реакцией элемент поглощается из почвы слабее и значительная доля его накапливается в надземной массе.

Лесная подстилка концентрирует все исследованные элементы и в дальнейшем является потенциальным источником поступления их в почву. Для лесной подстилки отмечены максимальные показатели коэффициентов биологического поглощения и биогеохимической подвижности.

Заключение

Уровень валового содержания свинца в почвах горно-лесного пояса характеризуется как «низкий», меди и цинка – «средний», кадмия – «высокий». Установленные значения содержания подвижных форм цинка можно отнести к таким градациям, как «низкое», меди и свинца – «среднее», кадмия – «повышенное», что свидетельствует об отсутствии загрязнения исследованных почв тяжелыми металлами. Наибольшей подвижностью в исследуемых типах почв обладает кадмий (26,9–30,9%), наименьшей и примерно одинаковой биогенные элементы – медь (3,4–5,2%), цинк (3,2–5,3%), марганец (5,1–5,4%). Концентрации исследованных элементов в почвах не превышают величин ОДК и ПДК, принятых в России и за рубежом. Максимальные концентрации токсичных элементов обнаружены в корнях растений, биогенных – в лесной подстилке и надземной массе. По величине коэффициента биологического поглощения отдельные части растительных ассоциаций на исследованных типах почв можно расположить в следующие убывающие ряды: для биогенных элементов – лесная подстилка > корни > надземная масса; для токсичных элементов – корни ≥ лесная подстилка > надземная масса.

Полученные сведения о местном фоновом содержании биогенных и токсичных элементов в почвах и растительности имеют важное практическое значение – их можно использовать в качестве начальной точки отсчета при возможном антропогенном загрязнении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (18-45-040008).

Список литературы / References

1. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 400 с.
2. Dobrovolsky V.V. Basics of biogeochemistry. M.: Izdatel'skiy centr «Akademiya», 2003. 400 p. (in Russian).
3. Балькин С.Н., Ключников М.В. Почвы лиственничных лесов Горного Алтая // Мир науки, культуры, образования. 2009. № 1 (13). С. 20–22.
4. Balykin S.N., Kluchnikov M.V. The Larch Forest Soils of Mountain Altai // The world of science, culture and education. 2009. № 1 (13). P. 20–22 (in Russian).
5. Балькин С.Н., Пузанов А.В. Экологическая оценка биохимической ситуации в лесном поясе Горного Алтая // Регионы нового освоения: экологические проблемы, пути их решения: материалы Межрегиональной научно-практической конференции. 2008. С. 11–14.
6. Balykin S.N., Puzanov A.V. Ecological assessment of the biochemical situation in the forest belt of the Altai Mountains // Regions of new development: environmental problems, ways to solve them. Materials of the Interregional scientific and practical conference. 2008. P. 11–14 (in Russian).

4. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 219 с.
- Ilin V. B. Heavy metals and nonmetals in the soil – plant system. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012. 219 p. (in Russian).
5. Обухов А.И., Ефремова Л.А. Охрана и рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами. // Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы: тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции. Ч. 1. М., 1988. С. 23.
- Obukhov A.I., Efremova L.A. Soil conservation, remediation of soils contaminated with heavy metals // Heavy metals in the environment and nature protection: theses of reports of the 2nd All-Union conference. P. 1. M., 1988. P. 23 (in Russian).
6. Щербов Б.Л. Роль лесной подстилки в миграции химических элементов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах в Сибири // Сибирский экологический журнал. 2012. Т. 19. № 2. С. 253–265.
- Shcherbov B.L. The role of forest floor in migration of metals and artificial nuclides during forest fires in Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2012. V. 5. № 2. P. 191–199. DOI: 10.1134/S1995425512020114.
7. Енчилик П.Р., Асеева Е.Н., Семенов И.Н. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 93–98. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14093.
- Enchilik P.R., Aseeva E.N., Semenov I.N. Biological uptake and biogeochemical mobility of microelements in forest landscapes of the Central Forest State Biosphere Nature Reserve // Regional environmental issues. 2018. № 4. P. 93–98 (in Russian).
8. Черняхов В.Б., Щеглова Е.Г. Основные параметры распределения микроэлементов (Zn, Pb, Ag, Mo и Co) в растительном покрове Яман-Касинского медноколчеданного месторождения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (60). С. 162–164.
- Chernyakhov V.B., Shcheglova E.G. Basic parameters of distribution of trace elements (Zn, Pb, Ag, Mo and Co) in the vegetation cover of the Yaman-Kasin copper-plated Deposit // Izvestiia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. № 4 (60). P. 162–164 (in Russian).
9. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4rd ed. CRC Press, 2011. 534 p.