

УДК 631.42:550.47

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕК И ОЗЕР ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. С. Земцова^{1*}, Г. С. Алимова², А. Ю. Токарева³

CONTENT OF METALS IN BOTTOM SEDIMENTS OF RIVERS AND LAKES OF THE TYUMEN REGION

E. S. Zemtsova^{1*}, G. S. Alimova², A. Yu. Tokareva³

Тобольская комплексная научная станция Уральского отделения Российской академии наук
626152, Тюменская область, г. Тобольск, ул. имени академика Юрия Осипова, 15, Россия
¹e-mail: zemcovaelena@mail.ru, ¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0093-9064>
²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6275-6143>, ³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1727-1408>

Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
626152, Tyumen region, Tobolsk, Street named after Academician Yuri Osipov, 15, Russia

Поступило в редакцию 26.05.2023
Принято к публикации 23.07.2023

Submitted 26.05.2023
Accepted 23.07.2023

На основе анализа литературных данных и результатов собственных исследований проведено сопоставление валовых концентраций Fe, Mn, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd в донных отложениях водных объектов Тюменской области – реки Иртыш (нижнего течения), рек Обь-Иртышского бассейна (Демьянка, Лев, Самсоновская, Вандрас), озера Кучак, рек и озер Надым-Пур-Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Донные отложения водных объектов исследуемой территории характеризовались значительной гетерогенностью по гранулометрическому составу. В песках содержание металлов было в несколько раз ниже по сравнению с илами и суглинками. Усредненные валовые концентрации Fe в донных отложениях разного гранулометрического состава находились в диапазоне 2 670–21 530 мг/кг, Mn – 50–452 мг/кг, Pb – 3.3–85.1 мг/кг, Zn – 6.2–94.2 мг/кг, Cr – 6.4–37.4 мг/кг, Ni – 1.8–14.8 мг/кг, Cu – 1.7–13.6 мг/кг, Cd – 0.05–1.42 мг/кг. Отличительной особенностью донных осадков р. Иртыш были повышенные концентрации Pb по сравнению с другими исследуемыми объектами. Образцы донных отложений озера Кучак характеризовались более высокими количествами Zn и Cd.

Ключевые слова: донные отложения, гранулометрический состав, металлы, Тюменская область.

Key words: bottom sediments, granulometric composition, metals, Tyumen region.

EDN: PLKMUM

DOI: 10.25713/HS.2023.1.1.009

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения (ДО) являются аккумуляторами многих загрязняющих веществ. Концентрации тяжелых металлов в верхних слоях ДО, как правило, намного выше, чем концентрации веществ, растворенных в водной толще (Dauvalter, 2012). Депонируя загрязняющие вещества, ДО могут стать вторичным источником загрязнения. Под влиянием изменения физико-химических условий окружающей среды (например, pH, окислительно-восстановительного потенциала, содержания растворенного кислорода, бактериальной активности) соединения, связанные с ДО могут переходить в водную толщу, поступать в пищевую цепь, приводить к значительным негативным воздействиям на гидробионты и, в конечном счете – на человека (Dauvalter, 2012). Некоторые относительно инертные и безвредные неорганические вещества могут переходить в растворимые и потенци-

ально токсичные формы. Например, в результате метаболизма донных микроорганизмов из ртути образуется значительно более токсичное соединение – метилртуть (Loit, 2006).

Одним из наиболее значимых факторов, обуславливающих способность ДО концентрировать и удерживать микроэлементы, является гранулометрический состав (Dauvalter, 2012). Увеличение концентраций металлов очень тесно коррелирует с уменьшением размеров частиц, слагающих ДО (Strahov, 1968; Groot de et al., 1982). Чем меньше размеры частиц, тем больше площадь поверхности на единицу массы (удельная площадь). Например, по данным (Jackson, 1979) площадь поверхности «очень грубого песка» (диаметр частиц 2 000 мкм) составляет 11 см²/г, а «очень тонкой глины» (диаметр частиц – 0.5 мкм) – 45 280 см²/г. Чем больше удельная площадь поверхности частиц, тем выше концентрация сорбированных на ней микроэлементов. Следует отметить, что

связь между площадью поверхности и концентрацией элементов не линейная, а логарифмическая (Ногowitz, Elrick, 1987). Основным механизмом аккумуляции элементов на поверхностях является адсорбция (происходит без катионного обмена) (Dauvalter, 2012). Такие химические вещества, как органическое вещество, гидроксид железа и окислы марганца, адсорбированные на поверхности частиц, дополнительно аккумулируют некоторое количество микроэлементов в ДО. Концентрации элементов в ДО на отдельных участках одного и того же водного объекта могут значительно отличаться, что обуславливается как природными (в частности, неоднородностью ДО по гранулометрическому составу), так и техногенными факторами.

Цель данной работы – установить особенности содержания металлов в ДО разного гранулометрического состава (на территории Тюменской области) на основе результатов собственных исследований и имеющихся литературных данных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Оценка физико-химического состава ДО реки Иртыш и рек Обь-Иртышского бассейна – Демьянка, Лев, Вандрас, Самсоновская, расположенных в южной части Ханты-Мансийского автономного округа, выполнена в химико-экологической лаборатории Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук, аккредитованной в области проведения соответствующих аналитических работ. Всего было исследовано 63 образца ДО р. Иртыш с правого, левого берегов и стержня реки и 24 образца ДО малых рек Обь-Иртышского бассейна (по 6 образцов с каждой реки). Отбирали поверхностный слой грунта со дна рек с помощью дночерпателя бентосного. Гранулометрический состав ДО определяли с помощью метода Рутковского, классификацию грунтов проводили при использовании треугольника Ферре. Анализ валового содержания элементов выполняли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima 7000DV (PerkinElmer, США). Предварительно анализируемые пробы подготавливали в соответствии с требованиями нормативных документов. Образцы ДО высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали в фарфоровой ступке пестиком и просеивали через капроновое сито с диаметром отверстий 1 мм. Навеску анализируемой пробы массой 4 г помещали в реакционный сосуд, добавляли 10 мл царской водки (HNO₃:HCl = 1:3), смесь разлагали с помощью микроволновой системы разложения проб Speedwave MWS-2 (BERGHOF Products + Instruments GmbH, Германия). В образцах ДО р. Иртыш анализировали содержание Fe, Mn, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu и Cd. В образцах ДО малых рек Обь-Иртышского бассейна определяли концентрации Mn, Pb, Zn, Cr, Ni и Cu. Поскольку распределение анализируемых признаков в выборке отличалось от нормального (гауссового) распределения, в качестве статистической характеристики содержания элемента в ДО выбрана медиана.

ДО водных объектов Надым-Пур-Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа изучены М.Г. Опекуновой с соавторами (Орекунова et al., 2019). Гранулометрический состав авторы устанавливали пипеточ-

ным методом. В пробах ДО анализировали содержание 14 химических элементов, в том числе Fe, Mn, Pb, Cr, Cu, Zn и Ni. Для этого использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Рассчитывали среднее арифметическое содержание элемента в ДО после удаления аномальных концентраций.

Анализ ДО озера Кучак выполнен В.Г. Катанаевой с соавторами (Katanaeva et al., 2003). В данной работе оценку гранулометрического состава ДО проводили седиментационным методом и методом спектра мутности. Содержание тяжелых металлов определяли атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией пробы с применением спектрофотометра «Спираль-17». Анализировали четыре элемента – Cu, Zn, Pb и Cd. Вычисляли среднее содержание металлов в ДО разного гранулометрического состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выявлено значительное разнообразие ДО нижнего течения р. Иртыш по содержанию гранулометрических фракций разной крупности, что позволило дифференцировать их на следующие типы – пески (составили 27% в общей выборке образцов), суглинистые пески (21%), песчанистые суглинки (32%), суглинки (7%) и суглинки илистые (14%). Максимальное содержание химических элементов было характерно для суглинков илистых, минимальное – для песков (рис. 1, 2).

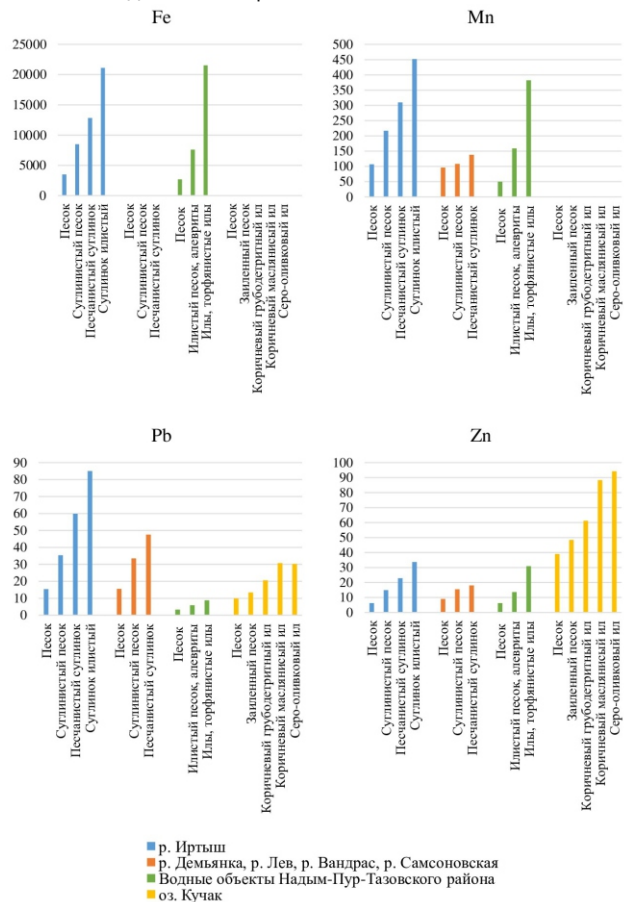


Рис. 1. Содержание металлов (Fe, Mn, Pb, Zn) в донных отложениях водных объектов Тюменской области в зависимости от гранулометрического состава (мг/кг)

Fig. 1. The content of metals (Fe, Mn, Pb, Zn) in the bottom sediments of water bodies of the Tyumen region, depending on the granulometric composition (mg/kg)

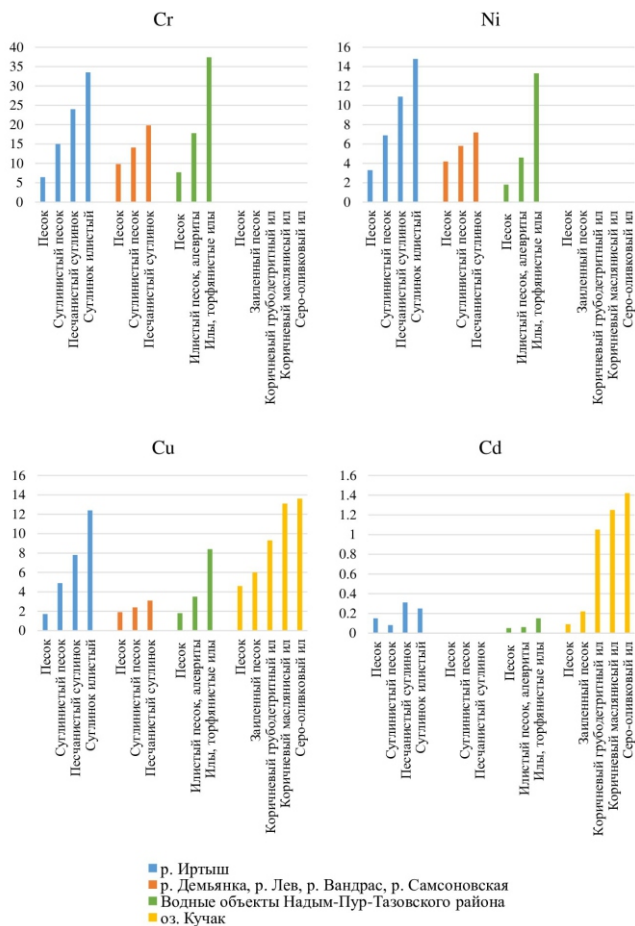


Рис. 2. Содержание металлов (Cr, Ni, Cu, Cd) в донных отложениях водных объектов Тюменской области в зависимости от гранулометрического состава (мг/кг)

Fig. 2. The content of metals (Cr, Ni, Cu, Cd) in the bottom sediments of water bodies of the Tyumen region, depending on the granulometric composition (mg/kg)

Валовые концентрации Cu в суглинках илистых и песках различались в 7 раз, Fe – в 6 раз, Pb, Cr и Zn – в 5 раз, Mn и Ni – в 4 раза, Cd – в 2 раза. Выявлены положительные корреляции между увеличением концентраций химических элементов и процентного содержания тонкодисперсного материала (Zemtsova et al., 2019).

При анализе ДО рек Обь-Иртышского бассейна (Демьянка, Лев, Вандрас, Самсоновская) также наблюдалась неоднородность по механическому составу. В результате все исследуемые образцы речных отложений были отнесены к трем типам – пески, суглинистые пески и песчаные суглинки. Наибольшее содержание металлов определено в песчаных суглинках, наименьшее – в песках. В песчаных образцах рек Обь-Иртышского бассейна концентрации Mn, Pb, Zn, Cr, Ni и Cu соответствовали содержанию данных металлов в песках Иртыша, либо незначительно их превосходили, в то же время в песчаных суглинках они имели более низкие концентрации по сравнению с р. Иртыш (рис. 1, 2).

Отложения водных объектов Надым-Пур-Тазовского района ЯНАО были отнесены к трем типам – мелкозернистые пески, илистые пески и илы (торфянистые илы), которые охватили весь гранулометрический спектр от-

ложений (Opekunova et al., 2019). Установлено, что среднее содержание металлов в илах многократно превышало их концентрацию в мелкозернистых песках. Различия в содержании Fe и Mn были кратны 8, Ni – 7, Cr, Zn и Cu – 5, Pb – 3 (рис. 1, 2). Валовые концентрации Fe, Mn, Zn, Cr, Ni и Cu в ДО рек и озер Надым-Пур-Тазовского района были приближены к концентрациям данных металлов в отложениях нижнего течения реки Иртыш близкого гранулометрического состава. Количество Pb в ДО исследуемых водных объектов ЯНАО характеризовалось значительно более низкими значениями – среднее содержание варьировало в пределах от 3.3 до 8.8 мг/кг в зависимости от типа ДО, в то время как в р. Иртыш соответствовало диапазону от 15.4 до 85.1 мг/кг.

Осадки озера Кучак были представлены песками, заиленными песками и илами – коричневым грубодетритным, коричневым маслянистым и серо-оливковым (Katanaeva et al., 2003). Для двух последних типов донных осадков характерны наименьшие размеры частиц и, соответственно, наибольшая поглощательная способность. Мелкодисперсные илы содержали в 1.5–2 раза больше тяжелых металлов, чем грубодисперсные. Наименьшие количества всех элементов содержали пески (рис. 1, 2). По сравнению с другими водными объектами в ДО озера Кучак обнаружены более высокие концентрации Zn и Cd. Так, усредненное содержание Zn колебалось от 39.0 до 94.2 мг/кг в зависимости от гранулометрического состава образцов, в то время как в других исследуемых объектах средние показатели не превышали 33.7 мг/кг. Концентрации Cd в отложениях озера Кучак достигали 1.42 мг/кг, в образцах ДО других водных объектов были менее 0.31 мг/кг.

Таким образом, анализ химического состава ДО рек и озер Тюменской области показал, что в суглинках и илах содержание металлов в несколько раз выше, чем в песках, что необходимо учитывать при оценке уровня загрязненности водных объектов. Подобная закономерность характерна и для почв (Chernova, Bezuglova, 2019; Syso, Siromlya, 2018), исследователи также акцентируют внимание на том, что «при экологическом почвенном мониторинге в качестве фоновых значений не могут использоваться просто усредненные показатели, характеризующие почвы региона, следует принимать во внимание также типологическую принадлежность и, особенно, гранулометрический состав почв» (Chernova, Bezuglova, 2019: 1024). В некоторых работах, в частности при исследовании ДО водоемов северо-запада России (Карелии и Мурманской обл.), показана ключевая роль органического вещества в накоплении тяжелых металлов (Slukovskii, 2019). Отложения большинства озер северной таежной зоны – это илы с большим и очень большим (до 80%) содержанием органики. Между концентрацией ряда металлов в осадках озер и содержанием органического материала выявлены тесные корреляции (Slukovskii, 2019). В наших исследованиях доля органического вещества в ДО рек Тюменской области характеризовалась низкими значениями (не превышала 1,7%) и слабо коррелировала с концентрацией химических элементов (Al, Co, Pb, Cu, Zn, As) (Zemtsova et al., 2019). Следует также отметить, что хорошими природными сорбен-

тами металлов являются оксиды и гидроксиды железа и марганца (сорбционная способность выше по сравнению с карбонатами и алюмосиликатами), что связано с их способностью покрывать тонким пористым слоем поверхность других частиц твердого осадка (Papina, 2001). Концентрации гидроксида железа в ДО могут варьировать в широких пределах, соответственно, при прочих равных условиях могут значительно изменяться и концентрации других металлов. При этом наблюдаемая обратная корреляция между размером гранулометрических фракций и содержанием металлов может быть нарушена (Papina, 2001).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Донные отложения исследованных рек и озер на территории Тюменской области характеризуются значительной гетерогенностью по механическому составу, соответственно, обладают различной сорбционной емкостью. Во всех водных объектах наблюдалась многократная разница в содержании металлов в донных осадках легкого и тяжелого гранулометрического состава. Усредненные валовые концентрации Fe варьировали в зависимости от типа донных отложений в пределах 2 670–21 530 мг/кг, Mn – 50–452 мг/кг, Pb – 3.3–85.1 мг/кг, Zn – 6.2–94.2 мг/кг, Cr – 6.4–37.4 мг/кг, Ni – 1.8–14.8 мг/кг, Cu – 1.7–13.6 мг/кг, Cd – 0.05–1.42 мг/кг. Установленные концентрации металлов могут быть рекомендованы для оценки техногенного воздействия на ДО при проведении экологического мониторинга состояния окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Dauvalter] Даувальтер В.А. 2012. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск. 242 с.
- [Chernova, Bezuglova] Чернова О.В., Безуглова О.С. 2019. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв. Почвоведение 8, 1015–1026. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080045>
- Groot A. de, Zshuppe K., Salomons W. 1982. Standardization of methods of analysis for heavy metals in sediments. Hydrobiol 92, 689–695.
- Horowitz A., Elrick K. 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size, and composition to trace element chemistry. Appl. Geochem 2, 437–451.
- Jackson M. 1979. Soil chemistry analysis – advanced course. Madison, Wis., 898 p.
- [Katanaeva et al.] Катанаева В.Г., Газизова М.А., Машошина А.А., Ларина Н.С. 2003. Тяжелые металлы в донных отложениях озера Кучак. Вестник Тюменского государственного университета 2, 234–247.
- [Loit] Лойт А.О. (ред.) 2006. Общая токсикология. СПб. 224 с.
- [Opekunova et al.] Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кушкин С.Ю., Ганул А.Г. 2019. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири. Почвоведение 4, 422–439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>
- [Papina] Папина Т.С. 2001. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взве-

шенное вещество – донные отложения речных экосистем. Новосибирск. 58 с.

[Slukovskii] Слуковский З.И. 2019. Опасные связи, или что нужно знать об экологии северных озер. Природа 1252 (12), 8–17.

<https://doi.org/10.7868/S0032874X19120020>

[Strahov] Страхов Н.М. 1968. К теории геохимического процесса в гумидных зонах. В кн. Геохимия осадочных пород и руд. Москва. С. 102–133.

[Syso, Siromlya] Сысо А.И., Сиромля Т.И. 2018. Химические элементы и их соединения в почвах и растениях нативных и антропогенных экосистем Сибири. В кн.: Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. Материалы III Международной школы-семинара молодых исследователей. Тюмень. С. 137–150.

[Zemcova et al.] Земцова Е.С., Алимова Г.С., Токарева А.Ю. 2019. Химико-экологическая оценка состояния донных отложений реки Иртыш на территории Тюменской области РФ. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета 22(1), 177–187. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-177-187>

Summary. On the basis of the analysis of literature data and results of own researches we compared total Fe, Mn, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd concentrations in bottom sediments of water bodies of Tyumen region – Irtysh river (lower reaches), rivers of Ob-Irtysh basin (Demianka, Lev, Samsonovskaya, Vandras), Kuchak lake, rivers and lakes of Nadym-Pur-Taz region of Yamalo-Nenets autonomous district. Bottom sediments of water bodies of the study area were characterized by significant heterogeneity in terms of grain-size composition. In sands the metal content was somewhat lower compared to silt and loam. The average gross Fe concentrations in bottom sediments of different granulometric compositions were in the range of 2 670–2530 mg/kg, Mn – 50–452 mg/kg, Pb – 3.3–85.1 mg/kg, Zn – 6.2–94.2 mg/kg, Cr – 6.4–37.4 mg/kg, Ni – 1.8–14.8 mg/kg, Cu – 1.7–13.6 mg/kg, Cd – 0.05–1.42 mg/kg. A distinctive feature of the bottom sediments of the Irtysh River were increased concentrations of Pb compared with other studied objects. Bottom sediment samples from Lake Kuchak were characterized by higher amounts of Zn and Cd.

REFERENCES

- Dauvalter V.A. 2012. Geoekologiya donnyh otlozhenij ozer [Geoecology of lake bottom sediments]. Murmansk. 242 p. (In Russian).
- Chernova O.V., Bezuglova O.S. 2019. Use of background concentrations of heavy metals for regional monitoring of soil contamination by the example of Rostov oblast. Eurasian Soil Science 52 (8), 1007–1017. <https://doi.org/10.1134/S1064229319080040>
- Groot A. de, Zshuppe K., Salomons W. 1982. Standardization of methods of analysis for heavy metals in sediments. Hydrobiol 92, 689–695.
- Horowitz A., Elrick K. 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size, and composition to trace element chemistry. Appl. Geochem 2, 437–451.
- Jackson M. 1979. Soil chemistry analysis – advanced course. Madison, Wis., 898 p.

- Katanaeva V.G., Gazizova M.A., Mashoshina A.A., Larina N.S. 2003. Tyazhelye metally v donnyh otlozheniyah ozera Kuchak [Heavy metals in bottom sediments of Lake Kuchak]. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Tyumen State University] 2, 234–247. (In Russian).
- Loit A.O. (ed.). 2006. Obshchaya toksikologiya [General toxicology]. Saint-Petersburg. 224 p. (In Russian).
- Opekunova M.G., Opekunov A.Y., Kukushkin S.Y., Ganul A.G. 2019. Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia. Eurasian Soils Science 52 (4), 380–395.
<https://doi.org/10.1134/S106422931902011X>
- Papina T.S. 2001. Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v ryadu: voda – vzveshennoye veshchestvo – donnyye otlozheniya rechnykh ekosistem [Transport and distributive characteristics of heavy metals along the following chain: water – suspended substance – bottom sediments of river ecosystems]. Novosibirsk, 58 p. (In Russian)
- Slukovskii Z.I. 2019. Opasnye svyazi, ili chto nuzhno znat' ob ekologii severnykh ozer [Dangerous bonds or what we need to know about the ecology of the northern lakes]. Priroda [Nature] 1252 (12), 8–17. (In Russian).
<https://doi.org/10.7868/S0032874X19120020>
- Strahov N.M. 1968. K teorii geohimicheskogo processa v gumidnykh zonah [Toward a Theory of the Geochemical Process in Humid Zones]. In: Geohimiya osadochnykh porod i rud [Geochemistry of sedimentary rocks and ores]. Moscow. P. 102–133. (In Russian).
- Syso A.I., Siromlya T.I. 2018. Khimicheskie elementy i ikh soedineniya v pochvakh i rasteniyakh nativnykh i antropogennykh ekosistem Sibiri [Chemical elements and their compounds in soils and plants of native and anthropogenic ecosystems of Siberia]. In: Biogeokhimiya khimicheskikh elementov i soedineniy v prirodnykh sredakh. Materialy III Mezhdunarodnoy shkoly-seminara molodykh issledovateley [Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments. Materials of the III International School-seminar of Young researchers]. Tyumen. P. 137–150. (In Russian).
- Zemcova E.S., Alimova G.S., Tokareva A.YU. 2019. Himiko-ekologicheskaya ocenka sostoyaniya donnykh otlozhenij reki Irtysh na territorii Tyumenskoj oblasti RF [Chemical-ecological assessment of the Irtysh River bottom sediments in the Tyumen region of the Russian Federation]. Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Murmansk State Technical University] 22 (1), 177–187. (In Russian).
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-177-187>