



УДК [556.535.8:549.2](282.247.13.05)

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ МЕТОДОМ РАСЧЁТА ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni)

© 2021 г. Н. В. Неверова, А. В. Чупаков

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия
E-mail: nevnata@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021; после доработки 01.06.2021;
принята к публикации 29.09.2021; опубликована онлайн 30.11.2021.

Данная публикация является продолжением работ по количественной оценке уровня загрязнения тяжёлыми металлами (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni) компонентов экосистемы устьевой области реки Северной Двины. Для оценки уровней загрязнения указанными металлами экосистемы устьевой области Северной Двины в районе наибольшего антропогенного воздействия (район городской агломерации Новодвинск — Архангельск — Северодвинск) мы используем метод сравнительного анализа объекта исследования с условно-фоновым участком, приняв за него участок реки, расположенный выше городской застройки. С применением пространственного картирования значений коэффициентов обогащения для компонентов водной экосистемы были выделены районы с аномальным превышением содержания металлов в тканях моллюсков, донных отложениях и придонном слое воды. Установлено, что наибольшей антропогенной нагрузке в акватории вершины дельты реки подвержен район, примыкающий к центральной части города и к промышленной зоне на левом берегу. Наиболее вероятными источниками загрязнения рассмотренными тяжёлыми металлами можно назвать попадание поверхностных сточных вод (талые и дождевые ливневые стоки), неочищенные коммунально-бытовые стоки и прямой ближний атмосферный перенос. Анализ тканей моллюсков проявил себя как более информативный и показательный подход к оценке загрязнения тяжёлыми металлами акватории со сложными гидрологическими и гидрохимическими градиентами среды, чем анализ придонного слоя воды и донных отложений.

Ключевые слова: устьевая область реки Северной Двины, фоновые содержания, тяжёлые металлы, коэффициент обогащения, двустворчатые моллюски

Реки, дренируя огромные территории водосбора, являются основным источником поступления с суши в море растворённых и взвешенных веществ, в том числе органического вещества, микроэлементов и биогенных веществ. Основная масса веществ, поступивших с водосбора, оседает в устьевых областях рек, в зоне смешения пресных и солёных вод, а значит, устьевые области рек — объекты, информация о состоянии которых может применяться для характеристики как морской среды, так и территории водосбора (Котова и др., 2020). Кроме того, именно в устьях рек сосредоточена основная часть приморских городов и производств, поскольку там есть необходимость в постоянном источнике пресной воды. Проведённые работы по оценке содержания тяжёлых металлов в компонентах экосистемы устьевой области реки Северной Двины (Неверова и др., 2014, 2016) с учётом предельно допустимых концентраций (далее — ПДК) выявили необходимость применения подхода с расчётом условно-фоновых концентраций, характерных

для района исследований. Также были обнаружены мозаичность и высокая изменчивость содержания металлов в абиотических и биотических компонентах водной экосистемы устья Северной Двины. Наибольшие значения концентраций тяжёлых металлов в воде, донных отложениях и тканях гидробионтов наблюдали (без каких-либо закономерностей) на локальных участках и для отдельных металлов.

На первом этапе работы (Неверова и др., 2014) для количественной оценки содержания тяжёлых металлов в придонной воде, донных отложениях и тканях макробентосных организмов дельты Северной Двины мы сравнивали получаемые результаты с общепринятыми государственными нормативами — ПДК. При данном подходе концентрации всех металлов на всей исследуемой территории превышали норматив. Результаты наблюдений Северного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Обзоры загрязнения окружающей среды, 2021) также ежегодно показывают повышенные концентрации (до 2–6 ПДК) марганца, железа, цинка и меди. В различных документах природоохранных организаций такие превышения связывают с последствиями хозяйственной деятельности, однако в устьевой области р. Северной Двины нет предприятий с высоким содержанием тяжёлых металлов в технологических процессах. Этот факт демонстрирует то, что существующие государственные нормативы (ПДК) не могут быть едиными для всех типов водных экосистем и разных климатогеографических и геохимических условий. На сегодняшний день большинство исследователей, занимающихся этой проблемой (Веницианов и др., 2015 ; Возняк и Лепихин, 2018 ; Хоруджая, 2002), сходятся во мнении, что распространять на все регионы единые нормы ПДК недопустимо и что необходимо нормирование техногенных воздействий на экосистемы исходя из региональных геохимических особенностей. К тому же и сами ПДК не установлены для подавляющего большинства компонентов водных экосистем, как в случае с донными отложениями и тканями донных животных.

При отсутствии ПДК для оценки уровня загрязнённости компонентов экосистем обычно применяют различные варианты сравнения полученных концентраций тяжёлых металлов с их естественным содержанием в экосистеме (фоновые значения). В качестве фоновых могут выступать значения показателя, установленные для территории, которая не испытывает прямого антропогенного пресса. Однако в настоящее время практически все виды водных экосистем подвержены влиянию деятельности человека (например, в результате дальнего атмосферного переноса или сельскохозяйственных работ в глубине водосборных площадей), то есть мы можем говорить лишь об условно-фоновых значениях. В данной работе за условно-фоновый участок акватории реки мы приняли район, расположенный выше территории наибольшей антропогенной нагрузки (выше района городской агломерации Новодвинск — Архангельск — Северодвинск). Для оценки фоновых значений концентраций исследуемых тяжёлых металлов в воде, донных отложениях и тканях моллюсков мы используем медиану и медианное абсолютное отклонение (*mean absolute deviation, MAD*), полученные для выборки точек наблюдений в условно-фоновом районе. Этот метод признан наиболее чувствительным для расчёта фоновых уровней содержания металлов при анализе загрязнения компонентов окружающей среды (Лукашев, 2007 ; Reimann et al., 2005).

Цель работы — количественно оценить уровень загрязнения тяжёлыми металлами участка р. Северной Двины в районе наибольшей антропогенной нагрузки на неё с использованием метода сравнительного анализа с условно-фоновыми значениями, рассчитав средние концентрации металлов в тканях гидробионтов и в среде их обитания методами непараметрической статистики; по картине пространственного распределения коэффициентов обогащения сделать вывод об основных источниках загрязнения на изучаемом нами участке р. Северной Двины (хозяйственно-бытовые сточные воды Архангельска и Новодвинска, промышленные предприятия этих городов и др.).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Река Северная Двина и её притоки, расположенные в северной части Русской равнины, относятся к бассейну Белого моря. В бассейне Северной Двины сосредоточена основная часть промышленного потенциала региона. Устьевую часть реки возможно отнести к числу наиболее промышленно и транспортно освоенных территорий на севере Российской Федерации; она испытывает значительную антропогенную нагрузку. Устьевая область Северной Двины включает обширный участок нижнего течения реки от впадения Пинеги до морского края дельты и юго-восточную часть Двинского залива Белого моря (рис. 1). «Верхняя граница устьевой области проходит у устья р. Пинеги, где уже не отмечаются приливные колебания уровня. Морская граница проходит по свалу глубин в Двинском заливе, примерно по восьмиметровой изобате. Входящий в устьевую область участок реки имеет протяжённость по судоходному фарватеру 135 км» (Гидрология устьевой области Северной Двины, 1965).

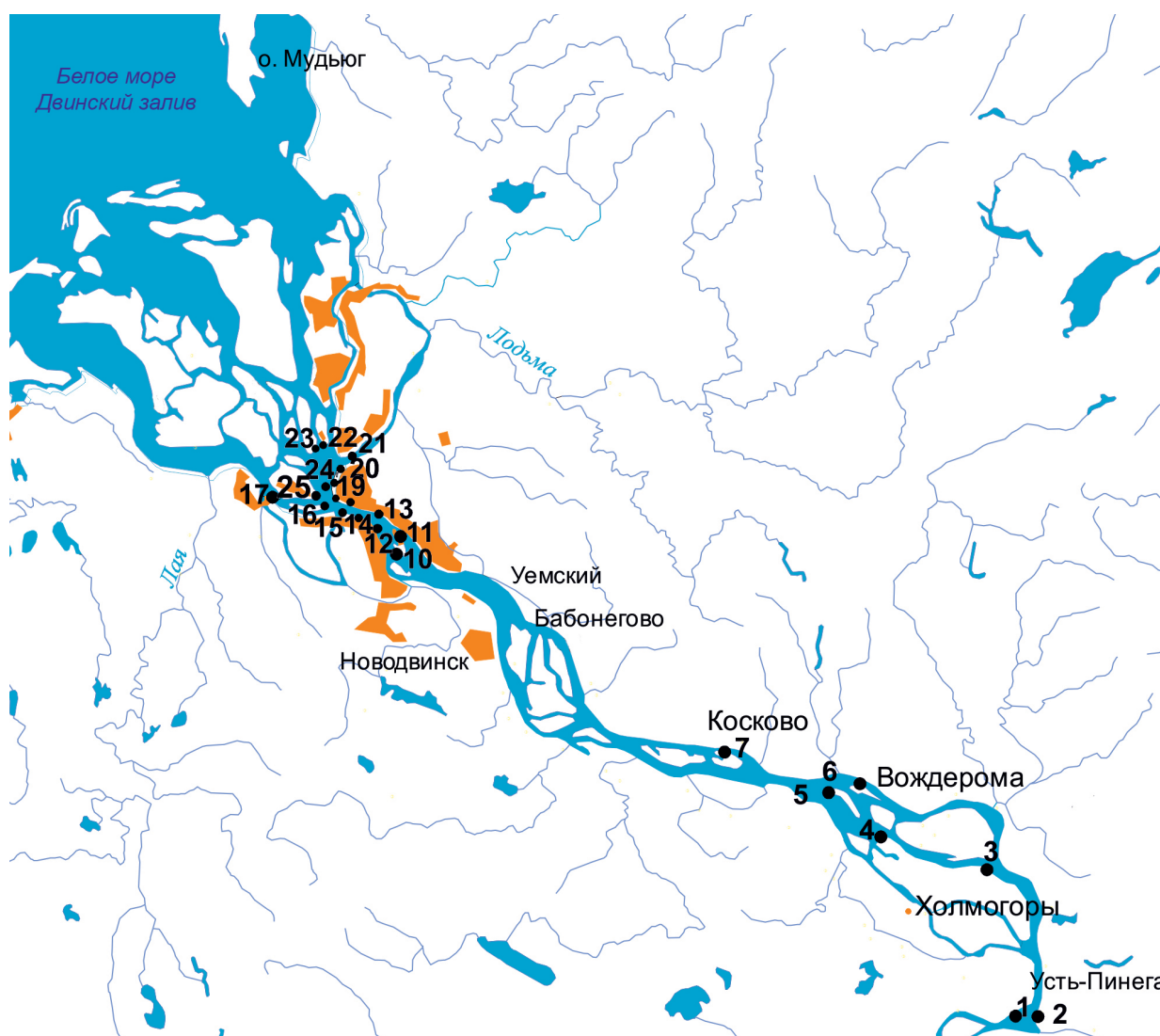


Рис. 1. Карта-схема устьевой области реки Северной Двины с точками отбора проб придонного слоя воды, донных отложений и двустворчатых моллюсков (т. 1–7 — фоновый участок; т. 10–25 — г. Архангельск)

Fig. 1. Schematic map of the estuarine area of the Northern Dvina River with sampling points of bottom water layer, bottom sediments, and bivalves (points 1–7, the background plot; points 10–25, Arkhangelsk)

На берегу Северной Двины примерно в 50 км от места впадения в Белое море находится Архангельск, городские кварталы протянулись почти на 40 км по правому берегу реки. На левом берегу, в черте г. Архангельска, расположены многочисленные промышленные площадки и малоэтажные жилые кварталы преимущественно деревянной застройки, которые тянутся вплоть до г. Новодвинска.

Чтобы провести сравнительный анализ содержания тяжёлых металлов, за фоновый мы приняли участок реки от деревни Косково до верхней границы приустьевой части (пос. Усть-Пинега) (см. рис. 1, точки отбора 1–7). Двустворчатых моллюсков отбирали из мест их обитания одновременно с донными отложениями и водой в устьевой области Северной Двины в конце июля — августе в 2009–2018 гг. Моллюсков отбирали стандартными методами ([Руководство по методам, 1983](#)) вручную, используя гидрологический сачок либо (на глубинах более 1,5 м) водолазное оборудование. Для проведения анализа из отобранной пробы выбирали моллюсков одного возраста и размера и помещали в сосуды с водой для очистки кишечника; после этой процедуры мягкие ткани извлекали из раковины и подвергали минерализации концентрированной азотной кислотой при нагревании. Полностью методика подготовки биологических образцов к анализу изложена в ГОСТ 26929-94 ([2010](#)).

Доминирующими, в зависимости от биотопа, видами донных организмов на изучаемом участке реки являются: для твёрдых субстратов — двухстворчатые моллюски *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771); для заиленных песков — *Anodonta anatina* (Linnaeus, 1758), *Unio pictorum* (Linnaeus, 1758) и *Pisidium* sp.; для ила — малощетинковые черви (Oligochaeta) и представители насекомых Ghironomidae. Для определения вида двухстворчатых моллюсков проводили молекулярно-генетический анализ по методике ([Bolotov et al., 2015](#)). Он показал, что в качестве объектов для исследования накопления тяжёлых металлов в тканях были отобраны наиболее типичные для нашего региона представители крупных двустворок: *Anodonta anatina* (далее — беззубка) и *Unio pictorum* (далее — перловица). Для двухстворчатых моллюсков рода *Dreissena* генетический анализ не проводили, так как, согласно ([Махнович, 2016](#)), дрейссены Северной Двины относятся к виду *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771). Проведённый ранее анализ ([Неверова и др., 2014, 2016](#)) выявил, что максимальное количество металлов накапливают представители малощетинковых червей — олигохеты, однако из-за технических трудностей при их отборе (прежде всего из-за их малых размеров) более удобным объектом исследования накопления тяжёлых металлов являются крупные двухстворчатые моллюски.

Пробы придонного слоя воды отбирали по ГОСТ Р 51592-2000 ([2008](#)), фиксировали азотной кислотой и при поступлении в лабораторию подвергали минерализации при нагревании для анализа по ПНД Ф 14.1:2.214-06 ([2006](#)). Пробы донных отложений после предварительного высушивания до воздушно-сухого состояния подвергали экстракции на водяной бане с раствором 5 М азотной кислоты по РД 52.18.191-89 ([Методика выполнения измерений, 1990](#)). Все полученные растворы (экстрагированные ткани и донные отложения, вода) анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре povAA 315 (Analytik Jena AG); в них определяли валовое содержание таких металлов, как Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb и Ni. Анализ проводили в центре коллективного пользования научным оборудованием «Критические технологии РФ в области экологической безопасности Арктики» в ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск).

Все полученные эмпирические данные предварительно оценили на соответствие закону нормального распределения, используя критерий Шапиро — Уилка ([Субботина и Гржибовский, 2014](#)). Он показал, что распределение большинства полученных нами данных по концентрации металлов в тканях моллюсков, придонной воде и донных отложениях отличается от нормального, поэтому для оценки среднего показателя содержания тяжёлых металлов в тканях моллюсков

и среде их обитания на фоновом участке мы пользовались критериями непараметрической статистики — медианой и MAD , определяемым как медиана абсолютных отклонений от медианы всех данных (Лукашев, 2007 ; Reimann et al., 2005 ; Tukey, 2008). Фоновые значения при этом рассчитывали по формуле:

$$C_f = Me_f \pm 2MAD, \quad (1)$$

где C_f — фоновое значение исследуемого показателя;

Me_f — значение медианы выборки измеренных значений (X_f) для фоновой точки;

MAD — медиана выборки абсолютных значений разностей измеренного значения X_f и медианы выборки измеренных значений фоновой точки ($|X_f - Me_f|$).

Для количественной оценки загрязнённости отдельных районов русла реки сравнивали содержание металла в отдельной точке со значением верхнего предела фоновой концентрации, используя их соотношение — коэффициент обогащения:

$$X_i / (Me_f + 2MAD), \quad (2)$$

где X_i — измеренное значение концентрации в i -й точке наблюдений.

Если отношение полученной нами концентрации металла в точке отбора к величине верхнего предела фоновой концентрации ≤ 1 , концентрацию металла в этой точке будем считать в пределах колебания фона; если > 1 , концентрацию будем считать повышенной.

В рамках статистического анализа для проверки однородности выборок концентраций тяжёлых металлов, полученных для фоновой точки и для участка, который испытывает явное прямое антропогенное воздействие, был проведён анализ с применением непараметрического U -критерия Манна — Уитни.

Для оценки пространственного распределения коэффициентов обогащения компонентов экосистемы тяжёлыми металлами по данным, полученным в точках наблюдений, мы использовали карты-схемы изолиний. Построение проводили в программном пакете Surfer, сетку данных создавали методом радиальной базисной функции. Ввиду того что метод не является методом точной интерполяции, пределы максимального и минимального значений мы задавали вручную.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Придонный слой воды. В результате обработки данных с использованием критериев непараметрической статистики (медианы и MAD) были получены следующие концентрации тяжёлых металлов в придонном слое воды для фоновой точки реки (точки 1–7): Ni — $(0,005 \pm 0,003)$ мг·дм⁻³; Cd — $(0,0038 \pm 0,0026)$ мг·дм⁻³; Zn — $(0,015 \pm 0,011)$ мг·дм⁻³; Cu — $(0,006 \pm 0,001)$ мг·дм⁻³; Mn — $(0,087 \pm 0,023)$ мг·дм⁻³; Fe — $(0,420 \pm 0,060)$ мг·дм⁻³. Содержание свинца было меньше предела обнаружения. При проверке гипотезы о принадлежности двух сравниваемых выборок (для фоновой точки и для участка реки в районе городской черты) к одной и той же генеральной совокупности с помощью U -критерия Манна — Уитни мы получили статистически значимые различия при $p \leq 0,05$ только для концентрации никеля.

Донные отложения. Показатели фоновой концентрации для верхнего слоя донных отложений имели следующие значения (точки 1–7): Ni — $(3,64 \pm 1,10)$ мг·кг⁻¹; Pb — $(1,02 \pm 0,68)$ мг·кг⁻¹; Cd — $(0,14 \pm 0,05)$ мг·кг⁻¹; Zn — $(9,91 \pm 6,44)$ мг·кг⁻¹; Cu — $(4,65 \pm 6,94)$ мг·кг⁻¹; Mn — $(86,85 \pm 43,30)$ мг·кг⁻¹; Fe — $(422,53 \pm 298,60)$ мг·кг⁻¹. Проверка гипотезы о принадлежности двух сравниваемых выборок к одной и той же генеральной совокупности показала статистически значимые различия при $p \leq 0,05$ для содержания в донных отложениях кадмия и свинца для участков выше и ниже городской черты. При этом медиана концентрации кадмия на участке точек 1–7 (см. рис. 1) была выше, чем на участке реки, примыкающем к городским кварталам.

Мы связываем такой результат с отмеченным повышенным содержанием кадмия в почвах на водосборе Северной Двины в фоновом районе (Зимовец и Федоров, 2013) и с поведением Cd на химическом барьере смешения рек Пинеги и Северной Двины, при котором кадмий может вытесняться из соединений с органическими лигандами и осаждаться в донных отложениях в виде малорастворимого гидроксида (Дину и Шкинев, 2020).

Двустворчатые моллюски. Для оценки различий в накоплении тяжёлых металлов в тканях двух видов двустворок мы воспользовались тестом Манна — Уитни для всей совокупности образцов, отобранных на приустьевом участке реки. Этот тест не выявил отличий в процессах накопления тяжёлых металлов в тканях перловицы и беззубки при $p \leq 0,05$ для всех исследуемых металлов. Дополнительно к рассмотрению основной пары видов — *Anodonta* и *Unio* — было проведено попарное сравнение выборок с ещё одним видом двустворок — *Dreissena polymorpha*. Оно показало для этого вида отличие в накоплении всех металлов. Однако в данной работе мы не используем этот перспективный для экотоксикологических исследований вид, поскольку не было получено достаточно натурного материала на изучаемом участке Северной Двины. В связи с неблагоприятным воздействием абиотических факторов на моллюсков этого вида (отсутствие субстратов для прикрепления, высокие скорости течений, достаточно низкие летние температуры воды и т. п.) (Махнович, 2016), плотности поселений дрейссены не дают достаточно материала для мониторинга. Возможно, подобная работа на основе анализа *Dreissena polymorpha* будет выполнена нами в дальнейшем.

Для выборок моллюска перловицы для участков выше и ниже городской черты тест не выявил достоверных отличий при $p \leq 0,05$ для всех изучаемых металлов. Для беззубки статистически достоверные различия при $p \leq 0,05$ зарегистрированы для цинка, меди и никеля. Для перловицы фоновые показатели, рассчитанные по формуле (1), имели следующие значения: Ni — $(0,13 \pm 0,04)$ мг·кг⁻¹; Pb — $(0,10 \pm 0,09)$ мг·кг⁻¹; Cd — $(0,09 \pm 0,03)$ мг·кг⁻¹; Zn — $(18,46 \pm 8,93)$ мг·кг⁻¹; Cu — $(1,01 \pm 0,33)$ мг·кг⁻¹; Mn — $(308,91 \pm 128,21)$ мг·кг⁻¹; Fe — $(91,38 \pm 93,93)$ мг·кг⁻¹. Для беззубки значения составили: Ni — $(0,06 \pm 0,08)$ мг·кг⁻¹; Pb — $(0,12 \pm 0,01)$ мг·кг⁻¹; Cd — $(0,06 \pm 0,03)$ мг·кг⁻¹; Zn — $(11,61 \pm 5,37)$ мг·кг⁻¹; Cu — $(0,59 \pm 0,11)$ мг·кг⁻¹; Mn — $(252,33 \pm 182,83)$ мг·кг⁻¹; Fe — $(86,06 \pm 86,06)$ мг·кг⁻¹. Подробнее сведения по фоновому содержанию тяжёлых металлов в двустворках устьевой области р. Северной Двины ранее изложены нами в (Неверова и Чупаков, 2018).

Таким образом, сравнительный анализ выборок концентраций металлов для фонового участка реки (Ф) и района городской черты (Г) с помощью критерия Манна — Уитни выявил ряд различий между ними. Установлены следующие достоверные соотношения: придонный слой воды — $\Phi(\text{Ni}) < \Gamma(\text{Ni})$; донные отложения — $\Phi(\text{Pb}) < \Gamma(\text{Pb})$ и $\Phi(\text{Cd}) > \Gamma(\text{Cd})$; *Anodonta* — $\Phi(\text{Ni}) < \Gamma(\text{Ni})$, $\Phi(\text{Zn}) < \Gamma(\text{Zn})$ и $\Phi(\text{Cu}) < \Gamma(\text{Cu})$. Эти результаты характеризуют влияние хозяйственно-бытовой деятельности на содержание Ni, Pb, Zn и Cu в компонентах экосистемы приустьевого участка реки. Однако, анализируя полученные данные, мы отмечаем высокую мозаичность концентрации металлов по акватории реки (Неверова и др., 2014, 2016), что говорит о существенной роли локальных особенностей района отбора образцов (наличие локального источника загрязнения, наличие мест с другими гидродинамическими характеристиками вод и иным гранулометрическим составом донных отложений, а также многие другие локальные факторы, вплоть до преобладающих видов макрофитов). Именно поэтому, наряду с «классической» схемой анализа полученных результатов (сравнение выборок), для количественной оценки различий в содержании металлов в тканях моллюсков между условно-фоновым участком и участком реки, расположенным в акватории г. Архангельска, мы провели сравнение содержания металла в отдельной точке со значением верхнего предела фоновой концентрации (формула (2), табл. 1).

Таблица 1. Значения коэффициента обогащения $X_i / (Me_f + 2MAD)$ в объектах исследования**Table 1.** Values of $X_i / (Me_f + 2MAD)$ enrichment factor in the study objects

№ точки отбора	Объект	Ni	Pb	Cd	Zn	Cu	Mn	Fe
10	Придонная вода	0,56	–	0,25	1,00	1,07	0,27	0,41
	Донные отложения	0,81	0,65	0,47	0,46	0,20	0,39	1,37
	<i>Anodonta</i>	–	–	–	–	–	–	–
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
11	Придонная вода	0,78	–	0,26	0,67	1,21	0,36	0,45
	Донные отложения	1,24	1,05	0,37	0,79	0,61	1,13	1,90
	<i>Anodonta</i>	0,95	1,12	0,77	0,96	0,97	0,88	0,4
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
12	Придонная вода	1,05	–	0,65	0,38	0,52	0,21	0,16
	Донные отложения	0,74	0,05	0,03	0,29	0,31	0,35	0,33
	<i>Anodonta</i>	0,8	0,41	1,08	0,87	1,21	0,16	0,19
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
13	Придонная вода	3,44	–	0,45	2,00	0,52	0,23	0,23
	Донные отложения	0,60	0,40	0,07	0,32	0,29	0,41	0,33
	<i>Anodonta</i>	–	–	–	–	–	–	–
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
14	Придонная вода	1,00	–	–	0,39	0,50	0,37	0,42
	Донные отложения	1,27	0,47	0,08	0,51	0,28	0,76	0,31
	<i>Anodonta</i>	0,6	–	1,58	1,37	1,63	0,44	0,71
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
15	Придонная вода	2,13	–	–	0,95	0,52	0,29	0,33
	Донные отложения	1,45	0,54	0,14	0,63	0,31	0,93	0,36
	<i>Anodonta</i>	–	–	–	–	–	–	–
	<i>Unio</i>	0,22	0,07	0,96	0,34	0,8	0,44	1,18
16	Придонная вода	–	–	0,43	0,50	0,36	0,42	0,67
	Донные отложения	3,12	2,03	0,63	1,48	3,44	2,01	1,71
	<i>Anodonta</i>	1,46	1,06	0,95	1,38	1,56	0,92	1,79
	<i>Unio</i>	–	–	1,84	1,53	0,08	0,13	0,53
17	Придонная вода	0,56	–	0,32	1,23	0,36	0,17	0,24
	Донные отложения	1,16	0,14	0,56	0,52	0,36	0,48	0,38
	<i>Anodonta</i>	–	–	–	–	–	–	–
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
18	Придонная вода	0,56	–	0,02	0,67	0,71	0,49	0,62
	Донные отложения	0,94	0,90	0,14	0,84	0,26	0,28	0,32
	<i>Anodonta</i>	2,07	–	54,15	1,05	1,44	0,42	1,31
	<i>Unio</i>	0,31	0,16	0,73	0,59	0,55	0,22	0,54
19	Придонная вода	1,34	–	0,04	1,70	0,50	0,47	0,22
	Донные отложения	0,83	6,42	0,04	0,39	0,27	0,49	0,33
	<i>Anodonta</i>	0,91	0,58	0,69	1,72	1,08	0,92	0,83
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
20	Придонная вода	1,89	–	0,08	0,90	0,50	0,25	0,13
	Донные отложения	0,83	0,28	0,10	0,31	0,25	0,75	0,34
	<i>Anodonta</i>	0,8	0,12	0,83	1,15	0,99	0,4	0,61
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
21	Придонная вода	0,11	–	0,11	1,00	0,50	0,31	0,54
	Донные отложения	0,54	0,38	0,33	0,26	0,31	0,36	0,96
	<i>Anodonta</i>	1,09	1,55	0,85	1,15	1,27	0,44	0,96
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение на следующей странице...

№ точки отбора	Объект	Ni	Pb	Cd	Zn	Cu	Mn	Fe
22	Придонная вода	0,44	–	0,16	0,10	0,71	0,09	0,23
	Донные отложения	2,77	1,25	0,63	1,45	1,08	1,47	0,66
	<i>Anodonta</i>	0,56	0,42	0,68	0,48	0,71	0,45	0,14
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
23	Придонная вода	0,67	–	–	0,47	0,52	0,33	0,50
	Донные отложения	0,83	0,13	0,05	0,31	0,21	0,28	0,36
	<i>Anodonta</i>	2,02	–	1,19	1,07	1,41	0,15	0,52
	<i>Unio</i>	–	–	–	–	–	–	–
24	Придонная вода	1,91	–	–	0,41	0,51	0,15	0,13
	Донные отложения	0,58	0,17	0,09	0,20	0,20	0,44	0,30
	<i>Anodonta</i>	0,53	–	2,29	1,62	0,67	0,45	0,35
	<i>Unio</i>	0,4	1,09	0,61	0,26	0,20	0,16	0,17
25	Придонная вода	–	–	0,18	1,00	0,71	1,34	1,41
	Донные отложения	0,95	0,38	0,12	0,68	0,33	0,44	2,37
	<i>Anodonta</i>	–	–	–	–	–	–	–
	<i>Unio</i>	0,60	0,62	0,69	0,77	0,66	0,58	0,98

Примечание: прочерк (–) означает, что моллюски не обнаружены или концентрации металлов ниже предела обнаружения; жирным шрифтом выделены значения, соответствующие превышению фонового уровня.

Notes: a dash (–) denotes either no molluscs found or metal concentrations being below the detection limit; in bold, the values corresponding to excess of the calculated background level are highlighted.

Визуализируя полученные результаты (см. табл. 1), мы построили карты-схемы наличия загрязнения в акватории реки тяжёлыми металлами (рис. 2–5). Проведённый тест Манна — Уитни не показал различий в процессах накопления между двумя видами моллюсков, поэтому при создании карт-схем при наличии данных для беззубки и перловицы мы брали среднее арифметическое значений коэффициентов в их тканях. Как говорилось выше, в качестве метода расчёта сетки данных для карт с изолиниями мы использовали не точный интерполятор, а метод радиальной базисной функции: расположение точек отбора отличается неоднородностью, и применение точных методов, например триангулярной линейной интерполяции, затруднено. На картах-схемах 2–5 окрашенные поля значений коэффициентов обогащения > 1 могут несущественно отклоняться от точек отбора, заходить на участки суши и т. д.; это обычные ошибки при построении карт изолиний. Между тем общие тенденции распределения данных, безусловно, сохраняются, а наглядность представления информации перекрывает незначительные неточности.

На всех точках отбора, которые расположены на участке реки, протекающем через центральную часть города, отмечено (см. табл. 1) превышение рассчитанных фоновых концентраций по содержанию никеля в придонном слое воды (рис. 2А) и донных отложениях (рис. 2С) и по содержанию цинка в мягких тканях моллюсков (рис. 2F). На локальных участках отбора в центральной части города зафиксированы концентрации выше рассчитанных фоновых для двух тяжёлых металлов: для цинка — в верхнем слое донных отложений (рис. 2D); для никеля — в тканях двустворок (рис. 2E).

Содержание таких металлов, как железо и марганец, в придонном слое воды в основном не превышает рассчитанные нами фоновые величины по всему участку (рис. 3А, В). В верхнем слое донных отложений концентрации марганца были выше фоновых на всём участке р. Северной Двины, прилегающем к центральным районам города, а концентрации железа (рис. 3С) — на локальных участках выше и ниже по течению от центральных городских кварталов. Отметим, что именно соединения железа и марганца в воде называют основными загрязняющими веществами по всему водотоку Северной Двины от верховьев до устьевой области (Государственный доклад, 2013 ; Характеристика загрязнения, 2021). В тканях моллюсков концентрации железа выше рассчитанных фоновых зафиксированы во всех точках в центральной части города; концентрации марганца были ниже фоновых во всех точках отбора (рис. 3Е).

Концентрации кадмия на изучаемом участке реки не превышали рассчитанных фоновых показателей в придонном слое воды и в донных отложениях (рис. 4А, С). Как сказано выше, медиана концентрации кадмия на фоновом участке была выше, чем на участке реки, примыкающем к городским кварталам. В тканях моллюсков концентрации этого металла были выше рассчитанных по всей акватории в центральной части города (рис. 4Е). В 2014 г. на этом участке было зафиксировано максимальное абсолютное значение концентрации кадмия ($5,12 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ вл. веса) в тканях беззубки, что превышало расчётные фоновые показатели более чем в 50 раз (табл. 1); при этом ткани моллюска были тёмного цвета. Данный показатель исключён из выборки при построении карт, поскольку имеет экстремальное значение.

Концентрация меди в придонном слое воды выше рассчитанной фоновой зафиксирована на локальных участках водотока по правому берегу, вплотную прилегающему к центральной части Архангельска (рис. 4В, D). Сравнение показателя с $\text{ПДК}_{\text{рыб.хоз.}}$ показало, что на данных участках содержание меди было в десятки раз выше нормируемого (Неверова и др., 2016). Концентрация меди в донных отложениях выше рассчитанной фоновой отмечена в точках ниже по течению от центральных городских кварталов, в местах замедления течений из-за морфологических особенностей русла (рис. 4D).

Содержание свинца в придонном слое воды по всему изучаемому участку было ниже предела обнаружения методики, а в верхнем слое донных отложений превышало рассчитанные нами фоновые показатели на всех точках отбора на участке реки, протекающем через центральные городские кварталы (рис. 5А). В тканях моллюсков концентрации свинца превышали фоновые в точках выше и ниже центральных городских районов (рис. 5В).

По донным отложениям выделяются участки, где фоновые концентрации превышены по всем металлам. Это т. 16 (участок при входе в Никольский рукав) и т. 22 (рядом с островом Молодёжным) (см. рис. 1). Точка 16 находится ниже по течению многочисленных промышленных площадок, расположенных по левому берегу Северной Двины, в зонах замедления течений, которые связаны с морфологическими особенностями русла. Точка 22 находится в зоне зарослей макрофитов, также в зоне замедления течения. В результате таких особенностей на этих участках оседают и аккумулируются переносимые течениями донные отложения с сорбированными на них металлами.

В отличие от концентраций в придонном слое воды и донных отложениях, в тканях моллюсков наблюдается превышение содержания большинства исследуемых металлов: значения выше рассчитанных верхних фоновых зарегистрированы во всех точках отбора по руслу реки в центральной части города — и на правом берегу, и на левом (рис. 2Е, F; 3Е; 4Е, F; 5Е, F).

Из полученных данных можно сделать вывод о поступлении в придонный слой воды никеля и цинка из единого источника (есть значимая положительная корреляция Ni/Zn ; $R = 0,55$; $p \leq 0,05$; $N = 16$), со стоками дренажно-ливневой канализации в акваторию реки по правому берегу, а также о локальных поступлениях металлов из промышленного узла, расположенного вдоль левого берега Северной Двины, куда по её течению поступают и недостаточно очищенные бытовые и дренажно-ливневые стоки южной части г. Архангельска. Упоминание о поступлении неочищенных бытовых стоков в районе городского пляжа (т. 18–20, рис. 1) Северной Двины можно встретить уже в публикации 1920-х гг. (Лопато, 1927). Донные отложения изучаемого участка реки обогащены свинцом [> 6 фоновых концентраций (ф. к.)] и никелем (> 3 ф. к.) на всём участке Северной Двины, протекающем через центральную часть города, как по правому, так и по левому берегу. Железом (> 1 ф. к.), марганцем (> 1 ф. к.), медью (> 3 ф. к.) и цинком (> 1 ф. к.) обогащены локальные участки реки в центре города и выше и ниже его центральных районов. В тканях моллюсков расчётные фоновые показатели были превышены по всем металлам, кроме марганца.

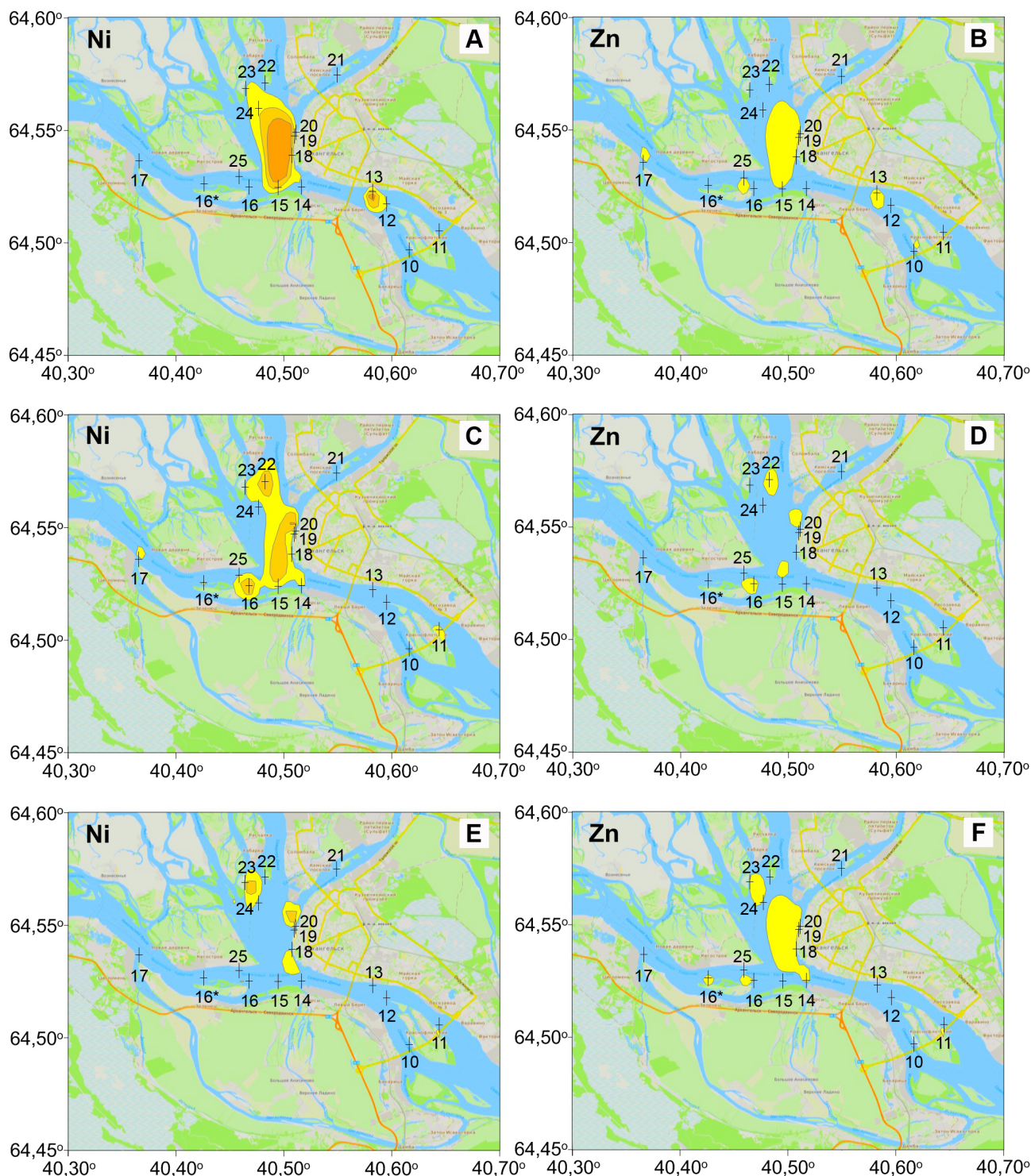


Рис. 2. Превышение фонового уровня по содержанию никеля (А — в придонном слое воды; С — в донных отложениях; Е — в тканях моллюсков) и цинка (В — в придонном слое воды; D — в донных отложениях; F — в тканях моллюсков). Шкала градации значений приведена на рис. 5

Fig. 2. Excess of the background level of Ni content (A, in bottom water layer; C, in bottom sediments; E, in mollusc tissues) and Zn content (B, in bottom water layer; D, in bottom sediments; F, in mollusc tissues). The gradation scale is shown in Fig. 5

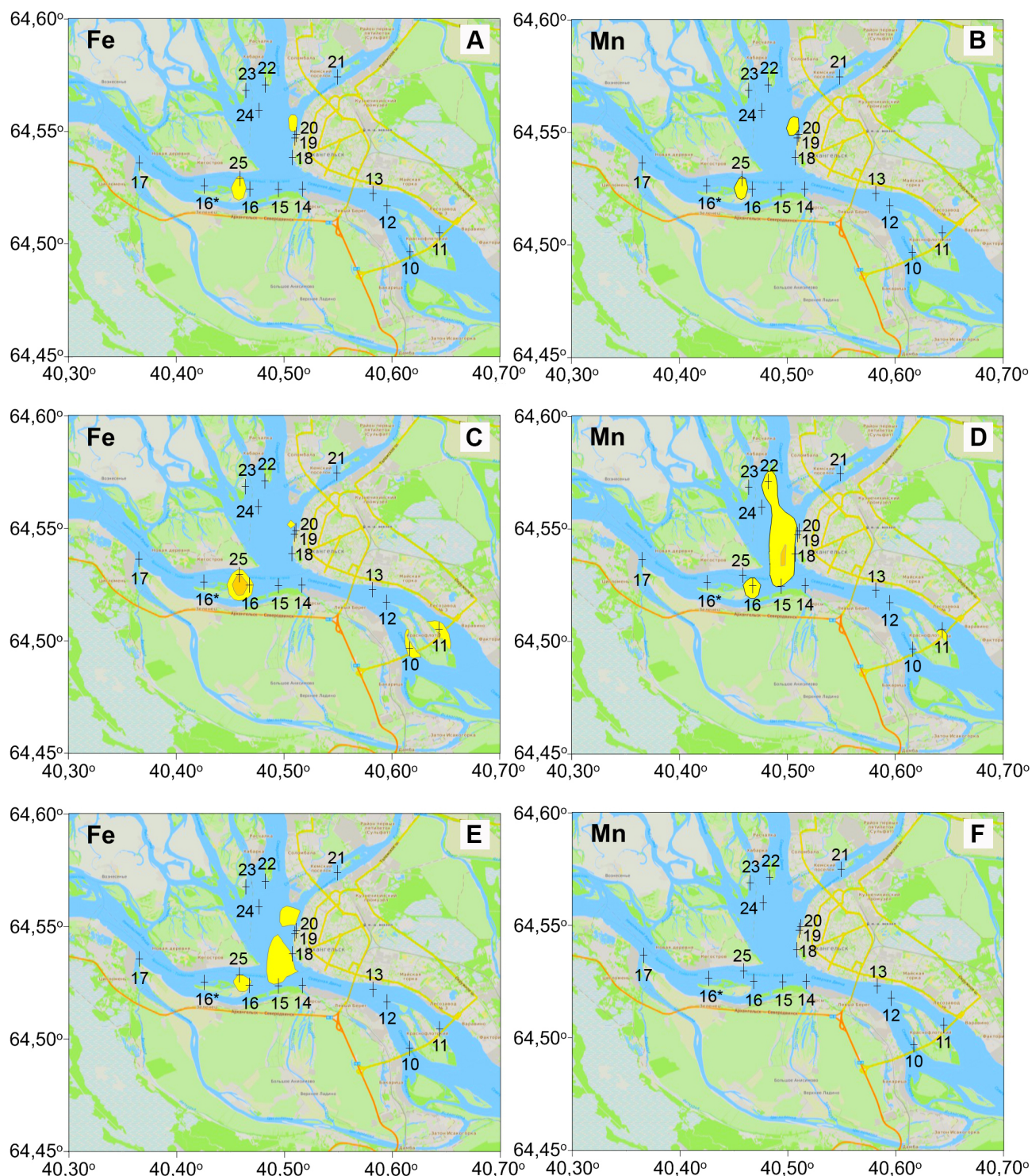


Рис. 3. Превышение фонового уровня по содержанию железа (А — в придонном слое воды; С — в донных отложениях; Е — в тканях моллюсков) и марганца (В — в придонном слое воды; D — в донных отложениях; F — в тканях моллюсков). Шкала градации значений приведена на рис. 5

Fig. 3. Excess of the background level of Fe content (A, in bottom water layer; C, in bottom sediments; E, in mollusc tissues) and Mn content (B, in bottom water layer; D, in bottom sediments; F, in mollusc tissues). The gradation scale is shown in Fig. 5

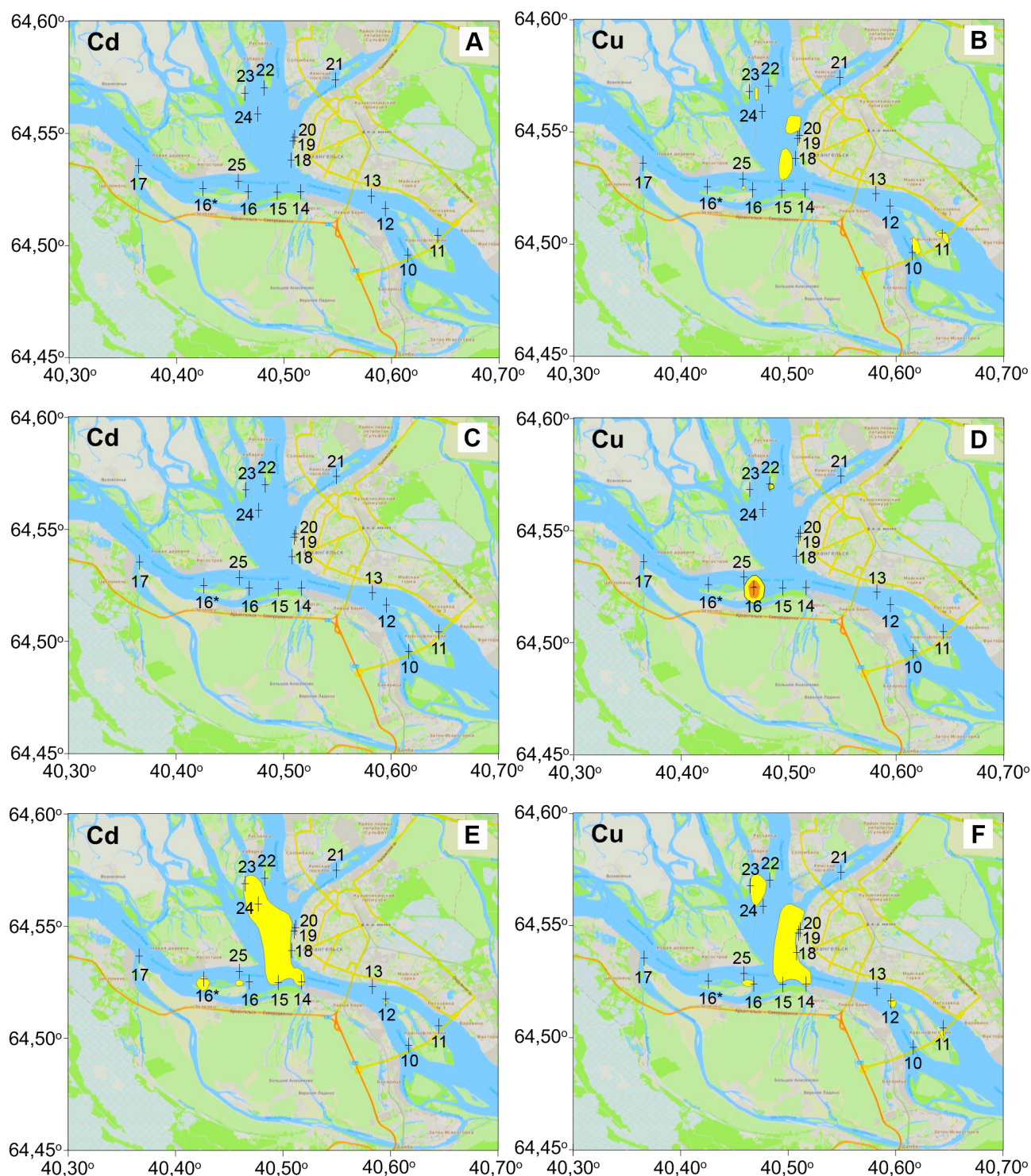


Рис. 4. Превышение фонового уровня по содержанию кадмия (А — в придонном слое воды; С — в донных отложениях; Е — в тканях моллюсков) и меди (В — в придонном слое воды; D — в донных отложениях; F — в тканях моллюсков). Шкала градации значений приведена на рис. 5

Fig. 4. Excess of the background level of Cd content (A, in bottom water layer; C, in bottom sediments; E, in mollusc tissues) and Cu content (B, in bottom water layer; D, in bottom sediments; F, in mollusc tissues). The gradation scale is shown in Fig. 5

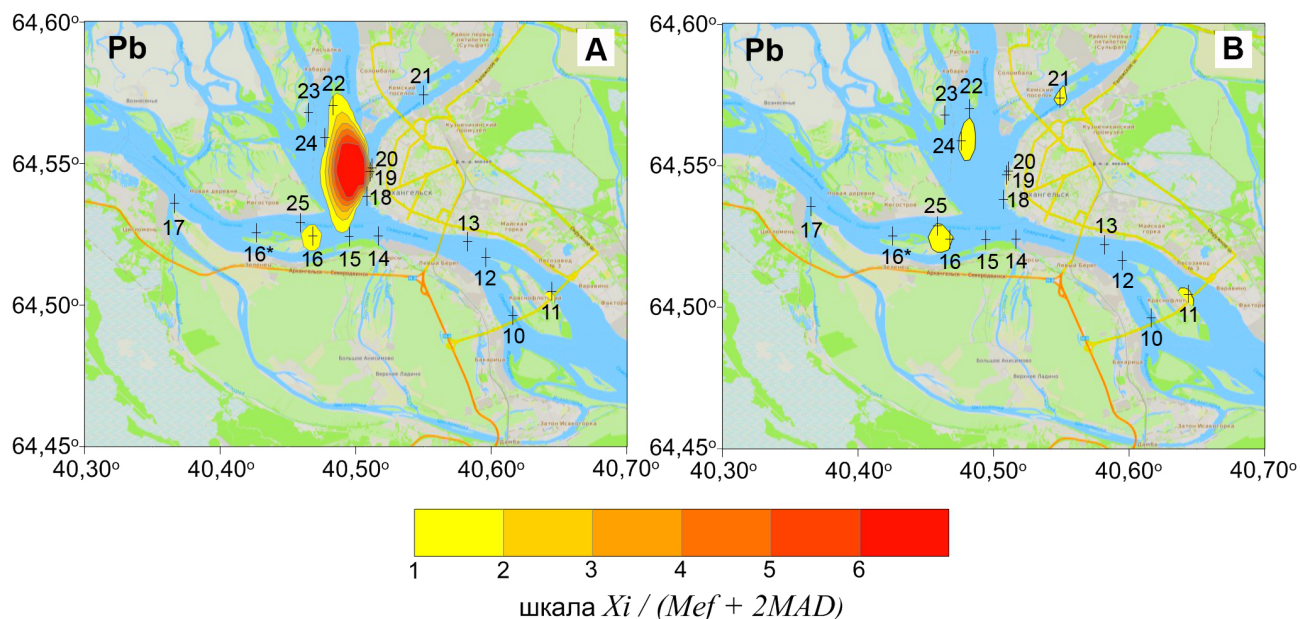


Рис. 5. Превышение фонового уровня по содержанию свинца (А — в донных отложениях; В — в тканях моллюсков)

Fig. 5. Excess of the background level of Pb content (A, in bottom sediments; B, in mollusc tissues)

Выводы:

1. Выявлены превышения содержания тяжёлых металлов над условно-фоновыми концентрациями на участке р. Северной Двины, который примыкает к центральным городским кварталам, связанные с поступлением в акваторию дождевых и талых вод с ливневыми и недостаточно очищенными коммунально-бытовыми сточными водами. Для Cd и Pb ещё одним крупным источником поступления может служить ближний атмосферный перенос: как показано в работе по изучению загрязнения водосборного бассейна Белого моря тяжёлыми металлами, поступающими из атмосферы (Шевченко и др., 2020), близость автомобильной магистрали существенно влияет на обогащение снежного покрова именно этими двумя элементами.
2. Анализ содержания тяжёлых металлов в тканях моллюсков более информативен и показателен, чем анализ придонного слоя воды и донных отложений. Малоподвижные бентосные организмы, в частности двустворчатые моллюски, могут служить индикаторами данного загрязнения в водных экосистемах: будучи организмами-фильтраторами, они накапливают в своих тканях сравнительно большие концентрации тяжёлых металлов при питании и дыхании, чем в среде обитания. Кроме того, являясь, менее мобильными, чем донные отложения и вода, моллюски могут фиксировать загрязняющие вещества в пространственном аспекте.

Исследование выполнено в рамках темы ФНИР № 0409-2019-0028 «Комплексные исследования биотических и абиотических компонентов водных экосистем водосборного бассейна Белого и юго-востока Баренцева морей», а также при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00938_А.

Благодарность. Выражаем искреннюю благодарность своим коллегам за помощь в отборе проб и за конструктивную критику при написании этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Веницианов Е. В., Лепихин А. П., Мирошниченко С. А., Губернаторова Т. Н. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжёлых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 3. С. 50–64. [Venitsianov E. V., Lepikhin A. P., Miroshnichenko S. A., Gubernatorova T. N. Development and substantiation of regional water quality standards in respect of heavy metals content for the Upper Kama basin water bodies. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2015, no. 3, pp. 50–64. (in Russ.)]
2. Возняк А. А., Лепихин А. П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // *Географический вестник*. 2018. № 2 (45). С. 103–115. [Wozniak A. A., Lepikhin A. P. Development of regional MPC: Necessity, methodology, example. *Geographicheskii vestnik*, 2018, no. 2 (45), pp. 103–115. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-103-115>
3. Гидрология устьевой области Северной Двины / под ред. М. И. Зотина, В. Н. Михайлова. Москва : Гидрометеиздат. Моск. отд-ние, 1965. 241 с. [*Gidrologiya ust'voi oblasti Severnoi Dviny* / M. I. Zotin, V. N. Mikhailov (Eds). Moscow : Gidrometeoizdat. Mosk. otd-nie, 1965, 241 p. (in Russ.)]
4. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2013 году» // *Вода России : научно-популярная энциклопедия* : [сайт]. [Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2013 godu”. In: *Voda Rossii : nauchno-populyarnaya entsiklopediya* : [site]. (in Russ.)]. URL: <https://water-rf.ru/water/gosdoc/183.html> [accessed: 27.03.2021].
5. ГОСТ 26929-94. *Сырьё и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения токсичных элементов* : межгосударственный стандарт : утверждён и введён в действие Постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 21.02.1995 № 78 : взамен ГОСТ 26929-86 : дата введения 01.01.1996 / разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом консервной и овощесушильной промышленности (ВНИИКОП) и др. Москва : Стандартинформ, 2010. 12 с. [GOST 26929-94. *Raw Material and Food-stuffs. Preparation of Samples. Decomposition of Organic Matters for Analysis of Toxic Elements* : mezhgosudarstvennyi standart : utverzhden i vveden v deistvie Postanovleniem Komiteta Rossiiskoi Federatsii po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii ot 21.02.1995 No. 78 : vzamen GOST 26929-86 : data vvedeniya 01.01.1996 / razrabotan Vserossiiskim nauchno-issledovatel'skim institutom konservnoi i ovoshchesushil'noi promyshlennosti (VNI IKOP). Moscow : Standartinform, 2010, 12 p. (in Russ.)]
6. ГОСТ Р 51592-2000. *Вода. Общие требования к отбору проб* : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Постановлением Госстандарта России от 21.04.2000 № 117-ст : введён впервые : дата введения 01.07.2001 / разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 343 «Качество воды». Москва : Стандартинформ, 2008. 48 с. [GOST R 51592-2000. *Water. General Requirements for Sampling* : natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii : izdanie ofitsial'noe : utverzhden i vveden v deistvie Postanovleniem Gosstandarta Rossii ot 21.04.2000 No. 117-st : vveden v pervye : data vvedeniya 01.07.2001 / razrabotan Tekhnicheskim komitetom po standartizatsii TK 343 “Kachestvo vody”. Moscow : Standartinform, 2008, 48 p. (in Russ.)]
7. Дину М. И., Шкинев В. М. Комплексообразование ионов металлов с органическими веществами гумусовой природы: методы исследования и структурные особенности лигандов, распределение элементов по формам // *Геохимия*. 2020. Т. 65, вып. 2. С. 165–177. [Dinu M. I., Shkinev V. M. Complexation of metal ions with organic substances of humus nature: Methods of study and structural features of ligands, and distribution of elements between species. *Geokhimiya*, 2020, vol. 65, iss. 2, pp. 165–177. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S001675252002003X>
8. Зимовец А. А., Федоров Ю. А. Тяжёлые металлы в почвах устьевой области реки Северная Двина // *Известия высших учебных заведений*.

- Северо-Кавказский регион. Серия: естественные науки. 2013. № 5 (177). С. 70–74. [Zimovets A. A., Fedorov Yu. A. Heavy metals in the soils of the Northern Dvina River. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: estestvennye nauki*, 2013, no. 5 (177), pp. 70–74. (in Russ.)]
9. Котова Е. И., Коробов В. Б., Шевченко В. П., Иглин С. М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 5. С. 121–129. [Kotova E. I., Korobov V. B., Shevchenko V. P., Iglin S. M. Environmental situation in the Severnaya Dvina mouth zone (the White Sea). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, no. 5, pp. 121–129. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.17513/use.37402>
 10. Лопато В. А. Исследования воды р. Северной Двины у берега города Архангельска осенью 1925 г. // *Труды Государственного полярного химико-бактериологического института имени профессора Тимирязева 1924–1927 гг.* Архангельск : Химико-бактериологический институт, 1927. 233 с. [Lopato V. A. Issledovaniya vody r. Severnoi Dviny u berega goroda Arkhangel'ska osen'yu 1925 g. In: *Trudy Gosudarstvennogo polyarnogo khimiko-bakteriologicheskogo instituta imeni professora Timiryazeva 1924–1927 gg.* Arkhangel'sk : Khimiko-bakteriologicheskii institut, 1927, 233 p. (in Russ.)]
 11. Лукашев Д. В. Метод расчёта фоновых концентраций тяжёлых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков для оценки загрязнения р. Днепр // *Биология внутренних вод*. 2007. № 4. С. 97–106. [Lukashev D. V. The method of calculation of background concentrations of trace metals in freshwater mussel tissue for assessment of pollution in river Dnieper. *Biologiya vnutrennikh vod*, 2007, no. 4, pp. 97–106. (in Russ.)]
 12. Махнович Н. М. Исследование *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) как объекта биомониторинга в устье реки Северная Двина // *Проблемы региональной экологии*. 2016. № 1. С. 39–43. [Makhnovich N. M. The study of *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) as an object of bio-monitoring in the mouth of the Northern Dvina river. *Problemy regional'noi ekologii*, 2016, no. 1, pp. 39–43. (in Russ.)]
 13. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом : методические указания : РД 52.18.191-89 ; введён в действие 01.01.1991 / Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. Москва, 1990. 32 с. [Metodika vypolneniya izmerenii massovoi doli kislotorastvorimyykh form metallov v probakh pochv atomno-absorbtsionnym metodom : metodicheskie ukazaniya : RD 52.18.191-89 ; vveden v deistvie 01.01.1991 / Gosudarstvennyi komitet SSSR po gidrometeorologii. Moscow, 1990, 32 p. (in Russ.)]. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293849/4293849262.pdf> [accessed: 27.03.2021].
 14. Неверова Н. В., Лебедев А. А., Морева О. Ю., Чупаков А. В., Ершова А. А. Тяжёлые металлы в донных отложениях, придонном слое воды и бентосных организмах устьевой части реки Северной Двины // *Вода: химия и экология*. 2014. № 4 (70). С. 3–10. [Neverova N. V., Lebedev A. A., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Ershova A. A. Heavy metals in the sediments, bottom water and benthic organisms in the estuary of the Northern Dvina river. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2014, no. 4 (70), pp. 3–10. (in Russ.)]
 15. Неверова Н. В., Чупаков А. В. Оценка загрязнения тяжёлыми металлами гидробионтов устьевой области реки Северной Двины (Россия) с использованием метода расчёта абсолютного отклонения медианы // *Загрязнение морской среды: экологический мониторинг, биоиндикация, нормирование* : сб. ст. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 125-летию проф. В. А. Водяницкого, Севастополь, 28 мая – 1 июня 2018 г. Севастополь : Колорит, 2018. С. 159–166. [Neverova N. V., Chupakov A. V. Evaluation of the heavy metals pollution in aquatic organisms from estuarian area of the river Northern Dvina (Russia) using the estimation of absolute deviation of the median. In: *Pollution of Marine Environment: Ecological Monitoring, Bioassay, Standardization* : sb. st. Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 125-letiyu prof. V. A. Vodyanitskogo, Sevastopol, 20 May – 1 June, 2018. Sevastopol : Kolorit, 2018, pp. 159–166. (in Russ.)]
 16. Неверова Н. В., Чупаков А. В., Ершова А. А., Лебедев А. А., Морева О. Ю. Биогеохимические исследования в экологическом

- мониторинге для оценки состояния экосистем в условиях сложных средовых градиентов (на примере макробентоса устьевой области р. Северной Двины) // *Вода: химия и экология*. 2016. № 7 (97). С. 40–48. [Neverova N. V., Chupakov A. V., Ershova A. A., Lebedev A. A., Moreva O. Yu. Biogeochemical studies in environmental monitoring to assess the state of ecosystems under complex environmental gradients (on the example of macrobenthos of mouth area of the Northern Dvina River). *Voda: khimiya i ekologiya*, 2016, no. 7 (97), pp. 40–48. (in Russ.)]
17. Обзоры загрязнения окружающей среды на территории деятельности Северного УГМС за 2010–2020 годы // *Северное Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды* : сайт / Министерство природных ресурсов ; Росгидромет. Москва, 2021. [Obzory zagryazneniya okruzhayushchei sredy na territorii deyatel'nosti Severnogo UGMS za 2010–2020 gody. In: *Severnoe Upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy* : site / Ministerstvo prirodnykh resursov ; Rosgidromet. Moscow, 2021. (in Russ.)]. URL: <http://www.sevmeteo.ru/monitoring/reviews/> [accessed: 27.03.2021].
 18. ПНД Ф 14.1:2.214-06 (ФР.1.31.2007.03809). Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации железа, кадмия, кобальта, марганца, никеля, меди, цинка, хрома и свинца в пробах природных и сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектrophотометрии : утверждён ФГУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия» 17.04.2006. [Москва, 2006]. 23 с. [PND F 14.1:2.214-06 (FR.1.31.2007.03809). *Kolichestvennyi khimicheskii analiz vod. Metodika vypolneniya izmerenii massovoi kontsentratsii zheleza, kadmiya, kobal'ta, margantsa, nikelya, medi, tsinka, khroma i svintsya v probakh prirodnykh i stochnykh vod metodom plamennoi atomno-absorbtsionnoi spektrofotometrii* : utverzhden FGU "Federal'nyi tsentr analiza i otsenki tekhnogennogo vozdeistviya" 17.04.2006. [Moscow, 2006], 23 p. (in Russ.)]. URL: <https://www.alppp.ru/law/okruzhayushchaja-sreda-i-prirodnye-resursy/ispolzovanie-i-ohrana-vod/4/pnd-f-14-12-214-06-fr-1-31-2007-03809--kolichestvennyj-khimicheskij-analiz-vod--metodika-vy.pdf> [accessed: 27.03.2021].
 19. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 239 с. [*Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozhenii*. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1983, 239 p. (in Russ.)]
 20. Субботина А. В., Гржибовский А. М. Описательная статистика и проверка нормальности распределения количественных данных // *Экология человека*. 2014. № 2. С. 51–57. [Subbotina A. V., Grzhibovskii A. M. Descriptive statistics and normality testing for quantitative data. *Ekologiya cheloveka*, 2014, no. 2, pp. 51–57. (in Russ.)]
 21. Характеристика загрязнения поверхностных вод суши в марте 2019 г. // *Северное Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды* : сайт / Министерство природных ресурсов ; Росгидромет. Москва, 2021. [Kharakteristika zagryazneniya poverkhnostnykh vod sushi v marte 2019 g. In: *Severnoe Upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy* : site / Ministerstvo prirodnykh resursov ; Rosgidromet. Moscow, 2021. (in Russ.)]. URL: <http://www.sevmeteo.ru/monitoring/water/6545/> [accessed: 27.03.2021].
 22. Хоруджая Т. А. Оценка экологической опасности. Москва : Книга-Сервис, 2002. 208 с. [Khorudzhaya T. A. *Otsenka ekologicheskoi opasnosti*. Moscow : Kniga-Servis, 2002, 208 p. (in Russ.)]
 23. Шевченко В. П., Стародымова Д. П., Коробов В. Б., Алиев Р. А., Булохов А. В., Кокрятская Н. М., Котова Е. И., Лохов А. С., Чупаков А. В. Исследование загрязнения водосборного бассейна Двинского залива Белого моря тяжёлыми металлами, поступающими из атмосферы // *Экологические проблемы. Взгляд в будущее* : сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф., БП и СОТ «Витязь» – БП и СОТ «Лиманчик», 22–23 октября 2020 г. / под ред. Ю. А. Федорова. Таганрог : Изд-во Южного федерального университета, 2020. С. 710–715. [Shevchenko V. P., Starodymova D. P., Korobov V. B., Aliev R. A., Bulokhov A. V., Kokryatskaya N. M., Kotova E. I., Lokhov A. S., Chupakov A. V. Issledovanie zagryazneniya vodosbornogo basseina Dvinskogo zaliva Belogo morya tyazhelymi metallami, postupyayushchimi

- iz atmosfery. In: *Ekologicheskie problemy. Vzgl'yad v budushchee* : sb. tr. IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., BP i SOT "Vityaz" – BP i SOT "Limanchik", 22–23 Oct., 2020 / Yu. A. Fedorov (Ed.). Taganrog : Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2020, pp. 710–715. (in Russ.)]
24. Bolotov I. N., Bespalaya Yu. V., Vikhrev I. V., Aksenova O. V., Aspholm P. E., Gofarov M. Y., Klishko O. K., Kolosova Yu. S., Kondakov A. V., Lyubas A. A., Paltser I. S., Konopleva E. S., Tumpeesuwan S., Bolotov N. I., Voroshilova I. S. Taxonomy and distribution of freshwater pearl mussels (Unionoida: Margaritiferidae) of the Russian Far East. *PLoS One*, 2015, vol. 10, iss. 5, art. no. e0122408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122408>
 25. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 2005, vol. 346, iss. 1–3, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.023>
 26. Tukey J. W. Exploratory data analysis. In: *The Concise Encyclopedia of Statistics*. New York, NY : Springer, 2008, pp. 177–195. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_136

ASSESSMENT OF CONTAMINATION OF THE ESTUARINE AREA OF THE NORTHERN DVINA RIVER BY CALCULATING BACKGROUND CONCENTRATIONS (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, and Ni)

N. V. Neverova and A. V. Chupakov

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russian Federation
E-mail: nevnata@yandex.ru

This publication is a continuation of research on the quantitation of the heavy metal contamination level (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, and Ni) in the ecosystem components of the estuarine area of the Northern Dvina River. To assess the contamination level with these metals in the ecosystem of the Northern Dvina estuarine area in the spot of the highest anthropogenic load (the area of Novodvinsk – Arkhangelsk – Severodvinsk urban agglomeration), we use the method of comparative analysis of the study object with the background plot – the river section above urban development. Using spatial mapping of the enrichment factor values for the aquatic ecosystem components, areas with abnormal excess of metal content in mollusc tissues, bottom sediments, and bottom water layer were determined. As established, the area adjacent to the city center and to an industrial zone on the left bank is subject to the highest anthropogenic load in the water area of the river delta top. The most likely sources of contamination with the considered heavy metals are the inflow of surface wastewater (meltwater and rain storm runoff), untreated municipal wastewater, and direct short-range atmospheric transport. The analysis of mollusc tissues proved to be a more informative and indicative approach to the assessment of the heavy metal contamination in water areas with complex hydrological and hydrochemical environmental gradients than the analysis of bottom water layer and bottom sediments.

Keywords: estuarine area of the Northern Dvina River, background concentrations, heavy metals, enrichment factor, bivalves