

УДК 57.044:574.2: 574.58:574.64:594.381.5

DOI 10.24411/2309-4370-2019-13104

Статья поступила в редакцию 21.06.2019

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРЕДСТАВИТЕЛЯМИ СЕМЕЙСТВА LYMNAEIDAE КАК ОТКЛИК НА КРИТИЧЕСКИЕ УРОВНИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЁМОВ ЮЖНОГО УРАЛА

© 2019

Дерягин Владимир Владиславович, кандидат географических наук,
доцент кафедры географии и методики обучения географии
Назаренко Назар Николаевич, доктор биологических наук,
профессор кафедры химии, экологии и методики обучения химии
Девятова Екатерина Викторовна, студент естественно-технологического факультета
Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
(г. Челябинск, Российская Федерация)

Аннотация. Исследованы особенности аккумуляции тяжёлых металлов *Lymnaea fragilis* и *L. psilia* в зоне загрязнения аэральными выбросами Карабашского медеплавильного производства (Южный Урал), заключающиеся в избирательном перераспределении металлов между мягкими тканями и раковинной. Аккумуляция тяжёлых металлов происходит по трём независимым направлениям: «вода → мягкие ткани», «вода → раковина» и «мягкие ткани → раковина». Их концентрации в мягких тканях по сравнению с физиологической нормой превышены в тысячи раз, в раковине выявлено превышение в разы. Первенство по накоплению принадлежит марганцу и железу, замыкают десятку исследованных металлов кобальт, кадмий и молибден. Установлено, что более биофильный марганец больше, чем другие металлы, накапливается в мягких тканях моллюсков, несколько менее биофильное железо – в раковине, преимущественно в её поверхностных слоях. Для мягких тканей и для раковины наблюдается свой ряд аккумуляции тяжёлых металлов, но эти ряды сходные для разных биотопов и наблюдается биогеохимическая однородность в качественном плане. По аккумуляции в системе «вода → мягкие ткани → раковина» металлов можно судить не только о степени загрязнённости этим металлом окружающей среды, но и о степени его локальной биофильности. Выявлена адаптивная реакция прудовиков на техногенное загрязнение как концентраторов в менее загрязнённых и деконцентраторов в более загрязнённых водоёмах. Подтверждено, что высокие концентрации тяжёлых металлов и низкое значение pH среды водоёма ведут к гибели и полному отсутствию моллюсков данных видов.

Ключевые слова: семейство Lymnaeidae; биоиндикация; аккумуляция поллютантов гидробионтами; концентрация и деконцентрация поллютантов гидробионтами; тяжёлые металлы; адаптивная реакция; поллютанты медеплавильного производства; аэральные выбросы; техногенное загрязнение; Южный Урал.

Тяжёлые металлы относятся к приоритетным загрязнителям гидросферы, особенностью которых является стойкость в среде и накопление в трофических цепях. Понимание закономерностей распределения тяжёлых металлов в пресноводных водоёмах, особенностей их миграции, факторов влияющих на накопление в организмах гидробионтов является одной из актуальных тем гидробиологии. Особенно актуально это для территории, подвергающейся импактному воздействию аэральные выбросы медеплавильного производства – окрестностям г. Карабаш Челябинской области (Южный Урал).

В связи с необходимостью оценки уровней загрязнения водоёмов приоритетное значение приобретают методы биоиндикации. Среди многочисленных групп гидробионтов-биоиндикаторов особую роль в оценке состояния окружающей среды играют т.н. виды-аккумуляторы, способные накапливать в организме определённые химические вещества, в частности – тяжёлые металлы, отражая фактический уровень загрязнения водоёма [1]. При этом аккумулятивная способность является своеобразным откликом на уровень техногенного загрязнения, а её изучение представляет значительный научный интерес и практическую значимость с точки зрения индикации состояния экосистем. В качестве гидробионтов-биоиндикаторов для определения загрязнённости водоёмов

окрестностей Карабаша было выбрано семейство Lymnaeidae.

Тяжёлые металлы являются жизненно необходимыми микроэлементами, входящими в состав органов и многих ферментов, катализирующих окислительно-восстановительные биохимические реакции. С другой стороны, высокие концентрации тяжёлых металлов препятствуют нормальному развитию гидробионтов и могут приводить к гибели организмов. Поэтому проблема определения уровней техногенного загрязнения водоёмов окрестностей Карабаша по аккумуляции тяжёлых металлов в частях тела брюхоногих моллюсков семейства Lymnaeidae является актуальной.

Целью данной работы является оценка накопления тяжёлых металлов некоторыми представителями семейства Lymnaeidae в водоёмах, подверженных техногенному загрязнению аэральными выбросами Карабашского медеплавильного производства.

Брюхоногие моллюски играют важную роль в водных экосистемах благодаря широким биоценотическим связям, активному участию в трофических цепях и значительной роли в процессе самоочищения водоёмов [2]. Наиболее токсичны для них свободные ионы металлов. Связанные в комплексные соединения с органическими веществами естественного происхождения металлы даже при высоких кон-

центрациях не обладают токсичными свойствами (за исключением соединений ртути). В организм моллюска поступление тяжёлых металлов происходит через желудочно-кишечный тракт при питании и в результате сорбции из воды на поверхности раковины. На аккумуляцию влияет занимаемая видом экологическая ниша, а для каждой группы гидробионтов существует адаптивный диапазон концентраций [3].

Моллюски, как бентосные организмы, обладают повышенной восприимчивостью к загрязнению водных экосистем и, прежде всего, донных отложений. В их организме основную защитную функцию выполняет гемолимфа, которая во многом определяет ответ на загрязнение. Воздействие поллютантов отражается на энергетике гемоцитов, а сильное загрязнение полностью их разрушает, что в дальнейшем приводит к патологическим изменениям в органах и тканях. В частности, в районах, примыкающих к промышленным зонам, у моллюсков наблюдаются дистрофические изменения в соединительной ткани и мышцах [4], воспалительные реакции, нарушение синхронности работы пищеварительных трубочек [5], дезинтеграция пищеварительной железы и повышенное содержание в тканях гранул липофусцина [6]. Маркерами загрязнения водной среды тяжёлыми металлами является иммобилизация их в клеточных везикулах, хромосомные aberrации, ДНК-разрывы, изменение активности антиоксидантных ферментов, а также уровня экспрессии металлотионеинов [7]. По сравнению с другими гидробионтами, в моллюсках отмечается повышенное накопление большинства тяжёлых металлов [8–10]. Их биоаккумуляция характеризуется видовой и органной специфичностью, что связано с различиями в обменных процессах даже у представителей одного и того же рода. Так, большой прудовик (*Lymnaea stagnalis*) характеризуется чрезвычайно высокой накопительной способностью по отношению к ионам кадмия [9]. Медь и кадмий накапливаются преимущественно в мантии, ноге и гепатопанкреасе, свинец преобладает в мантии, ноге и гемолимфе, а цинк в наибольшем количестве обнаруживается в мантии и гепатопанкреасе. Различия в уровне концентрации одного и того же металла в разных органах и тканях нередко весьма велики, а аккумуляция сильно варьирует в зависимости от биотопа. На умеренно загрязнённых территориях прудовики нередко становятся макроконцентраторами по отношению к кадмию, свинцу, меди и цинку, а в условиях экстремального загрязнения водной среды – деконцентраторами по отношению к тяжёлым металлам. Такой затухающий характер увеличения аккумуляции в районах горнорудного производства является адаптивной реакцией к техногенному загрязнению [10].

Раковина, как производная мантии, помимо прочих функций, является контейнером для выведения из тела избытков элементов, поэтому раковины моллюсков являются хорошими концентраторами тяжёлых металлов. Мягкие ткани в этом отношении менее пригодны для анализа, т.к. концентрация различных элементов в них может меняться в зависимости от физиологического состояния животного в различные сезоны года и даже времени суток [11]. В раковинах накапливается более чем 80% большинства тяжёлых металлов от их общего содержания в целом моллюске, в том числе, марганец и никель – до 97%, лишь медь и цинк аккумулируются в раковинах в ко-

личествах, составляющих менее половины от общего содержания [12; 13].

Объект и методика исследований

Исследования проводились в районе импактного воздействия медеплавильного производства ЗАО «Карабаш-медь» (г. Карабаш, Челябинская область). Территория принадлежит водосборному бассейну Аргазинского водохранилища и относится к Карабашской геохимической аномалии, где в породах и почвах присутствуют природные высокие концентрации тяжёлых металлов, в десятки и сотни раз превышающие ПДК. На Карабашском медеплавильном заводе с 1910 г. осуществлялась выплавка черновой меди, что привело к формированию техногенной пустыни на площади около 20 км². Исследование охватило 5 водных объектов (рис. 1), три из которых испытывают техногенное воздействие исключительно через аэральные выбросы медеплавильного производства.

Ведущим источником загрязнения акватории Аргазинского водохранилища является работавшая с 1934 г. обогатительная фабрика, сульфидно-силикатные хвосты которой до 1958 г. сбрасывались в русло реки Сак-Элга и образовали техногенную залежь мощностью до 2 м и площадью 2,5 км², в настоящий момент хвосты занимают около 20% общей площади акватории [14]. В результате загрязнения твёрдым стоком Сак-Элги содержание тяжёлых металлов в воде в пределах верхнего бьефа водохранилища многократно превышают ПДК [15]. Основная часть поллютантов поступает из «хвостов» пиритной залежи р. Сак-Элга и накопленных тяжёлых металлов в донных отложениях самого водохранилища. Дополнительным источником загрязнения водохранилища являются аэральные выбросы медеплавильного производства.

Озеро Серебры находится в 4 км от источника эмиссии в направлении господствующих ветров. Абсолютная высота зеркала 374 м над у. м., площадь – 1,12 км², объём 5,75 млн м³, максимальная глубина 8,5 м при средней 5,12 м [16]. Водное питание осуществляется поверхностным стоком с загрязнённого аэральными выбросами водосбора, подземными грунтовыми водами и атмосферными осадками. В донных отложениях водоёма зафиксированы величины рН 3,0–3,5, концентрации меди до 138000 мг/дм³, цинка – 116000 мг/дм³, свинца – 12500 мг/дм³, кадмия – 5600 мг/дм³, что в сотни тысяч раз превышает допустимые значения ПДК [17].

Озеро Биртильды расположено в 9 км от труб медеплавильного производства по направлению господствующих со стороны Карабаша ветров. До середины 80-х гг. прошлого столетия оно являлось самостоятельным водоёмом площадью около 0,87 км², наибольшей глубиной около 8 м и объёмом 2,96 млн м³. Заполнение Аргазинского водохранилища до современного уровня создало из озера залив.

Озеро Баик расположено в 13 км от Карабаша почти на том же направлении ветров, что и оз. Биртильды. До заполнения Аргазинского водохранилища также являлось самостоятельным водоёмом и сообщалось с ним протокой. Площадь озера составляла около 2,26 км², глубина не более 7 м, объём около 7,8 млн м³. В 1975 г. через озеро проложили канал из оз. Увильды, что полностью сменило первоначальный гидрохимический состав озера на увильдинский. Подпитка чистой увильдинской водой до сих пор контролирует гидрохимию озера-залива, несмотря на

периодическое воздействие аэральных выбросов медеплавильного производства.

Озеро Большой Агардаш расположено в 12 км к северо-северо-востоку от медеплавильного производства и находится, в соответствии с розой ветров, в зоне частого аэрального воздействия выбросов. Максимальная глубина озера около 4 м. Озеро проточное: впадает три относительно значительных по местным меркам и не подверженных какому-либо антропогенному воздействию речки, вытекает река Аткус, впадающая в Аргазь.

Пиявочные болота расположены на юго-западной окраине г. Карабаш в 4 км от труб медеплавильного производства и являются каскадом бывших прудов-отстойников, где улавливались стоки обогащенного производства медеплавильного завода. В настоящее время они сильно заросли макрофитами, глубина колеблется от 0,5 м до 2,5 м, объём от нескольких десятков до 0,1 млн м³, который сильно меняется в течение теплого сезона. Болота имеют сток в р. Сак-Елга просачиванием, почти не влияя на её гидрохимический режим.

Для определения концентрации тяжёлых металлов в литоральной части акваторий до глубины 0,5 м отбирались пробы воды и моллюсков (по 50 экземпляров с каждой точки отбора проб). В качестве объекта исследования был выбран наиболее типичный массовый эвритопный представитель сем. Lymnae-

idae Южного Урала – *Lymnaea fragilis* (Linnaeus, 1758), повсеместно встречающийся к югу от 67° с.ш. и населяющий водоёмы различного типа. Максимальной численности и биомассы достигает в богатых органикой и малых хорошо прогреваемых прудах и озерах. Молодь ведёт придонный образ жизни, обитая на иле. Взрослые особи обитают в основном у поверхности воды или на макрофитах [18]. В связи с тем, что в Пиявочных болотах *L. fragilis* не была обнаружена, в качестве индикатора использовалась *Lymnaea psilia* (Bourguignat, 1862). Данный вид встречается в водоёмах южной части Урала преимущественно в мелких пойменных мочажинах, заполненных водой ямах, канавах и болотцах, а молодые особи часто встречаются по заболоченным берегам водоёмов. Такая замена объекта связана с тем, что у представителей семейства Lymnaeidae можно оценивать накопление тяжёлых металлов в целом, не указывая конкретный вид, так как выраженной видовой специфичности не обнаружено [8]. Для видовой диагностики определяли размерные характеристики моллюсков по основным промерам раковины и рассчитывали базовые морфометрические индексы [18]. Животных очищали от обрастаний и донных отложений. Для очищения кишечника выдерживали в течение 4 часов в аквариумах, заполненных отстаившейся 1 сутки водопроводной водой. Каждый экземпляр взвешивали.

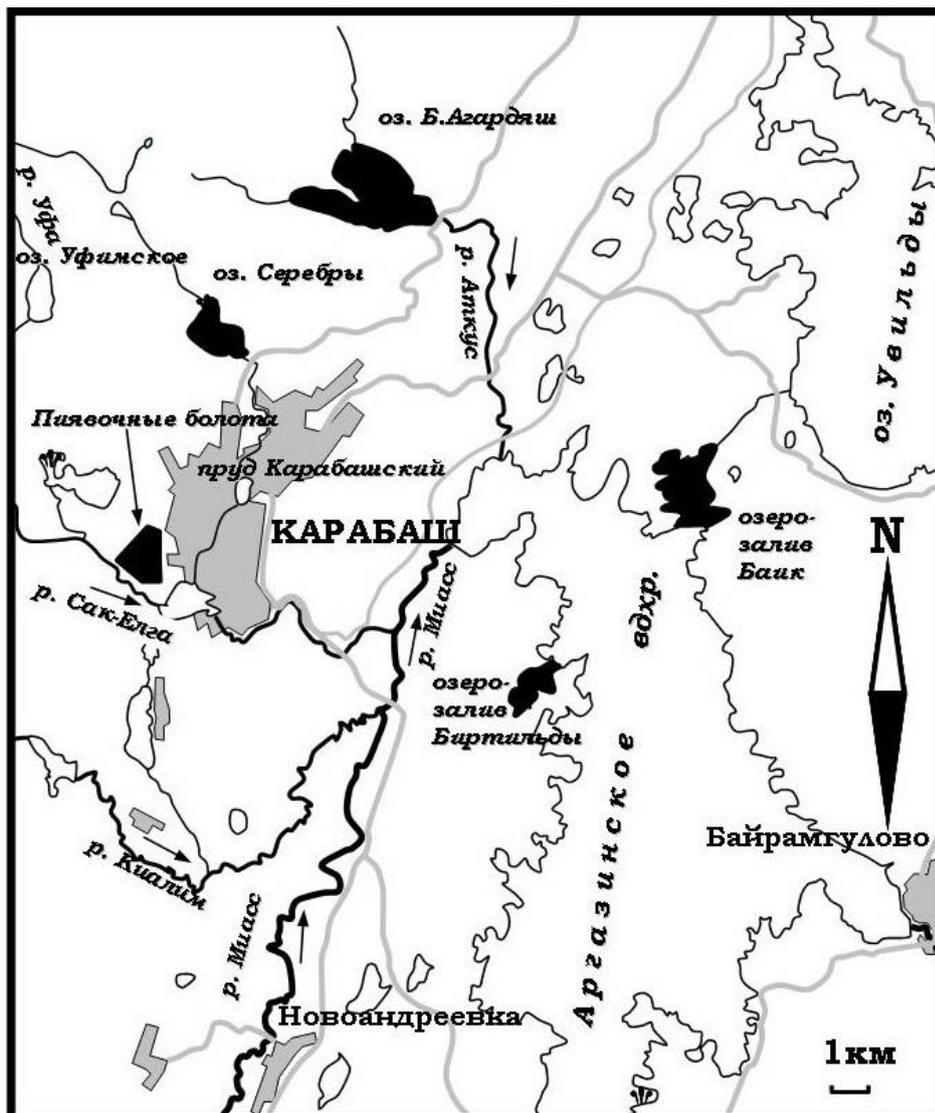


Рисунок 1 – Исследованные водоёмы окрестностей г. Карабаш Челябинской области (выделены чёрным)

Для определения содержания ионов тяжёлых металлов использовали образцы воды, тело и раковину моллюсков. Воду подвергали кислотному озонению на электроплитке. Отбирали 50 мл анализируемой воды в стакан вместимостью 150 мл с добавлением 3,0 мл концентрированной азотной кислоты. Полученный раствор упаривали, не допуская кипения пробы, до влажных солей. В стакан с влажным остатком приливали 20–30 мл 0,1 М раствора азотной кислоты, полученный раствор переносили в мерную колбу вместимостью 50 мл. Стенки стакана ополаскивали из пипетки 0,1 М раствором азотной кислоты и переносили в ту же колбу. Раствор доводили до метки 0,1 М раствором азотной кислоты и перемешивали. Ткани моллюсков фиксировали 96% этиловым спиртом и через 6–12 часов упаривали при температуре 105°C до постоянной массы. После образцы раковин и тел моллюсков измельчали в фарфоровой ступке. Для проведения мокрой кислотной минерализации к навескам 1 г раковин и тел моллюсков приливали 10 мл концентрированной HNO₃, нагревали смесь на электроплитке при слабом кипении до образования влажной соли. После охлаждения приливали 5 мл 0,1 М HNO₃, переносили в колбу на 25 мл и доводили до метки раствором 0,1 М HNO₃.

Количественное содержание ионов тяжёлых металлов определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой «Аугога М90». Концентрацию металлов выражали в мг/л и мг/кг сухой массы животных при естественной влажности воздуха. Результаты анализа обрабатывались математико-статистическими методами [19] в прикладном статистическом пакете Statistica.

Результаты и обсуждение

В результате обследования в 2017 г. акватории озера Серебры моллюсков не обнаружено, на прибрежной территории нигде не было остатков раковин. Вероятно, это связано с высокими концентраци-

ями тяжёлых металлов и низким значением pH донных отложений озера [20] при оптимальных для малакофауны pH 6,9–8,0. При снижении значений активной реакции среды у гастропод наблюдается высокая эмбриональная смертность и прижизненное разрушение раковины. При возможном развитии моллюсков в период нейтральной pH среды, тяжёлые металлы, находясь в большой концентрации, нарушают метаболизм гастропод, блокируют центры ферментов и вследствие этого не позволяют нормально функционировать живому организму [21]. В связи с этим оз. Серебры было исключено из дальнейшего анализа.

Ранжирование средних значений концентрации тяжёлых металлов Краскел-тестом (Kruskal-Wallis ANOVA) позволило определить следующие особенности их аккумуляции (табл. 1).

Несмотря на то, что Урал считают железорудной провинцией, в теле прудовика железо занимает треть-четвёртую позиции по степени аккумуляции. На первом месте находится биофильный марганец, концентрации которого в изученных биотопах также велики. На втором-третьем месте по уровню аккумуляции находится типоморфный для Карабашского медеплавильного производства цинк, концентрация которого в аэральных выбросах относительно невысокая, но фракция более летучая по сравнению с другими элементами. Аэральным источником поступления цинка подтверждается тем, что географическое положение оз. Бол. Агардыш и озера-залива Байк, согласно розе ветров, способствует более частому воздействию аэральных выбросов, чем расположение Пиявочных болот, поэтому в Бол. Агардыше и Байке у моллюсков цинк находится на втором месте по уровню аккумуляции, а в Пиявочных болотах – на третьем. Геоморфологический коридор для аэральных выбросов и частота повторяемости направления ветра на озеро-залив Биртильды (рис. 2) выводит цинк на первое место по накоплению в теле прудовиков.

Таблица 1 – Содержание тяжёлых металлов в воде, мягких тканях и раковине представителей семейства Lymnaeidae в обследованных водоёмах

Металл	Вода, мг/л				Мягкие ткани, мг/кг				Раковина, мг/кг			
	залив Биртильды	залив Байк	Пиявочное болото	оз. Бол. Агардыш	залив Биртильды	залив Байк	Пиявочное болото	оз. Бол. Агардыш	залив Биртильды	залив Байк	Пиявочное болото	оз. Бол. Агардыш
Cr	2	1	4	3	4	1	3	2	1	2	4	3
	1,85·10 ⁻⁴	1,61·10 ⁻⁴	2,40·10 ⁻²	1,43·10 ⁻²	10,88	6,45	8,6	7,88	2,50·10 ⁻²	0,11	0,66	0,16
Mn	1	2	3	4	1	3	4	2	1	4	2	3
	8,40·10 ⁻⁴	1,71·10 ⁻³	3,74·10 ⁻²	4,35·10 ⁻²	1,17·10 ³	1,30·10 ³	1,39·10 ³	1,21·10 ³	8,25	49,05	32,85	38,11
Fe	2	1	3	4	3	2	4	1	4	1	2	3
	4,81·10 ⁻³	3,65·10 ⁻³	0,27	0,45	5,11·10 ²	4,66·10 ²	6,53·10 ²	3,52·10 ²	4,04·10 ³	1,44·10 ²	3,72·10 ²	7,17·10 ²
Co	2	1	3	4	3	1	2	4	4	3	1	2
	1,58·10 ⁻⁴	1,57·10 ⁻⁴	6,00·10 ⁻⁴	8,00·10 ⁻⁴	2,75	1,91	2,32	4,55	1,1	0,43	0,22	0,36
Ni	1	2	3	4	4	3	2	1	4	3	1	2
	4,17·10 ⁻³	4,39·10 ⁻³	7,2·10 ⁻³	7,4·10 ⁻³	27,83	24,53	15,95	13,8	10,89	2,36	0,61	1,09
Cu	2	1	3	4	3	2	4	1	1	2	4	3
	1,01·10 ⁻²	8,63·10 ⁻³	0,12	0,12	5,97·10 ²	5,25·10 ²	1,27·10 ²	2,38·10 ²	0,03	0,26	0,71	0,37
Zn	2	1	3	4	4	2	3	1	1	3	2	4
	5,89·10 ⁻³	3,76·10 ⁻³	0,49	1,88	1,23·10 ³	6,63·10 ²	8,28·10 ²	5,58·10 ²	0,37	3,12	1,73	7,3
Mo	1	2	3	4	2,5	1	4	2,5	1	3	4	2
	8,60·10 ⁻⁴	8,70·10 ⁻⁴	1,14·10 ⁻³	3,22·10 ⁻³	0,38	0,25	0,58	0,38	1,20·10 ⁻³	8,5·10 ⁻³	1,04·10 ⁻²	6,70·10 ⁻³
Cd	1	2	4	3	4	1	2	3	3,5	1,5	1,5	3,5
	2,40·10 ⁻⁵	3,10·10 ⁻⁵	5,00·10 ⁻⁴	3,00·10 ⁻⁴	9,73	4,68	6,7	7,88	5,00·10 ⁻³	2,50·10 ⁻³	2,50·10 ⁻³	5,00·10 ⁻³
Pb	1	2	3	4	3	2	1	4	1	4	3	2
	6,90·10 ⁻⁵	1,33·10 ⁻⁴	1,56·10 ⁻²	3,13·10 ⁻²	24,7	18,7	12,5	25,8	5,50·10 ⁻²	1,32	0,41	0,09

Примечание. В строках выше среднего значения указаны ранги (по возрастанию).



Рисунок 2 – Двойной изогнутый шлейф аэральных выбросов Карабашского медеплавильного производства над озером-заливом Биртильды (фотография В.В. Дерягина, август 2015 г.).
Для масштаба: длина катамарана с буровой платформой (в левой части фотографии) – 6 м

Ярко выражено, что прудовик является активным аккумулятором тяжёлых металлов из окружающей среды, при этом особенности аккумуляции конкретных металлов зависят от биотопа. Так, наибольшая аккумуляция марганца, железа и молибдена в мягких тканях зафиксирована в Пиявочном болоте, а аккумуляция прудовиком меди почти в 2 раза превышает значения в других биотопах. В заливе Биртильды Аргазинского водохранилища в мягких тканях достигает наибольших значений аккумуляция цинка и отмечается значительное накопление никеля, хрома и кадмия. В заливе Байк Аргазинского водохранилища в большом количестве в мягких тканях аккумулируется марганец, никель и цинк, но значения не достигают максимальных. В мягких тканях моллюсков, собранных на акватории озера Бол. Агардяш, отмечена наибольшая аккумуляция свинца и кобальта.

Необходимо отметить, что типоморфные для Карабашского медеплавильного производства элементы медь и цинк находятся в начале ряда из 10 исследуемых поллютантов, а типоморфный свинец – в его середине. Это обусловлено как степенью их биофильности, так и концентрацией в окружающей среде. Элементы, необходимые организму брюхоногих в микродозах и находящиеся в окружающей среде в микрокопических количествах (кадмий, кобальт и молибден), находятся в конце выявленного ряда аккумуляции.

Распределение тяжёлых металлов по уровню аккумуляции в мягких тканях моллюсков для обследованных водоёмов выглядит следующим образом:

– озеро Бол. Агардяш – $Mn > Zn > Fe > Cu > Pb > Ni > Cr > Cd > Co > Mo$;

– залив Байк – $Mn > Zn > Cu > Fe > Ni > Pb > Cr > Cd > Co > Mo$;

– залив Биртильды – $Zn > Mn > Cu > Fe > Ni > Pb > Cr > Cd > Co > Mo$;

– Пиявочное болото – $Mn > Cu > Zn > Fe > Ni > Pb > Cr > Cd > Co > Mo$.

Краскел-тест показал, что статистически значимые отличия между рангами концентрации тяжёлых металлов в мягких тканях в разных биотопах не об-

наруживаются (уровень значимости в анализе превышает 0,05), соответственно, в разных биотопах одни и те же тяжёлые металлы занимают сходные позиции в ряду аккумуляции мягкими тканями, наблюдается биогеохимическая однородность в качественном плане.

Высокое содержание железа и марганца в раковинах зафиксировано во всех биотопах. Наибольшая концентрация железа в раковине была обнаружена в заливе Биртильды, при этом содержание марганца, цинка, свинца, меди и хрома наименьшее по сравнению с другими биотопами. Концентрация никеля в раковинах прудовиков залива Биртильды в 5–10 раз превышает значения других биотопов. Аккумуляция марганца и свинца наибольшая в раковинах залива Байк, а медь, хром и молибден выделяются по полученным значениям в раковинах из Пиявочного болота.

Большие концентрации железа в окружающей среде уральской железорудной провинции являются причиной первенства этого элемента в ряду содержания металлов в раковине. В частности, подтверждением этого служит темный окрас поверхности всех обнаруженных раковин. Биохимически важный марганец находится на втором месте по активности аккумуляции раковиной. Распределение типоморфных для Карабашского медеплавильного производства элементов существенно иное, нежели для мягких тканей. В первой половине ряда (третьим, а в озере-заливе Биртильды – пятым) стоит цинк; медь и свинец располагаются в середине или второй половине геохимического ряда накопления поллютантов. Это отражает роль типоморфных элементов в формировании вещества раковины. Замыкают ряд накопления для раковин прудовиков, как и для мягких тканей, молибден и кадмий.

Ряды аккумуляции тяжёлых металлов в раковине моллюсков для изученных биотопов следующие:

– озеро Бол. Агардяш – $Fe > Mn > Zn > Ni > Cu > Co > Cr > Pb > Mo > Cd$;

– залив Байк – $Fe > Mn > Zn > Ni > Pb > Co > Cu > Cr > Mo > Cd$;

– залив Биртильды – Fe > Ni > Mn > Co > Zn > Pb > Cu > Cr > Cd > Mo;

– Пиявочное болото – Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Co > Mo > Cd.

Как и для мягких тканей, для раковины Краскел-тест также не показал статистически значимых отличий между рангами концентрации тяжёлых металлов в разных биотопах (уровень значимости также превышает 0,05). Соответственно, несмотря на то, что ряды аккумуляции раковинной отличаются от рядов аккумуляции мягкими тканями, но в разных биотопах одни и те же тяжёлые металлы занимают сходные позиции и также наблюдается биогеохимическая однородность в качественном плане.

Рассматривая аккумуляцию тяжёлых металлов в целом в системе «вода – мягкие ткани – раковина прудовика» в обследованных точках, можно выделить следующие статистически значимые корреляции (табл. 2): между содержанием тяжёлых металлов в воде и их аккумуляцией прудовиком в мягких тканях, а также в системе мягкие ткани – раковина. При этом необходимо отметить, что в Пиявочном болоте и в оз. Бол. Агардыш обнаружена корреляция в накоплении тяжёлых металлов в системе «вода – раковина». Это объясняется тем, что поступление тяжёлых металлов также может идти путем сорбции на

Таблица 2 – Корреляция содержания тяжёлых металлов в воде, мягких тканях и раковине представителей семейства Lymnaeidae в обследованных водоёмах

Объект	залив Биртильды			залив Байк			Пиявочное болото			оз. Большой Агардыш		
	вода	мягкие ткани	раковина	вода	мягкие ткани	раковина	вода	мягкие ткани	раковина	вода	мягкие ткани	раковина
Вода	1,00	0,62	0,31	1,00	0,64	0,47	1,00	0,79	0,92	1,00	0,84	0,75
Мягкие ткани	0,62	1,00	0,53	0,64	1,00	0,73	0,79	1,00	0,84	0,84	1,00	0,78
Раковина	0,31	0,53	1,00	0,47	0,73	1,00	0,92	0,84	1,00	0,75	0,78	1,00

Примечание. Полу жирным выделены статистически значимые показатели ранговой корреляции Спирмена.

Таблица 3 – Коэффициенты накопления тяжёлых металлов мягкими тканями и раковинной представителей семейства Lymnaeidae в обследованных водоёмах

Металл	Залив Биртильды		Залив Байк		Пиявочное болото		Озеро Большой Агардыш	
	тело	раковина	тело	раковина	тело	раковина	тело	раковина
Cr	$5,88 \cdot 10^4$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^4$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$3,58 \cdot 10^2$	$7,67 \cdot 10^{-2}$	$5,51 \cdot 10^2$	$2,00 \cdot 10^{-2}$
Mn	$1,40 \cdot 10^6$	$7,04 \cdot 10^{-3}$	$7,62 \cdot 10^5$	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$3,72 \cdot 10^4$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$2,78 \cdot 10^4$	$3,15 \cdot 10^{-2}$
Fe	$1,06 \cdot 10^5$	7,91	$1,28 \cdot 10^5$	0,31	$2,40 \cdot 10^3$	0,57	$7,91 \cdot 10^2$	2,03
Co	$1,74 \cdot 10^4$	0,40	$1,22 \cdot 10^4$	0,22	$3,88 \cdot 10^3$	$9,46 \cdot 10^{-2}$	$5,69 \cdot 10^3$	$7,97 \cdot 10^{-2}$
Ni	$6,67 \cdot 10^3$	0,39	$5,59 \cdot 10^3$	0,10	$2,22 \cdot 10^3$	$3,81 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^3$	$7,88 \cdot 10^{-2}$
Cu	$5,91 \cdot 10^4$	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$6,08 \cdot 10^4$	$4,90 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^4$	$5,60 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^3$	$1,54 \cdot 10^{-3}$
Zn	$2,09 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^5$	$4,70 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^3$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$2,97 \cdot 10^2$	$1,31 \cdot 10^{-2}$
Mo	$4,36 \cdot 10^2$	$3,21 \cdot 10^{-3}$	$2,87 \cdot 10^2$	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$5,04 \cdot 10^2$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^2$	$1,79 \cdot 10^{-2}$
Cd	$4,05 \cdot 10^5$	$5,10 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^5$	$5,30 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^4$	$3,70 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^4$	$6,30 \cdot 10^{-4}$
Pb	$3,58 \cdot 10^5$	$2,23 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^5$	$7,03 \cdot 10^{-2}$	$8,01 \cdot 10^3$	$3,30 \cdot 10^{-2}$	$8,24 \cdot 10^2$	$3,59 \cdot 10^{-3}$

Выводы

Таким образом, впервые исследованы особенности аккумуляции тяжёлых металлов *Lymnaea fragilis* и *L. psilia* в зоне загрязнения аэральными выбросами Карабашского медеплавильного производства, заключающиеся в избирательном перераспределении металлов между мягкими тканями и раковинной.

В *Lymnaea fragilis* и *L. psilia*, обитающих в водоёмах, испытывающих влияние аэральными выбросов Карабашского медеплавильного производства, обнаружены тяжёлые металлы, типичные для данной геохимической провинции и характерного техногенного воздействия. Концентрации в мягких тканях *Lymnaea*

поверхности раковины, что связано с формой нахождения элементов в водоёме. Вероятно, в указанных водоёмах тяжёлые металлы представлены в нескольких формах.

Сравнивая коэффициенты накопления тяжёлых металлов в раковинах прудовиков по отношению к мягким тканям (табл. 3), необходимо отметить, что железо, кобальт и никель имеют высокую степень аккумуляции в раковинах по всем биотопам.

Стоит отметить высокий коэффициент накопления хрома в Пиявочном болоте, что связано с тем, что болото в прошлом использовали в качестве отстойника стоков с медеплавильного комбината. В заливе Байк Аргазинского водохранилища отмечены наибольшие коэффициенты накопления свинца и молибдена по сравнению с другими биотопами, что связано с особенностями распространения аэральными выбросов. При этом необходимо учитывать адаптивную реакцию прудовиков к техногенному загрязнению [10].

Аккумуляция элементов происходит как путем «вода → мягкие ткани → раковина», так и путем «вода → раковина», но в последнем случае необходимы условия для миграции элементов, связанные с формой нахождения элемента в воде.

fragilis и *L. psilia* по сравнению с физиологической нормой меди превышены в 9875 раз, цинка – в 2067 раз, железа – в 2418 раз; в раковине для меди превышение составляет 5,4 раза, цинка – в 4,25 раза, железа – в 1377 раз (*L. psilia* в Пиявочном болоте). Высокие концентрации тяжёлых металлов и низкое значение pH среды водоёма ведёт к гибели и полному отсутствию моллюсков данных видов.

Первенство по накоплению для мягких тканей и раковины удерживают марганец и железо, что обусловлено биофильностью этих металлов и их большими концентрациями в окружающей среде. Из типоморфных металлов Карабашского медеплавильно-

го производства цинк опережает другие по аккумуляции и в мягких тканях, и в раковине по причине тонкодисперсности и повышенной летучести аэральной составляющей, содержащей этот элемент. Медь находится в середине, свинец ближе к концу ряда накопления, который замыкают относительно мало значимые для живых организмов молибден, кобальт и кадмий. Аккумуляция тяжёлых металлов происходит по трём независимым направлениям: «вода → мягкие ткани», «вода → раковина» и «мягкие ткани → раковина». При этом для мягких тканей и раковины наблюдается свой ряд аккумуляции тяжёлых металлов, но эти ряды сходные для разных биотопов и наблюдается биогеохимическая однородность в качественном плане.

Для применения прудовиков *Lymnaea fragilis* и *L. psilia* в качестве индикатора загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами необходимо учитывать, что:

– более биофильный марганец накапливается преимущественно в мягких тканях моллюсков, несколько менее биофильное железо – в раковине, преимущественно в её поверхностных слоях;

– по аккумуляции в системе «вода → мягкие ткани → раковина» типоморфных для Карабашского медеплавильного производства металлов меди, цинка и свинца можно судить не только о степени загрязнённости этим металлом окружающей среды, но и степени его локальной биофильности;

– адаптивная реакция прудовиков на техногенное загрязнение корректирует накопление поллютантов в организме: в менее загрязнённых водоёмах оно выше (в данном исследовании – озеро-залив Байк), в более загрязнённых – ниже (Пиявочные болота).

Необходимо формирование базы данных фоновых концентраций тяжёлых металлов в моллюсках, обитающих в исследуемой геохимической провинции Южного Урала.

Список литературы:

1. Дідух Я.П. Основи біоіндикації. К.: Наукова думка, 2012. 360 с.
2. Цихон-Луканина Е.А. Трофология водных моллюсков. М.: Наука, 1987. 176 с.
3. Давыдова О.А., Климов Е.С., Выганова Е.С., Ваганов А.С. Влияние физико-химических факторов на содержание тяжёлых металлов в водных экосистемах. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 167 с.
4. Ушева Л.Н. Гистопатология аддуктора у гребешка *Mizuhopecten yessoensis* из загрязнённых районов залива Петра Великого Японского моря // Биология моря. 1999. Т. 25, № 5. С. 383–388.
5. Bigas M., Amiard-Triquet C., Dufort M., Poquet M. Sublethal effects of experimental exposure to mercury in European flat oyster *Ostrea edulis*: Cell alterations and quantitative analysis of metal // Biometals. 1997. Vol. 10, is. 4. P. 277–284.
6. Ушева Л.Н., Ващенко М.А., Дуркина В.Б. Гистопатология пищеварительной железы двустворчатого моллюска *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) из юго-западной части залива Петра Великого Японского моря // Биология моря. 2006. Т. 32, № 3. С. 197–203.
7. Шевцова С.Н., Бабенко А.С., Дромашко С.Е. Влияние сульфата меди на рост, выживаемость и Самарский научный вестник. 2019. Т. 8, № 3 (28)

уровень экспрессии металлотионеинов у пресноводного моллюска *Lymnaea stagnalis* // Труды БГУ. 2011. Т. 6, ч. 2. С. 99–109.

8. Безматёрных Д.М. Моллюски прудовик обыкновенный и прудовик яйцевидный как аккумулятивные индикаторы загрязнения пресных вод тяжёлыми металлами (на примере р. Барнаулки) // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2008. № 1 (5). С. 112–117.

9. Киричук Г.Е. Особенности накопления ионов тяжёлых металлов в организме пресноводных моллюсков // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42, № 4. С. 99–110.

10. Богатов В.В., Богатова Л.В. Аккумуляция тяжёлых металлов пресноводными гидробионтами в горнорудном районе юга Дальнего Востока России // Экология. 2009. № 3. С. 202–208.

11. Снегин Э.А. Содержание химических элементов в раковинах наземных моллюсков в условиях влияния горно-обогатительных комбинатов // Проблемы региональной экологии. 2009. № 1. С. 22–27.

12. Демина Л.Л., Галкин С.В., Дара О.М. Особенности накопления металлов в раковинах двустворчатых моллюсков глубоководных гидротермальных областей океана // Геохимия. 2012. № 2, С. 147–163.

13. Кожаметова А.Н., Бигалиев А.Б., Шаметов А.К. Биондикационное исследование аккумуляции нефтепроизводных тяжёлых металлов в организме гидробионтов казахстанской зоны Каспия // Фундаментальные исследования. 2015. № 2, ч. 1. С. 58–62.

14. Удачин В.Н., Дерягин В.В., Китагава Р., Аминов П.Г. Изотопная геохимия донных отложений озёр Южного Урала для оценки масштабов горно-промышленного техногенеза // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2009. № 3. С. 144–149.

15. Сотников В.В., Загитова И.М., Падалец А.М., Дерягин В.В. Некоторые результаты исследования озера Биртильды (Южный Урал) // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: мат-лы IV всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 19–21 мая, Челябинск. Челябинск: Край Ра. 2016. С. 85–89.

16. Дерягин В.В., Масленникова А.В., Дерягин А.В. Режим осадконакопления в озерах Серебры и Сырыткуль (Южный Урал) // Вестник Челябинского государственного университета, 2011. № 5 (220). Экология. Природопользование. Вып. 5. С. 24–30.

17. Аминов П.Г. Биогеохимия тяжёлых металлов при горнопромышленном техногенезе (на примере Карабашской геотехнической системы, Южный Урал): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2010. 17 с.

18. Хохуткин И.М., Винарский М.В., Гребенников М.Е. Моллюски Урала и прилегающих территорий. Семейство Прудовиковые Lymnaeidae (Gastropoda, Pulmonata, Lymnaeiformes) / под ред. И.А. Васильевой. Ч. 1. Екатеринбург: Гошицкий, 2009. 162 с.

19. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.

20. Снитько Л.В., Снитько В.П. Фитопланктон мелководного пресного озера Серебры в зоне импакта геотехнической системы (Южный Урал) // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 8–1. С. 51–54.

21. Девятова Е.В. Исследования малакофауны озера, испытывающего влияние медеплавильного производства // Актуальные вопросы экологии и природопользования: сборник трудов всерос. науч.-практ. конф., посв. памяти члена-корреспондента АН РБ, доктора биологических наук, профессора Миркина

Бориса Михайловича. Ч. 1 / отв. ред. С.А. Башкатов. Уфа: РИЦ БашГУ, 2017. С. 112–114.

Работа выполнена при финансовой поддержке сетевого гранта с Мордовским государственным педагогическим университетом 14–05/2019 от 04.06.2019.

ACCUMULATION OF HEAVY METALS BY FAMILY LYMNAEIDAE REPRESENTATIVES AS RESPONSE TO ANTHROPOGENIC POLLUTION CRITICAL LEVELS OF SOUTH URAL RESERVOIRS

© 2019

Deryagin Vladimir Vladislavovich, candidate of geographical sciences, associate professor of Geography and Geography Methodology Department
Nazarenko Nazar Nikolayevich, doctor of biological sciences, professor of Chemistry, Ecology and Chemistry Methodology Department
Devyatova Ekaterina Viktorovna, student of Natural Sciences and Technologies Faculty
South Ural State Humanitarian Pedagogical University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Abstract. The features of heavy metals accumulation by *Lymnaea fragilis* and *L. psilia* were researched for the aerate emission polluted area of Karabash copper-smelting manufacturing (Southern Ural). These features are concluded with selective redistribution of heavy metals between soft tissues and the shell of *Lymnaea*. The heavy metals accumulation takes place by three independent tendencies: «water → soft tissues», «water → shell» and «soft tissues → shell». The heavy metals content levels a thousand times exceed the physiological norm in soft tissues while in shell they exceed manifold. In the first place manganese and iron are accumulated while the cobalt, cadmium and molybdenum are finalizing the researched rank of accumulation. It has been ascertained that more biophil manganese are accumulated in mollusk soft tissues more than in other metals, while slightly less biophil iron is accumulated in shell, mainly in surface layers. For soft tissues and shell different ranks of heavy metals accumulation are observed, but these ranks are similar for different habitats, thus qualitative biogeochemical similarity is observed. The heavy metals accumulation in the system «water → soft tissues → shell» can help to estimate the extent of the metal environment pollution as well as local biophilicity of this metal. The adaptive response of pond snails to anthropogenic pollution is that there are more of them in less polluted reservoirs and less in more polluted reservoirs. It has been confirmed, that high heavy metals concentration and low pH level in reservoirs leads to death and absolute absence of these mollusk species.

Keywords: family Lymnaeidae; biological indicators; pollution accumulation by hydrobionts; pollution concentration and de-concentration by hydrobionts; heavy metals; adaptive answering; pollution of copper-smelting industry; aerate emissions; anthropogenic pollution; Southern Ural.

* * *

УДК 598.2: 598.292/294: 591.5 (571.54; 517.3)

DOI 10.24411/2309-4370-2019-13105

Статья поступила в редакцию 12.06.2019

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГНЁЗД ВРАНОВЫХ ДРУГИМИ ВИДАМИ ПТИЦ В БАЙКАЛЬСКОЙ СИБИРИ И МОНГОЛИИ

© 2019

Доржиев Цыдыпжап Заятуевич, доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии
Бадмаева Евгения Николаевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии
Даянжав Цогтбаатар, аспирант кафедры зоологии и экологии
Энхсайхан Ууганбаяр, аспирант кафедры зоологии и экологии
Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова (г. Улан-Удэ, Российская Федерация)
Саая Арияна Томур-ооловна, аспирант кафедры зоологии и экологии;
 младший научный сотрудник лаборатории естественных наук
*Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова (г. Улан-Удэ, Российская Федерация);
 Тувинский научный центр (г. Кызыл, Российская Федерация)*

Аннотация. В статье приводится видовой состав птиц-квартирантов врановых в Байкальской Сибири и Монголии. Обследовано более 700 гнезд восьми видов врановых птиц в Забайкалье, Прибайкалье и Монголии. Отмечено 133 случая использования гнезд пяти видов врановых (сороки, восточной черной вороны, ворона, грача и даурской галки) другими видами птиц. Гнезда мелких врановых не привлекают других птиц. Наиболее часто используются гнезда сорок, которые отличаются специфическим строением. Из восьми видов, использующих сооружения врановых для гнездования, амурский кобчик и ушастая сова являются облигатными квартирантами. Ближе к ним стоит пустельга, которая из всех гнездовых укрытий предпочитает гнезда сорок. Численность этих видов во многих местах определяется обилием сорок и ворон. В последние