

Реакция моллюсков луговых сообществ на выбросы Среднеуральского медеплавильного завода

А. В. НЕСТЕРКОВ

Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202
E-mail: nesterkov@i pae.uran.ru

Статья поступила 22.10.2012

АННОТАЦИЯ

Проведены количественные исследования населения моллюсков яруса травянистой растительности в 2006–2008 гг. на вторичных суходольных лугах в градиенте загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда Свердловской обл.). На территории с умеренным загрязнением общее обилие моллюсков снижено в 1,3 раза по сравнению с контрольными участками. В непосредственной близости от завода моллюски в травостое полностью исчезают. Причинами изменения структуры населения моллюсков могут быть токсический эффект тяжелых металлов в условиях подкисления среды, нехватка доступного Са вследствие вымывания его из верхних почвенных горизонтов, обеднение видового разнообразия и упрощение архитектуры лугового травостоя, вызвавшее модификацию гидротермического режима в травянистом ярусе. Сочетание данных типов воздействия, по-видимому, вызывает элиминацию моллюсков травяного яруса, которая не наблюдается в случае загрязнения среды только тяжелыми металлами.

Ключевые слова: наземные моллюски, травостой, промышленное загрязнение, медеплавильный завод, тяжелые металлы, кальций, Средний Урал.

Большая часть наземных моллюсков, встречаемых в ярусе травянистой растительности, может быть отнесена к группе стратохортофилов, т. е. ярусно-подвижных беспозвоночных, тесно связанных с травостоем, но совершающих периодические миграции в подстилочные горизонты [Лагунов, 1994]. Связь моллюсков одновременно с двумя экосистемными ярусами увеличивает их чувствительность к внешним воздействиям (в том числе и антропогенной природы) по сравнению с типичными хортобионтами. Так, в условиях загрязнения именно в подстилке, обычно обладающей естественной кислой реакцией, накапливается наибольшее количество поллютантов [Воробейчик, 2003а]. Наземных

моллюсков, как правило, рассматривают в качестве макроконцентраторов широкого спектра тяжелых металлов, обладающих эффективными механизмами их детоксикации и, следовательно, потенциально способных обитать на субстратах с повышенным их содержанием. Присутствие моллюсков неоднократно было отмечено вблизи металлургических предприятий [Hopkin, 1989; Rabitch, 1996; Fritsch et al., 2011], а также источников загрязнения других типов [Ireland, 1979; Zaldibar et al., 2008]. В то же время в луговом травостое вблизи Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) моллюски полностью отсутствуют. Этот факт был отмечен впервые в 1989 г. [Воробейчик и др., 1994] и

подтвержден позднее [Нестерков, Воробейчик, 2009]. Отсутствие аналогичных примеров в известных нам публикациях позволяет утверждать, что такой тип реакции на загрязнение в целом не характерен для данной группы. Необходимость интерпретации исчезновения моллюсков вблизи рассматриваемого медеплавильного завода обуславливает потребность в специальном исследовании.

Цель настоящей работы – выявить возможные причины исчезновения наземных моллюсков в травостое на наиболее загрязненных выбросами СУМЗ территориях.

Исследование проведено в районе Среднеуральского медеплавильного завода, расположенного на окраине г. Ревда Свердловской обл. СУМЗ действует с 1940 г. и считается одним из крупнейших источников промышленного загрязнения в России. Основные ингредиенты выбросов – газообразные соединения (SO_2 , HF и окислы азота), а также тяжелые металлы (Cu, Zn, Cd, Pb и др.), ассоциированные с пылевыми частицами.

Экотоксикологический профиль был заложен в западном направлении от СУМЗа, против направления господствующих ветров. Характер техногенной трансформации экосистем подробно описан ранее [Воробейчик и др., 1994]. Исследованные участки расположены в импактной (1 км от завода), буферной (4 км) и фоновой (30 км) зонах загрязнения в пониженных элементах рельефа на вторичных суходольных лугах, сформировавшихся на лесных полянах размером около 5000 м² в результате вырубki леса порядка 50 лет назад.

Флористический состав луговой растительности сильно различается в разных зонах нагрузки, что связано с исчезновением чувствительных видов разнотравья и замещением их злаками. В фоновой зоне луга разнотравные, доминируют бодяк разнолистный (*Cirsium heterophyllum* Hill.), манжетка (*Alchemilla* sp.), лабазник (*Filipendula* sp.), нивяник (*Leucanthemum vulgare* Lam.), василек фригийский (*Centaurea phrygia* L.), купальница европейская (*Trollius europaeus* L.). Растительный покров сомкнутый, многоярусный, с развитой архитектурой из ветвящихся и переплетающихся травянистых растений. В буферной зоне луга разнотравно-злаковые с доминированием полевицы тонкой (*Agrostis*

tenuis Sibth.), щучки дернистой (*Deschampsia caespitosa* Beauv.), тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.), бодяка разнолистного, чины луговой (*Lathyrus pratensis* L.). Характеристики растительного покрова сходны с фоновыми показателями (значительная сомкнутость, развитые ярусность и архитектура). В импактной зоне луга злаковые с абсолютным доминированием полевицы тонкой и незначительным участием щучки дернистой и горицвета (*Coronaria flos-cuculi* A. Br.). Растительный покров сильно разрежен, ярусность не выражена. На момент проведения исследований выпас скота и сенокос на всех участках отсутствовали.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал собирали в течение трех лет, каждый год – в три тура, приуроченных ко второй половине летних месяцев. В работе использовали модифицированный биоценометр Конакова – Онисимовой с квадратным основанием площадью 0,25 м². Учеты проведены на пробных площадках, расположенных в центральной части луговых участков, т. е. удаленных от границы леса. В каждой из зон нагрузки было размечено по три пробных площадки размером 50 × 50 м, расположенных на расстоянии 100–300 м друг от друга. Каждая из проб представляет собой результат однократной установки биоценометра на пробной площадке с последующим сбором всех попавших в него беспозвоночных. Травянистые растения, попавшие в биоценометр при его установке на пробной площадке, срезают и формируют пробу растительного материала, который анализировали отдельно. Места установки биоценометра на пробной площадке выбирали случайным образом, однако не ближе 5 м друг к другу. Подробнее конструкция биоценометра и методические аспекты сбора материала изложены ранее [Нестерков, Воробейчик, 2009]. На каждой из пробных площадок собрано по 10 проб за тур учета. Таким образом, за весь период собрано 810 проб (по 270 в каждый год) и 1917 экз. наземных моллюсков. Для проб растений (всего 810) измеряли общую воздушно-сухую массу, а также суммарную массу граминоидов (злаков и осок) с точностью 0,1 г. Математическая обработка включала непара-

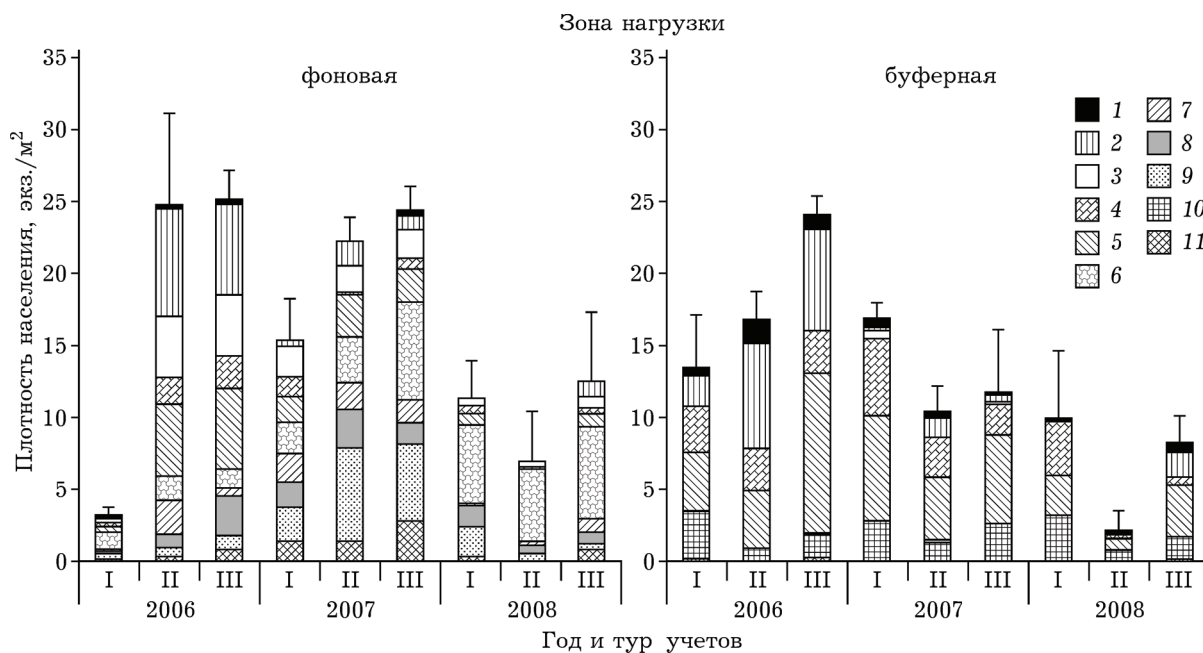
метрический многофакторный дисперсионный анализ (тест Шейнера – Рея – Хара (H) по [Sokal, Rohlf, 1995]) и непараметрический корреляционный анализ (коэффициент корреляции Спирмена). Структуру сообществ анализировали с помощью индексов сходства Сёренсена – Чекановского (Ksc) для количественных данных (форма b по [Песенко, 1982]). Анализ структуры сообществ моллюсков производили на уровне наиболее обильных видов (в сумме 91,18–99,35 % от общего обилия). Малочисленные виды моллюсков (*Discus ruderatus* (Feruss.), *Euconulus fulva* (Mull.), *Euomphalia strigella* (Drap.), *Punctum rugmaeum* (Drap.), *Vallonia costata* (Mull.), *Vitrina pellucida* (Mull.) и *Carychium* sp.) в данной работе специально не рассматривали. Наряду с экземплярами моллюсков, таксономическая принадлежность которых нуждается в уточнении, они были отнесены к группе “прочие”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В луговом травостое импактной зоны на грузки моллюски полностью отсутствуют. При переходе от фоновой зоны к буферной выяв-

лено статистически значимое снижение обилия моллюсков (с $16,22 \pm 1,87$ до $12,65 \pm 1,46$ экз./м² в среднем за три года; $H(1;405) = 5,10$; $p = 0,024$). Результаты трехлетних наблюдений свидетельствуют о выраженной межгодовой изменчивости числа моллюсков ($H(2;405) = 32,43$; $p < 0,001$), сильно модифицированной влиянием загрязнения ($H(2;405) = 7,55$; $p = 0,023$). Наименьшее количество отмечено в 2008 г., тогда как в 2006 и 2007 гг. показатели были сходны. В 2006 г. в буферной зоне отмечено увеличение числа моллюсков до значений, сравнимых с фоновыми (см. рисунок). Сезонная изменчивость в каждый год наблюдений выражалась в увеличении общего обилия на протяжении лета ($H(2;405) = 17,14$; $p < 0,001$). Характер сезонной динамики зависел от уровня загрязнения ($H(2;405) = 9,13$; $p = 0,010$) и года учета ($H(4;405) = 22,34$; $p < 0,001$).

Различия между фоновой и буферной зонами нагрузки отчетливо видны даже при поверхностном рассмотрении сообществ моллюсков на уровне наиболее богатых видов (табл. 1). При приближении к источнику выбросов изменился видовой состав: исчезли *Fruticicola fruticum* (Mull.) и *Succinea putris* (L.),



Динамика численности наиболее обильных видов моллюсков в разных зонах нагрузки (1 – *Arion subfuscus*, 2 – *Deroceras agreste*, 3 – *Cochlicopa* sp., 4 – *Euconulus fulva*, 5 – *Perpolita hammonis*, 6 – *Fruticicola fruticum*, 7 – *Columella columella*, 8 – *Succinea putris*, 9 – *Vertigo* sp., 10 – *Zonitoides nitidus*, 11 – прочие. I – III – туры учетов; учетная единица – площадка, $n = 3$; вертикальная линия – ошибка среднего для общего обилия)

Соотношение долей (%) наиболее обильных видов и средняя плотность населения моллюсков в разных зонах нагрузки в разные годы учета

Таксон	Зона нагрузки и год учета					
	фоновая			буферная		
	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.
<i>Arion subfuscus</i> (Drap.)	1,50	0,65	–	5,88	3,07	4,58
<i>Deroceras agreste</i> (L.)	26,07	4,95	3,46	30,39	5,46	9,15
<i>Cochlicopa</i> sp.	16,54	9,68	5,63	–	1,71	0,65
<i>Euconulus fulva</i> (Mull.)	8,27	3,66	3,03	16,67	26,28	22,22
<i>Perpolita hammonis</i> (Strom)	20,80	11,40	6,06	35,29	45,73	35,29
<i>Fruticicola fruticum</i> (Mull.)	7,77	19,57	54,98	–	–	–
<i>Columella columella</i> (G. Mart.)	5,76	8,82	4,33	0,25	–	–
<i>Succinea putris</i> (L.)	7,27	9,46	9,09	–	–	–
<i>Vertigo</i> sp.	3,76	23,01	9,96	–	0,34	–
<i>Zonitoides nitidus</i> (Mull.)	–	–	–	10,78	17,41	27,45
Прочие	2,26	8,82	3,46	0,74	–	0,65
Средняя плотность, экз./м ²	17,73 ± 4,09	20,67 ± 1,79	10,27 ± 2,30	18,13 ± 2,08	13,02 ± 1,88	6,80 ± 2,08

П р и м е ч а н и е. Прочерк – отсутствие вида; для плотности приведено среднее ± ошибка среднего; учетная единица – тур учета × площадка, $n = 9$.

появился *Zonitoides nitidus* (Mull.), не обнаруженный в травостое незагрязненных территорий. Однако данный вид гидрофилен и тяготеет к увлажненным участкам, которые имеются в понижениях рельефа на одной из пробных площадок буферной территории; его присутствие, таким образом, вряд ли связано с влиянием загрязнения. Доли большинства видов, встреченных на обеих рассматриваемых территориях, существенно различаются. На участках с фоновым уровнем загрязнения обильны *Columella columella* (G. Mart.), а также *Cochlicopa* sp. и *Vertigo* sp.; на загрязненных территориях – слизни *Arion subfuscus* (Drap.), а также *Euconulus fulva* (Mull.) и *Perpolita hammonis* (Strom). Доля слизней *Deroceras agreste* (L.) достаточно высока и сходна в обеих зонах техногенной нагрузки.

На примере медеплавильного завода в Финляндии было показано, что существенное снижение числа моллюсков вблизи источника загрязнения может быть обусловлено как прямыми, так и опосредованными причинами [Eeva et al., 2010]. К первой группе относится прямое токсическое действие промышленных поллютантов, преимущественно тяжелых металлов и окислов серы. В свою очередь, опосредованное действие поллютан-

тов проявляется через изменение среды обитания, т. е. лугового травостоя. Его деградация может привести как к изменению гидротермического режима в стациях, так и к обеднению кормовой базы моллюсков. Рассмотрим указанные причины в рамках настоящего исследования.

Тяжелые металлы и их соединения – наиболее изученные в отношении моллюсков техногенные поллютанты. Имеются многочисленные указания на способность моллюсков аккумулировать значительные концентрации тяжелых металлов в организме без видимого вреда для себя [Hopkin, 1989; Rabitsch, 1996]. Наземные моллюски ассимилируют порядка 60 % потребляемого с пищей Zn, 68 % – Cd, 43 % – Pb и 90 % – Cu; при этом свинец наиболее хорошо регулируется метаболически – его содержание в тканях всегда существенно ниже такового в пище [Laskowski, Hopkin, 1996]. Помимо возможности без вреда накапливать тяжелые металлы, моллюски способны активно выводить их с фекалиями [Brooks et al., 1992] и слизью [Ireland, 1979]; бактерии, обитающие в пищеварительном тракте, также могут снижать токсический эффект металлов [Simkiss, Watkins, 1990]. С другой стороны, для истребле-

ния моллюсков в сельскохозяйственных целях применялись препараты на основе Cu, Sn и Zn. Однако эффект в данном случае достигался за счет отказа моллюсков принимать в пищу обработанный субстрат и их дальнейшей гибели от голода [Hopkin, 1989]. При высоких концентрациях тяжелых металлов в рационе все же возможно нарушение развития и даже гибель моллюсков вследствие интоксикации. Данные такого рода были получены в лабораторных экспериментах при условии отсутствия возможности выбора кормового субстрата [Boyd, Jhee, 2005].

Приведенные примеры позволяют предположить, что наземные моллюски способны существовать на сильно загрязненных тяжелыми металлами территориях. Действительно, раковинные моллюски отмечены в 1 км от металлургического комбината в Англии [Hopkin, 1989], а также в 250 м от Pb/Zn – плавильного завода в Австрии [Rabitsch, 1996]. Во втором случае автором указаны средние концентрации тяжелых металлов в почве (мкг/г): Cu – 100,2; Pb – 2440,0; Cd – 23,6; Zn – 2743,0. В северной Франции, вблизи ликвидированного металлургического предприятия (концентрации в почве, мкг/г: Pb – 1201,6; Cd – 21,3; Zn – 1497,3) также обитают популяции раковинных моллюсков [Fritsch et al., 2011]. Отметим, что в почвах лугов импактной зоны СУМЗ концентрация Cu выше, но Pb, Cd и Zn – значительно ниже, чем в приведенных работах (табл 2). Аналогичные свидетельства имеются и отно-

сительно источников загрязнения другого типа. Так, слизи *Arion ater* L. были обнаружены в непосредственной близости от шахты по добыче Pb и Zn в Уэльсе [Ireland, 1979], а также вблизи цинковой шахты в Стране Басков (концентрации в почве (мкг/г): Cu – 26,18; Pb – 321,75; Cd – 14,26; Zn – 6981,99 [Zaldibar et al., 2008].

Рассмотренные примеры можно интерпретировать так, что токсическое действие тяжелых металлов само по себе не является причиной исчезновения моллюсков на импактной территории СУМЗ. Во всех приведенных публикациях рассмотрены промышленные предприятия, не производящие, в отличие от СУМЗ, первичную плавку металлов, а значит, не вызывающие подкисления почвы продуктами гидратации SO₂ и SO₃. Снижение pH почвы (см. табл. 2) приводит к повышению растворимости солей тяжелых металлов и увеличению их подвижности в абиотических средах. Это, в свою очередь, ведет к взаимодействию компонентов выбросов и усилению их токсического действия на все компоненты биоты [Воробейчик, 2003б]. Кроме того, для наземных моллюсков важно увеличение подвижности Ca в подкисленных средах и его выщелачивание из верхних почвенных горизонтов. Показано, что на фоновой территории содержание Ca в подстилке составляет 45 мг-экв/100 г почвы, на буферной – 31, тогда как в импактной зоне СУМЗа – только 14 [Кайгородова, Воробейчик, 1996]. Кальций – основное вещество раковины, и при нехватке его в почве обилие

Т а б л и ц а 2

Содержание подвижных форм тяжелых металлов и pH в верхнем (0–5 см) слое почвы луговых участков в разных зонах нагрузки

Показатель	Зона нагрузки		
	фоновая (n = 15)	буферная (n = 20)	импактная (n = 25)
Концентрация, мкг/г:			
Cu	22,98 ± 0,85	376,10 ± 36,53	827,55 ± 35,72
Pb	21,59 ± 1,03	127,23 ± 16,87	288,04 ± 15,97
Cd	0,79 ± 0,03	2,55 ± 0,17	2,78 ± 0,19
Zn	27,74 ± 1,50	62,49 ± 3,46	87,44 ± 3,47
pH _{водн}	5,42 ± 0,03	5,60 ± 0,17	5,16 ± 0,02

П р и м е ч а н и е. Металлы экстрагированы ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8; образцы собраны в 1999–2000 гг. Приведено среднее ± ошибка среднего; учетная единица – образец, n – количество образцов. Данные предоставлены Е. Л. Воробейчиком (ИЭРиЖ УрО РАН).

моллюсков существенно сокращается [Wareborn, 1969]. Также Ca входит в состав гранул базальных клеток пищеварительной железы, отвечающих за депонирование широкого спектра тяжелых металлов, в том числе Zn, Cu и Pb [The biology..., 2001].

Любопытно, что хотя моллюски вблизи СУМЗ исчезают не только в травостое, но и в лесной подстилке [Воробейчик и др., 1994, 2007], в рационе птенцов импактной зоны они изредка попадают [Бельский и др., 1998]. По всей видимости, небольшие популяции отдельных видов (*Discus ruderratus* (Feruss.) и *Perpolita hammonis* (Strom)) все же могут существовать вблизи завода. Это свидетельствует о том, что по крайней мере для ряда видов следует говорить не о полном исчезновении, а о снижении численности до крайне низких значений, при которых обнаружение стандартными методами затруднено.

Усиление токсического действия тяжелых металлов на фоне подкисления среды негативно отображается на всех компонентах биоты [Воробейчик и др., 1994]. Помимо наземных моллюсков, вблизи СУМЗ полностью исчезает целый ряд таксонов беспозвоночных: в составе почвенной мезофауны – Lumbricidae, Enchytraeidae, Diplopoda и Geophilidae

[Воробейчик и др., 1994, 2007]; в ярусе травостоя – Coreidae и Phalangidae [Золотарев, 2009; Нестерков, 2009].

Вторая возможная причина исчезновения моллюсков связана с модификацией среды обитания вследствие техногенного загрязнения. Известно, что видовой состав, разнообразие и структурная организация травянистой растительности являются основными детерминантами структуры и разнообразия населения беспозвоночных [Woodcock, Pywell, 2010]. На незагрязненных участках нами отмечено 54 вида травянистых растений, в буферной зоне нагрузки – только 46. Доля граминоидов (злаков и осок) возросла с $27,8 \pm 2,5 \%$ (в среднем за три года учетов) в фоновой зоне до $43,8 \pm 2,6 \%$ в буферной; при этом значения надземной фитомассы на рассматриваемых территориях были сходны ($265,65 \pm 13,62$ и $280,63 \pm 14,72$ г/м² соответственно). Показательно, что в импактной зоне (1 км от источника выбросов), где моллюски не были обнаружены, в луговом травостое представлено всего четыре вида растений; доля граминоидов составила $98,8 \pm 0,4 \%$, а общая фитомасса оказалась снижена в 1,6 раза по сравнению с фоновыми значениями ($166,33 \pm 9,12$ г/м²). Таким образом, выз-

Т а б л и ц а 3

Корреляция общего обилия моллюсков и фитомассы луговых растений в разных пространственных и временных масштабах

Год	Фракция травостоя	В отдельных зонах нагрузки		Во всем регионе
		фоновая	буферная	
2006	Граминоиды	-0,03	-0,17	-0,08
	Неграминоиды	0,73*	0,35	0,56*
	Все растения	0,55	0,09	0,40
2007	Граминоиды	0,34	-0,25	-0,38
	Неграминоиды	0,59	-0,37	0,44
	Все растения	0,68*	-0,4	-0,08
2008	Граминоиды	-0,38	-0,82**	-0,55**
	Неграминоиды	0,42	0,55	0,45
	Все растения	0,02	-0,42	-0,23
За весь период	Граминоиды	-0,22	0,07	-0,19
	Неграминоиды	0,63***	0,48*	0,58***
	Все растения	0,32	0,44*	0,34**

П р и м е ч а н и е. Уровень значимости: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$; учетная единица – пробная площадка (в отдельных зонах нагрузки: в отдельные годы $n = 9$, за весь период $n = 27$; во всем регионе: в отдельные годы $n = 18$, за весь период $n = 54$).

ванное загрязнением изменение структуры сообществ травянистых растений на лугах выражено очень четко.

На уровне общего обилия моллюсков обнаружена прямая корреляция с общей фитомассой и фитомассой растений, не относящихся к злакам и осокам; с фитомассой граминоидов корреляция обратная (табл. 3). В масштабе региона исследования в течение всего рассмотренного периода отчетливо выражена прямая корреляция с неграминоидной фракцией травостоя и общей фитомассой. Связь с граминоидами проявляется в отдельные годы исследования и при рассмотрении отдельных зон нагрузки и носит обратный характер.

Изменения в луговом травостое в окрестностях СУМЗа описаны достаточно хорошо [Воробейчик и др., 1994; Хантемирова, 2004]. Сходная ситуация отмечена в загрязненных тяжелыми металлами (Cu и Cd) луговых экосистемах Англии, где на территории с наибольшим уровнем поступления поллютантов в травостое доминировали виды родов *Agrostis* и *Festuca* [Hunter et al., 1987]. Увеличение доли граминоидов с их вертикально-линейной организацией, слабо выраженным ветвлением стебля и узкими листовыми пластинками должно оказывать существенное влияние на пространственную организацию яруса травянистой растительности. Результатом в этом случае станет исчезновение многоярусных структур из переплетенных побегов и листьев, создающих развитое трехмерное пространство. Сложная архитектура растительности препятствует свободному движению воздуха, что создает градиент микроклиматических условий. Резонно предположить, что в травостое с упрощенной архитектурой, состоящем преимущественно из злаков и осок, колебания температуры и влажности будут более выраженными. Между тем в степных экосистемах, характеризующихся близкими к описанным условиями, режим увлажнения в травостое (наряду с таксономическим разнообразием растений) является важнейшим фактором, определяющим структуру сообществ беспозвоночных [Wenninger, Inoue, 2008]. Необходимо отметить, что характер режима увлажнения определяет многие аспекты жизнедеятельно-

сти наземных моллюсков, в частности их точные миграции в ярусе травянистой растительности [Мельниченко, 1936]. Возможно, именно с этим связан обратный характер корреляции обилия моллюсков и фитомассы граминоидов: увеличение доли злаков и осок ведет к упрощению архитектуры травостоя, что делает условия увлажнения менее благоприятными для моллюсков. Это предположение косвенно подтверждает преимущественно прямой характер связи обилия моллюсков с общей фитомассой и фитомассой фракции неграминоидов. Можно предположить также, что неблагоприятный режим увлажнения в злаково-осоковых сообществах препятствует обитанию на загрязненных территориях слизней, для которых нехватка кальция менее критична в сравнении с раковинными моллюсками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа – часть комплексного исследования сообществ беспозвоночных, населяющих ярус травянистой растительности в зоне действия СУМЗ. Под влиянием загрязнения наземные моллюски полностью исчезают в травостое вблизи медеплавильного завода. На умеренно загрязненной территории по сравнению с фоновой снижено обилие моллюсков; видовая структура их сообществ в фоновой и буферной зонах нагрузки различается даже при поверхностном рассмотрении на уровне наиболее богатых видов. В обеих зонах нагрузки отмечена корреляция обилия моллюсков с фитомассой травостоя: положительная – с общей и фитомассой растений-неграминоидов; отрицательная – с фитомассой злаков и осок.

Токсическое действие выбросов СУМЗ на сообщества моллюсков может быть подразделено на прямое и опосредованное. Первое обусловлено сочетанным действием подкисления среды (за счет SO_2 и SO_3) и тяжелых металлов, а также вымыванием кальция из почвы, второе – обеднением видового состава лугового травостоя и увеличением в нем доли граминоидов по мере приближения к источнику выбросов. Сочетание двух типов воздействия, по-видимому, вызывает элиминацию моллюсков травяного яруса, которая

не наблюдается в случае загрязнения среды только тяжелыми металлами.

Работа завершена при финансовой поддержке программы развития ведущих научных школ (НШ-5325.2012.4), Президиума РАН (проект 12-П-4-1026) и Президиума УрО РАН (грант № 10-4-НП-300). Автор глубоко признателен М. Е. Гребенникову, установившему таксономическую принадлежность наиболее обильных видов моллюсков, а также Е. Л. Воробейчику и Е. А. Бельскому за предоставленные данные и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бельский Е. А., Хохуткин И. М., Гребенников М. Е. Моллюски в питании некоторых лесных птиц в южной тайге Урала // Рус. орнитол. журн. 1998. Экспресс-выпуск. № 44. С. 13–18.
- Воробейчик Е. Л. Реакция лесной подстилки и ее связь с почвенной биотой при токсическом загрязнении // Лесоведение. 2003а. № 2. С. 32–42
- Воробейчик Е. Л. Экологическое нормирование токсических нагрузок на наземные экосистемы: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2003б. 50 с.
- Воробейчик Е. Л., Ермаков А. И., Гребенников М. Е. и др. Реакция почвенной мезофауны на выбросы Среднеуральского медеплавильного комбината // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель. Екатеринбург, 2007. С. 128–148.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем: (локал. уровень), Екатеринбург: Наука, 1994, 280 с.
- Золотарёв М. П. Изменение таксономической структуры населения паукообразных-герпетобионтов в градиенте загрязнения от выбросов медеплавильного комбината // Экология. 2009. № 5. С. 378–382.
- Кайгородова С. Ю., Воробейчик Е. Л. Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // Там же. 1996. № 3. С. 187–193.
- Лагунов А. В. Стратиграфическая структура хортобионтного комплекса беспозвоночных животных в Ильменском заповеднике // Экологические исследования в Ильменском государственном заповеднике. Миасс, 1994. С. 25–42.
- Мельниченко А. Н. Сравнительно-фаунистический обзор наземных моллюсков Жигулевских гор Куйбышевского края и Западной области // К фауне Куйбышевского края. М.; Куйбышев: Куйбышев. краев. изд-во, 1936. С. 3–18.
- Нестерков А. В. Реакция населения беспозвоночных – хортобионтов луговых сообществ Среднего Урала на выбросы медеплавильного производства: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2009. 20 с.
- Нестерков А. В., Воробейчик Е. Л. Изменение структуры населения беспозвоночных – хортобионтов под действием выбросов медеплавильного завода // Экология. 2009. № 4. С. 303–313.
- Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
- Хантемирова Е. В. К характеристике смен растительности импактной зоны СУМЗа // Экология промышленного региона и экологическое образование: материалы всерос. науч.-практ. конф. Нижний Тагил, 2004. С. 106–110.
- Boyd R. S., Jhee E. M. A test of elemental defense against slugs by Ni in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator *Streptanthus* species // Chemoecology. 2005. Vol. 15, N 3. P. 179–185.
- Brooks A. W., White K. N., Bailey S. E. R. Accumulation and excretion of aluminium and iron by the terrestrial snail *Helix aspersa* // Comp. Biochem. Physiol. C: Comparative pharmacology. 1992. Vol. 103, N 3. P. 577–583.
- Eeva T., Rainio K., Suominen O. Effects of pollution on land snail abundance, size and diversity as resources for pied flycatcher, *Ficedula hypoleuca* // Sci. Total Environ. 2010. Vol. 408. P. 4165–4169.
- Fritsch C., Coeurdassier M., Gimbert F. et al. Investigations of responses to metal pollution in land snail populations (*Cantareus aspersus* and *Cepaea nemoralis*) from a smelter-impacted area // Ecotoxicology. 2011. Vol. 20, N 4. P. 739–759.
- Hopkin S. P. Ecophysiology of metals in terrestrial invertebrates // Elsevier Appl. Sci. 1989. 366 p.
- Hunter B. A., Johnson M. S., Thompson D. J. Ecotoxicology of copper and cadmium in a contaminated grassland ecosystem. I. Soil and vegetation contamination // J. Appl. Ecol. 1987. Vol. 24. P. 573–586.
- Ireland M. P. Distribution of essential and toxic metals in the terrestrial gastropod *Arion ater* // Environ. Pollut. 1979. Vol. 20, N 4. P. 271–278.
- Laskowski R., Hopkin S. P. Accumulation of Zn, Cu, Pb and Cd in the garden snail (*Helix aspersa*): Implications for predators // Ibid. 1996. Vol. 91, N 3. P. 289–297.
- Rabitsch W. B. Metal accumulation in terrestrial pulmonates at a lead/zinc smelter site in Arnoldstein, Austria // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1996. Vol. 56, N 5. P. 734–741.
- Simkiss K., Watkins B. The influence of gut microorganisms on zinc uptake in *Helix aspersa* // Environ. Pollut. 1990. Vol. 66, N 3. P. 263–271.
- Sokal R. R., Rohlf F. J. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research, 3-th ed., New York: W.H. Freeman and Co., 1995. 888 p.
- The biology of terrestrial molluscs / ed. G. M. Barker. CABI Pub., 2001, 558 p.
- Wareborn I. Land molluscs and their environments in an oligotrophic area in Southern Sweden // Oikos. 1969. Vol. 20. P. 461–479.
- Wenninger E. J., Inouye R. S. Insect community response to plant diversity and productivity in a sagebrush-steppe ecosystem // J. Arid Environ. 2008. Vol. 72, N 1. P. 24–33.
- Woodcock B. A., Pywell R. F. Effects of vegetation structure and floristic diversity on detritivore, herbivore and predatory invertebrates within calcareous grasslands // Biodiversity and Conservation. 2010. Vol. 19, N 1. P. 81–95.

Zaldibar B., Cancio I., Soto M. et al. Changes in cell-type composition in digestive gland of slugs and its influence in biomarkers following transplantation

between a relatively unpolluted and a chronically metal-polluted site // Environ. Pollut. 2008. Vol. 156, N 2. P. 367–379.

Reaction of Mollusk Population to Emissions from the Middle Ural Copper Smelter

A. V. NESTERKOV

*Institute of Plant and Animal Ecology, UrB RAS
620144, Ekaterinburg, 8 March str., 202
E-mail: nesterkov@ipae.uran.ru*

Quantitative studies of the population of mollusks in the herbaceous layer were carried out during the years 2006–2008 in secondary dry meadows in the gradient of pollution with the emissions from the Middle Ural Copper Smelter (Revda, Sverdlovsk Region). The number of mollusks at the territory with moderate pollution is decreased by a factor of 1,3 in comparison with the reference regions. In the direct vicinity of the smelter, mollusks in the grass stand disappear completely. The reasons of the change of the structure of mollusk population may be the toxic effect of heavy metals under the conditions of acidification of environment, the lack of available Ca due to its removal from the upper soil horizons by washing out, depletion of the species diversity and simplification of the architecture of meadow grass stand, causing modification of the hydrothermal regime in the herbaceous layer. A combination of these types of action is likely to cause elimination of the mollusks of herbaceous layer, which is not observed in the case when the environment is polluted only with heavy metals.

Key words: terrestrial mollusks, grassland, industrial pollution, copper smelter, heavy metals, calcium, the Middle Urals.