

УДК 57.044:546.74:546.76:556.531:627.157(476.2-21Гомель)

## Мониторинг содержания соединений никеля и хрома в донных отложениях водоемов города Гомеля и прилегающих территорий

Т.В. МАКАРЕНКО, О.В. ПЫРХ, А.В. ХАДАНОВИЧ, А.И. МАКАРЕНКО

Определены значения фоновых концентраций изучаемых металлов в донных отложениях водоемов, которые составили для никеля 2,99 мг/кг; для хрома – 4,63 мг/кг соответственно. За период исследований с 2010 по 2019 гг. в целом отмечено снижение содержания исследуемых металлов в отложениях в 1,2–4,9 раза для никеля и в 1,1–11,2 раза для хрома, что свидетельствовало о снижении антропогенной нагрузки на водные экосистемы. В период с 2019 по 2021 гг. единой динамики, отражающей снижение содержания соединений хрома в донных отложениях всех изучаемых водоемов, не установлено. Концентрация соединений никеля в донных отложениях снижается, за исключением водоемов с высокой антропогенной нагрузкой. По индексу геоаккумуляции элементов исследуемые водоемы и водотоки г. Гомеля и прилегающие территории следует отнести к 1 классу по степени загрязнения (незагрязненные до умеренно загрязненных).

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, водные экосистемы, загрязнение, токсичность, фоновые концентрации, никель, хром.

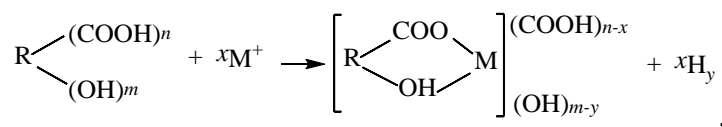
The values of background concentrations of the studied metals in the bottom sediments of the reservoirs were determined, which amounted to 2,99 mg/kg for nickel; for chromium – 4,63 mg/kg, respectively. During the period of the research from 2010 to 2019, in general, there was a decrease in the content of the studied metals in the sediments by 1,2–4,9 times for nickel and by 1,1–11,2 times for chromium, which indicated a decrease in the anthropogenic load on aquatic ecosystems. In the period from 2019 to 2021, no unified dynamics reflecting the decrease in the content of chromium compounds in the bottom sediments of all the studied reservoirs was established. The concentration of nickel compounds in the bottom sediments decreases, with the exception of the reservoirs with a high anthropogenic load. According to the geo-accumulation index of elements, the investigated reservoirs and streams of the city of Gomel and adjacent territories should be classified as class 1 by the degree of pollution (uncontaminated to moderately contaminated).

**Keywords:** heavy metals, water ecosystems, pollution, toxicity, background concentrations, nickel, chromium.

**Введение.** Тяжелые металлы являются наиболее распространенными загрязнителями водной среды. Они способны аккумулироваться различными компонентами водных экосистем, в частности донными отложениями, что обусловлено сорбцией, низкой растворимостью в воде большинства их химических форм, способностью вступать в реакции комплексобразования [1].

Донные отложения выступают в качестве факторов формирования гидрохимического режима водоема в целом, являются одним из индикаторов загрязнения водных экосистем соединениями тяжелых металлов. Часть загрязняющих веществ водоемов концентрируется в донных отложениях, оказывает токсическое действие на бентосные организмы и способна передаваться по трофическим цепям [2], [3]. В донных отложениях металлы представлены в различных состояниях: прочно связанные в кристаллических решетках минералов; адсорбированные на поверхности оксидов железа и марганца, глинистых минералов, органического материала; в кристаллической решетке вторичных минералов или аморфных оксидах и гидроксидов железа, марганца и др., аккумулируются поровыми и внутренними (грунтовыми) водами, карбонатами, сульфидами, силикатами и компонентами биоты [4].

Донные отложения являются природными сорбентами, одним из главных компонентов которых являются органические вещества [5]. В состав органической составляющей донных отложений входят остатки гуминовых кислот – высокомолекулярные органические вещества, которые способны сорбироваться минеральной фазой осадков и связывать металлы. Это является важнейшим фактором уменьшения мобильности тяжелых металлов [6]. Гуминовые вещества способны к образованию органометаллических комплексов, снижающих токсичность ряда металлов [7].



где М –  $Fe(OH)_2^+$ ,  $Fe(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$  или  $Al(OH)^{2+}$ .

Среди наиболее распространенных природных сорбентов, наряду с органическим веществом, следует выделить глины, оксиды и гидроксиды железа, марганца и алюминия. Общая последовательность, в которой располагаются природные сорбенты по их способности аккумулировать тяжелые металлы, такова: гидроксиды марганца > гуминовые кислоты > гидроксид железа (III) > глинистые минералы [8]. Ионы металлов способны непосредственно связываться с кристаллической решеткой глин. Сорбенты могут находиться в водоеме либо во взвешенном состоянии, осаждаясь при соответствующих условиях на дно, либо входить в состав донных отложений [9], [10]. Сорбция металлов взвешенными глинистыми частицами играет большую роль, чем поглощение осадками, представленными глинами [11]. Отмечается, что в донных отложениях наиболее токсичны и доступны для гидробионтов обменные формы тяжелых металлов и особенно та их часть, которая связана с органическим веществом и гидроксидами железа и марганца [12].

При определенных условиях донные отложения могут выступать в качестве потенциального источника вторичного загрязнения водной массы и носить локальный характер или охватывать весь водоем в зависимости от вызвавших его причин [13]. Это происходит под влиянием физико-химических факторов (снижение рН и окислительно-восстановительного потенциала Еh на границе раздела фаз «донные отложения – вода», дефицита растворенного кислорода в водной толще и в самих донных отложениях, наличия органических комплексообразующих веществ микробиологических процессов, протекающих в водоемах; деструкции органических веществ под действием бактериофлоры и др.) [14]. Следовательно, изучение вопросов, посвященных особенностям накопления тяжелых металлов донными отложениями, является актуальным.

**Цель:** изучение динамики содержания соединений никеля и хрома в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий, установление фоновых концентраций данных металлов для проведения эколого-химических исследований загрязнения водных экосистем.

**Объект, материалы и методы исследования.** Объект исследований – донные отложения, отобранные в водоемах и водотоках г. Гомеля и прилегающих территорий. При выборе водоемов руководствовались близостью физико-географических условий, при этом водоемы характеризовались существенным различием степени хозяйственного освоения и техногенной нагрузки. На территории города располагаются водоемы: Дедно, Шапор, Любенское, У-образное. В пригородной зоне отдыха находятся озера Володькино и Гребной канал. В качестве водоема, не испытывающего видимой антропогенной нагрузки, выбран старичный комплекс р. Сож, который находится в окрестностях д. Поляновка (Ветковский район, Гомельская область) и расположен на 15 км выше г. Гомеля по течению.

Отбор проб донных отложений и подготовку их к анализу проводили в соответствии с [15]. Определение количественного содержания никеля и хрома в отобранных образцах донных отложений проводили на базе Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии НАН Беларуси» на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой с пробоподготовкой образцов в системе микроволнового вскрытия.

За период исследований с 2010 по 2021 гг. содержание тяжелых металлов в донных отложениях изучаемых водоемов снизилось и для некоторых водоемов черты г. Гомеля концентрация изучаемых металлов оказалась ниже, чем в старичном комплексе р. Сож, который долгое время использовался как водоем сравнения. Это вызвало необходимость выбора новых фоновых концентраций изучаемых металлов в донных отложениях для проведения сравнительного анализа загрязнения водных экосистем изучаемой территории. Для установления фоновых концентраций тяжелых металлов в донных отложениях был использован статистический метод [16]. Согласно данному методу отдельно в каждом выделенном периоде (сезоне) исключаются непоказательные экстремальные значения концентрации, затем рассчитывают средние значения концентрации тяжелых металлов в исследуемых образцах. Период с наибольшей средней концентрацией вещества принимают в рассматриваемой версии за основную фоновую величину.

**Результаты и их обсуждение.** Проанализировав большой объем данных, предложено в качестве фоновой величины для соединений никеля в донных отложениях использовать концентрацию 2,99 мг/кг. Сравнительный анализ содержания никеля в донных отложениях водоемов в 2010 и 2019 гг. подтвердил снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы (рисунок 1).

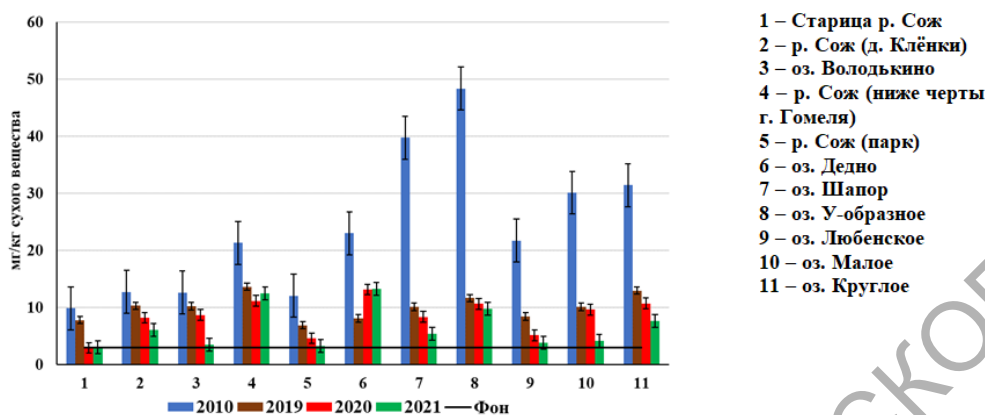


Рисунок 1 – Содержание соединений никеля в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Содержание металла в донных отложениях в течение периода исследований уменьшилось, в среднем – в 1,5 раза. Максимальное снижение содержания никеля отмечено для оз. У-образное, а незначительное – для отложений оз. Володькино и Старичного комплекса р. Сож. Можно предположить, что соединения никеля используются в производственных процессах на предприятиях г. Гомеля в меньших количествах, чем ранее, так как в период с 2019 по 2021 гг. количественное содержание металла в донных отложениях водоемов снизилось, за исключением водоемов с высокой антропогенной нагрузкой (р. Сож ниже черты г. Гомеля и оз. Дедно). В отложениях Старичного комплекса отмечено низкое содержание соединений никеля в период с 2010 по 2019 гг. Резкое снижение концентрации металла в 2020 г. по сравнению с 2019 г., вероятно, вызвано изменением форм нахождения никеля в донных отложениях и переходом его соединений в водную растительность, и обусловлено процессами самоочищения водных экосистем. Отмечено, что в донных отложениях Старичного комплекса р. Сож концентрация никеля 2020 г в два раза ниже, чем в 2019 г., при этом содержание металла в 2021 г. осталось на уровне 2020 г. При общем снижении содержания никеля в отложениях водоемов г. Гомеля такое поведение в компонентах отложений Старичного комплекса р. Сож требует более детального изучения. Концентрация никеля в донных отложениях, отобранных в оз. Дедно и на участке р. Сож ниже административной черты г. Гомеля в 2019 г., значительно ниже, чем в 2010 г., и сравнимы с величинами, полученными для образцов участка р. Сож выше черты города. Это указывает на снижение поступления никеля в вышеназванные водоемы. Оз. Дедно испытывало значительную антропогенную нагрузку, что отразилось на высоком содержании изучаемого тяжелого металла в отложениях водоема.

Установлено значительное снижение концентрации никеля в отложениях оз. Володькино и оз. Малое в 2021 г. по сравнению с таковыми, полученными в 2020 г., что, вероятно, связано с переходом металла в более доступную биологическую форму и извлечением его из донных отложений водной растительностью, которая в большом количестве произрастает в данных водоемах. В 2020 г. в оз. Малое по решению горисполкома Железнодорожного района г. Гомеля большая часть водной растительности была удалена для улучшения экологического состояния водоема, что сказалось на резком снижении содержания никеля в отложениях данного водоема. Объяснить снижение содержания изучаемого металла в отложениях оз. Володькино, расположенного выше черты г. Гомеля по течению, можно как снижением содержания никеля в газопылевых выбросах предприятий города, так и снижением поступления загрязнителей в водоем с водой р. Ипуть, впадающей в оз. Володькино. Незначительные изменения в сторону снижения концентрации металла отмечены в донных отложениях

оз. У-образное, что может являться как следствием недоступности его в отложениях, так и поступлением соединений никеля в водоем извне с поверхностным стоком. В донных отложениях р. Сож парковой зоны в период исследований с 2019 по 2021 гг. отмечено содержание никеля ниже фонового значения (2,99 мг/кг сухого вещества), что объясняется изменением структуры дна реки при реконструкции набережной. В донных отложениях оз. Дедно, участка р. Сож ниже административной черты города и оз. У-образное, отобранных в период с 2019 по 2021 гг., концентрация никеля превышала фоновые значения в 6,8, 4,3, 4,3 раза соответственно.

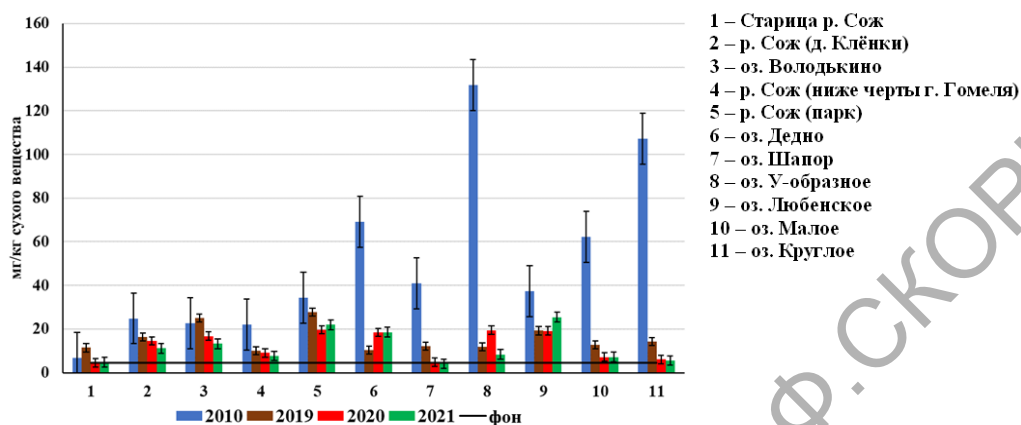


Рисунок 2 – Содержание соединений хрома в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

В процессе анализа большого объема фактического материала определено фоновое содержание соединений хрома в донных отложениях, которое составило 4,63 мг/кг (рисунок 2). Установлено, что концентрация хрома в донных отложениях изучаемых водоемов в 2019 г. ниже по сравнению с данными, полученными в 2010 г. Максимальное снижение характерно для оз. У-образное (в 11,2 раза), значительные изменения отмечены для таких водоемов как оз. Дедно (уменьшение в 6,7 раза) и оз. Круглое (уменьшение в 7,5 раза). Однако в чистых водных экосистемах, таких как Старичный комплекс и оз. Володькино, концентрация хрома в донных отложениях увеличилась. Для оз. Володькино увеличение не столь значительное (1,1 раза), для донных отложений Старицы р. Сож – 1,7 раза. В 2020 г. в отложениях Старичного комплекса содержание соединений хрома снизилось по сравнению с показателями 2019 г. в 2,5 раза, в 2021 г. содержание осталось на уровне 2020 г. В данный период осуществлялась очистка водоемов от водной растительности, что, вероятно, влечет за собой быстрое самоочищение водных экосистем, в частности, донных отложений и воды водоемов. В донных отложениях оз. Володькино содержание металла в 2020 г. снизилось в 1,5 раза, но дальнейшее изменение концентрации хрома в 2021 г. в сторону уменьшения не столь значительны. Минимальная концентрация соединений хрома 2019 г. характерно для р. Сож парковой зоны, что даже ниже величины, определенной для Старичного комплекса р. Сож. Отмечено, что в донных отложениях оз. У-образное концентрация металла в 2019 г. сопоставима с таковой в Старичном комплексе несмотря на то, что в 2010 г. водоем был самым загрязненным в отношении соединений хрома.

Максимумы содержания соединений металла отмечалось в течение периода исследований характерно для участка р. Сож ниже административной черты г. Гомеля, что обусловлено влиянием городской агломерации на водную экосистему реки. В 2020 г. содержание хрома в донных отложениях исследуемого участка снизилось, в 2021 г. концентрация металла увеличилась, но не достигла величины 2019 г. В оз. Дедно, которое испытывает значительную нагрузку, зафиксировано минимальное содержание соединений хрома, что свидетельствует о снижении антропогенной нагрузки на водную экосистему в период с 2010 по 2019 гг. В период исследований 2020–2021 гг. в водоеме концентрация металла увеличилась в 1,8 раза по сравнению со значением 2019 г., что, вероятно, обусловлено увеличением антропогенного воздействия на водоем.

Единой динамики, отражающей снижение содержания соединений хрома в донных отложениях всех изучаемых водоемов, не установлено. Для ряда водоемов содержание хрома снижается в 2020 г. и остается практически на таком же уровне 2021 г. Для других содержа-

ние ионов хрома в период с 2019 по 2020 гг. менялось незначительно, но в 2021 либо увеличилось, либо незначительно снижалось. Полученные данные не дают возможности предположить о значительном снижении антропогенного поступления хрома в окружающую среду. Участок р. Сож выше города по течению был более загрязненным на протяжении 2019–2021 гг., по сравнению с участком р. Сож парковой зоны. Вероятно, поверхностный сток с огородов дачных участков и частного сектора содержит достаточное количество соединений хрома, которое может влиять на загрязнение водной экосистемы р. Сож выше г. Гомеля по течению. Накоплению металлов на участке реки в парковой зоне препятствует быстрое течение и малое количество органических веществ, а также проведенная реконструкция дна. В 2020 г. минимальное содержание соединений хрома отмечено в Старичном комплексе, и практически такая же величина характерна для водоема городской черты – оз. Шапор, где снижение концентрации в сравнении с 2019 г. составило 2,6 раза. В 2021 г. содержание металла в отложениях оз. Шапор минимально за весь период исследований. В отложениях оз. У-образное отмечался немонотонный характер варьирования содержания изучаемого металла: в 2020 г. его концентрация в исследуемом объекте увеличилась в 1,6 раза по сравнению с 2019 г.; в 2021 г. отмечено снижение в 2,3 раза по сравнению с показателями 2020 г. Дать объяснение данному факту довольно сложно, так как антропогенная нагрузка на водоем практически не изменилась. Высокое содержание металла на протяжении всего периода исследований определено в донных отложениях оз. Любенское. Максимальная концентрация металла зафиксирована в 2021 г., хотя предполагалось, что в водоеме будет происходить снижение содержания хрома, в отложениях с учетом того факта, что в данной водной экосистеме была изменена структура дна при реконструкции озера. Данный факт требует более детального изучения. В оз. Малое концентрация хрома в 2020 г. снизилась в 1,8 раза по сравнению с 2019 г., но в 2021 г. осталась практически неизменной, несмотря на то, что из водоема практически полностью удалили водную растительность. Вероятно, соединения хрома характеризуются малой доступностью для водной растительности в отложениях водоема, при этом не исключается поступление соединений хрома извне. В донных отложениях практически всех изучаемых водоемов содержание соединений хрома превышало фоновую величину. В 2019 г. максимальное превышение фоновой концентрации металла – 32,0 раза – отмечено для донных отложений оз. У-образное. Для отложений оз. Круглое превышение фона составило 22,8 раза. Незначительное превышение фоновых концентраций элемента в изучаемом объекте характерно для участка р. Сож парковой зоны (1,9 раза). В 2020 г. зафиксировано превышение фоновых концентраций хрома в 19,3 раза в донных отложениях оз. Дедно. В оз. У-образное фоновая величина концентраций хрома превышена в 12,6 раза, незначительное увеличение характерно для реки парковой зоны. В 2021 г. отмечена аналогичная тенденция – превышение фона характерно для донных отложений оз. Дедно, минимальное – для участка р. Сож выше города по течению и для отложений оз. Малое.

При анализе степени загрязнения донных отложений водных экосистем следует учитывать геохимические особенности изучаемого региона, так как строение материнских пород, формирующих отложения водоемов данного региона, оказывает значительное влияние как на содержание, так и на накопление металлов в экосистемах. С целью определения степени загрязнения донных отложений изучаемыми металлами рассчитаны индексы геоаккумуляции по формуле [17]:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1,5B_n} \right).$$

Рассчитанные значения индексов геоаккумуляции элементов находятся в интервале 0–1. Это означает, что изучаемые водные экосистемы следует отнести к классу 1 (незагрязненные до умеренно загрязненных).

**Заключение.** С учетом снижения содержания тяжелых металлов в донных отложениях изучаемых водных экосистем установлены новые фоновые концентрации для соединений никеля – 2,99 мг/кг, для соединений хрома – 4,63 мг/кг. За период исследований с 2010 по 2019 гг. в целом отмечено снижение содержания исследуемых металлов в отложениях в 1,2–4,9 раза для никеля и в 1,1–11,2 раза для хрома, что свидетельствовало о снижении антропогенной нагрузки на водные экосистемы. В период с 2019 по 2021 гг. единой динамики, отражающей снижение содержания соединений хрома в донных отложениях всех изучаемых водоемов, не установлено. Концентрация соединений никеля в донных отложениях снижается, за исключением водоемов с

высокой антропогенной нагрузкой (р. Сож ниже черты города и оз. Дедно). За весь период исследований только в 2021 г. в донных отложениях водоемов концентрация соединений никеля и хрома была либо ниже, либо равна фоновой величине. Высокий уровень загрязнения донных отложений соединениями никеля характерен для участка р. Сож ниже городской черты, озер Уобразное и Круглое. Значительное содержание соединений хрома наблюдалось на участках р. Сож выше г. Гомеля по течению (д. Кленки), в парковой зоне р. Сож, в озерах Володькино и Любенское. Исследуемые водоемы и водотоки г. Гомеля и прилегающих территорий по рассчитанным значениям индексов геоаккумуляции никеля и хрома по степени загрязнения следует отнести к 1 классу (незагрязненные до умеренно загрязненных).

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда».

### Литература

1. Линник, П. Н. Комплексообразование ионов металлов в природных водах / П. Н. Линник, Б. И. Набиванец // Гидробиол. журнал. – 1983. – Т. 19, № 3. – С. 82–95.
2. Даувальтер, В. А. Оценка токсичности металлов, накопленных в донных отложениях озер / В. А. Даувальтер // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 4. – С. 469–476.
3. Тяжелые металлы в донных отложениях Ивановского водохранилища / В. Ф. Бреховских [и др.] // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 3. – С. 310–319.
4. Мунтяну, Г. Г. Влияние Резинско-Рыбницкого промышленного комплекса на содержание ртути (II), меди (II), свинца (II), кадмия (II) в Дубоссарском водохранилище реки Днестр / Г. Г. Мунтяну, В. И. Мунтяну // Гидробиол. журнал. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 80–96.
5. Тяжелые металлы в донных отложениях Верхней и Нижней Волги / В. Ф. Бреховских [и др.] // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29, № 5. – С. 587–595.
6. Hart, V. T. Uptake of trace metals by sediments and suspended particulates: a review / V. T. Hart // Hydrobiologia. – 1982. – № 91. – P. 299–313.
7. Орлов, Д. С. Химия почв : учебник / Д. С. Орлов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 376 с.
8. Гарновский, А. А. Геохимия донных отложений современных озер / А. А. Гарновский. – Л., 1980. – 172 с.
9. Даувальтер, В. А. Концентрации металлов в донных отложениях закисленных озер / В. А. Даувальтер // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25, № 3. – С. 358–365.
10. Новиков, Б. И. Донные отложения днепровских водохранилищ / Б. И. Новиков. – Киев, 1985. – 172 с.
11. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды / А. И. Денисова [и др.] ; под общ. ред. А. И. Денисовой – Киев : Наук. Думка, 1987. – 164 с.
12. Белоконь, В. Н. Формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Днепра. II. Кадмий, свинец / В. Н. Белоконь, Е. П. Нахшина // Гидробиол. журнал. – 1990. – Т. 26, № 2. – С. 83–89.
13. Тяжелые металлы в донных отложениях Ивановского водохранилища / В. Ф. Бреховских [и др.] // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 3. – С. 310–319.
14. Кондратьева, Л. М. Вторичное загрязнение водных экосистем / Л. М. Кондратьева // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 2. – С. 221–231.
15. Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический (лабораторный) контроль и мониторинг окружающей среды. Порядок проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Аналітычны (лабараторны) кантроль і маніторынг навакольнага асяроддзя. Парадак правядзення назіранняў за ўтрыманнем забруджвальных рэчываў у донных асадках : ТКП 17.13–22–2018 (33140). – Введ. 01.07.2018. – Минск : ГУ «Республиканский центр аналитического контроля в области охраны окружающей среды», 2018. – 31 с.
16. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила установления фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Гідрасфера. Правілы ўстанаўлення фонавых канцэнтрацый хімічных рэчываў у вадзе водных аб'ектаў : ТКП 17.06–04–2012 (02120). – Введ. 17.06.2012. – Минск : БелГИСС: Госстандарт, 2012. – 23 с.
17. Лукашев, О. В. Временная и межвидовая изменчивости содержания металлов в компонентах водных объектов г. Гомеля / О. В. Лукашев, Н. В. Жуковская, Т. В. Макаренко // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : матер. III Междунар. науч. конф., Минск, 15 дек. 2021 г / БГУ ; редкол.: О. В. Лукашев (гл. ред.). – Минск, 2021. – С. 227–237.