**Напочвенные членистоногие темнохвойного леса после снижения выбросов медеплавильного завода: происходит ли восстановление сообществ?**

## Абстракт

## Ключевые слова

Aranei, Carabidae, Opliones, Средний Урал, медеплавильный завод, промышленное загрязнение, тяжелые металлы, восстановление, численность, разнообразие

**Keywords**

Aranei, Carabidae, Opliones, Middle Urals, copper smelter, industrial pollution, heavy metals, recovering, abundance, diversity, biodiversity

## Введение

Начиная с конца XX в большинстве стран происходит снижение промышленных выбросов в результате совершенствования технологий и/или сокращения объемов производства. Снижение техногенной нагрузки инициирует процессы восстановления экосистем импактных регионов. Понимание темпов и закономерностей этого процесса влияет на выбор оптимальных стратегий природопользования и рекультивационных мероприятий. Однако восстановление экосистем импактных регионов все ещё остаётся крайне слабо изученным несмотря на интерес к этой проблеме и её очевидную практическую значимость.

К настоящему времени опубликован ряд работ на тему восстановления экосистем после нарушающих воздействий, но единого представления об этом процессе и его темпах нет. По-видимому, скорость восстановления различается у разных групп организмов в разных типах экосистем и после различных типов воздействия (Burel et al., 2004; Jones, Schmitz, 2009; Воробейчик и др., 2014; Воробейчик, Нестеркова, 2015; Копцик и др. 2016; Kozlov et al., 2017).

Темпы восстановления после прекращения промышленного воздействия лучше всего изучены на примере разлива нефтепродуктов и в меньшей степени на примере добычи полезных ископаемых и воздействия электростанций (Jones, Schmitz, 2009). Данные по восстановительным сукцессиям сообществ эпигеобионтов после прекращения промышленных выбросов немногочисленны и представляют результаты разовых работ на постиндустриальных территориях (~~Braun et al., 2004~~; Babin-Fenske, Anand, 2010; Niemeyer et al., 2012). Многолетние исследования на одних и тех же участках в период снижения промышленных выбросов единичны (Braun et al., 2004; Lövei, Magura, 2006).

Повышенный интерес к хищным напочвенным членистоногим, как объектам экотоксикологических исследований, обусловлен их высоким обилием и разнообразием в природе, а также большим вкладом в экосистемные функции (Brussaard et al., 1997; Lavelle et al., 2006). Кроме того хищные членистоногие чувствительны к абиотическим и биотическим факторам (Thiele, 1977; Niemelä et al., 1992; Magura, 2002; Migliorini et al., 2004; Koivula et al, 1999; Magura et al., 2004), в том числе промышленному загрязнению, что позволяет рассматривать их как биоиндикаторы в широком диапазоне факторов (Boer, 1994; Paoletti, 1996; Avgın, Luff, 2010; Koivula, 2011; Zmudzki, Laskowski, 2012; Yang et al., 2016). Изменение обилия наземных беспозвоночных при нарушении среды обитания вследствие хронического токсического воздействия изучено достаточно полно, гораздо меньше данных о влиянии загрязнения на разнообразие и структуру их сообществ (Zvereva, Kozlov, 2010; Kozlov, Zvereva, 2011).

Восстановление экосистем после существенного сокращения промышленных выбросов наиболее полно изучено в окрестностях заводов цветной металлургии в Садбери (Sudbary) (Канада), Олькуш (Olkusz) (Польша) и Гузум (Gusum) (Швеция), г. Харьявалта (Финляндия) (Воробейчик, 2022). В этот перечень входят и окрестности Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ), где с 2010 года произошло значительное (в 7 раз) сокращение выбросов вследствие снижения объемов производства в совокупности с реорганизацией очистных сооружений (Воробейчик, Кайгородова, 2017). Многолетние исследования на этой территории показали медленное восстановление разнообразия и видового богатства травяно-кустарничкового яруса (Воробейчик и др., 2014; Трубина, 2020), обилия моллюсков в травостое (Нестерков, Гребенников, 2020), численности и трофической структуры крупных почвенных беспозвоночных (Воробейчик и др., 2019, 2020), обилия мелких млекопитающих (Мухачева, 2021) на сильно загрязненном участке в окрестностях СУМЗ. Признаки восстановления отмечены у эпифитных лишайников (Михайлова, 2017, 2020), насекомых-филлофагов березы (Бельская, 2019), птиц-дуплогнездников (Бельский, Ляхов, 2021) и европейского крота (Воробейчик, Нестеркова, 2015). Реакция эпигеобионтных беспозвоночных на загрязнение изучается с 1998 г. (Ермаков, 2004) вплоть до настоящего времени (Бельская, Зиновьев, 2007; Золотарев, 2009; Бельская, Золотарев 2009; Золотарев, Бельская, 2012; Бельская, Золотарев, 2017). Мониторинг обилия и разнообразия эпигеобионтов, проводимый с 2005 г. на 2 стационарных участках елово-пихтового леса с использованием ловушек, равномерно расположенных на площади около 0.4 га, позволяет проследить динамику восстановления их сообществ после снижения выбросов в биотопах с разной степенью деградации исходных местообитаний.

**Цель работы** – анализ динамики обилия и разнообразия модельных групп (эпигеобионтных жужелиц и паукообразных) на начальных этапах восстановления лесных экосистем после снижения выбросов СУМЗ (2005 и 2018 гг.). Исходя из полученных ранее данных о восстановлении сообществ других модельных объектов в районе исследования, (ссылки выше), мы ожидаем увидеть признаки восстановления сообществ напочвенных членистоногих.

## Методика

### ~~Регион исследования и условия среды~~

Исследование проведено на 2 стационарных участках в окрестностях СУМЗ в период относительно высоких выбросов (около 27 тыс. т/год, 2005 г.) и через 8 лет после их сокращения в 2010 г. до минимума (порядка 3 тыс. т/год). Участки расположены в массивах коренного елово-пихтового леса, типичного для района исследования (фоновый в 20 км на запад от завода, импактный – в 2 км на юго-запад) и различались по степени деградации лесных экосистем, вызванной хроническим загрязнением. По данным 2010 г. концентрация подвижных форм тяжелых металлов (мкг/г сухого веса) на импактном участке в среднем превышала фоновый показатель для Cu в 86.4 раза, Pb – в 35.2, Cd – в 10.6, существенно увеличивалась и кислотность подстилки (Сморкалов, Воробейчик, 2011). В сравнении с контролем, была ниже высота, сумма площадей сечения деревьев, проективное покрытие древостоя и травяно-кустарничкого яруса (подробнее см. Belskaya et al., 2017). Согласно данным метеостанции города Ревда, средняя температура воздуха в 2005 г. составляла 13.1 °С в мае и 15.4 в августе, в 2018 г. 8.9 и 14.9 °С соответственно.

### ~~Протокол сбора материала~~

Беспозвоночных учитывали почвенными ловушками Барбера (пластиковые стаканы с диаметром горловины 8.5 см, фиксатор – 3 % уксусная кислота). На каждом участке расположена площадка 60×60 м покрытая сетью ловушек в узлах регулярной сетки 7 × 7 через 10 м (всего 49 ловушек). Места установки ловушек в оба года совпадали. Отловы проводили 2 раза за сезон в периоды высокой активности весеннее-летних и осенних видов: в 2005 г. 23–26 мая и 1–4 августа; в 2018 г. 24–29 мая и 2–7 августа. В оба года визуально определяли проективное покрытие древо- и травостоя на исследуемых участках. Определение проводили возле каждой ловушки на площадках 5×5 м для древостоя и 2×2 м для травостоя. Ловушка находилась в центре площадки.

За два года отловлено и проанализировано 2989 имаго жужелиц, 1223 имаго пауков и 243 сенокосцев. В лабораторных условиях проводили видовую идентификацию материала, используя ключи по жужелицам (Крыжановский,1965), паукам (Nentwig et al., 2021) и сенокосцам (Червизов, 1979; Фарзалиева, Есюнин, 2000а, 2000б), а также эталонные коллекции музея ИЭРиЖ УрО РАН. Номенклатура таксонов пауков указана по каталогу пауков мира (WSC, 2021), сенокосцев по Y. Jong с соавторами (2014) и J. Martens (2014), жужелиц по О.Л. Крыжановский с соавторами (Kryzhanovsky et.al, 1955).

### ~~Источники данных по свойствам видов~~

**Экологические особенности паукообразных** устанавливали по характеристикам видов пауков и сенокосцев для фауны Урала и сопредельных территорий (Фарзалиева, Есюнин, 1999; Ухова, Есюнин, 2009; Есюнин, 2015; Sozontov, Esyunin, 2021). По способу добывания пищи паукообразных разделили на четыре группы (табл. 1): использующие (воронкопряды, кругопряды, тенетники), не использующие сети (засадники, охотники) и падальщики-охотники (исключительно сенокосцы). Отдельно выделена группа «тенетники-бродячие охотники» как смешанный тип, единственным представителем которой является доминант *Allomengea scopigera* (Grube, 1859); молодые особи этого вида для ловли добычи строят тенета, а взрослые становятся бродячими охотниками (Есюнин, 2015). По ярусному распределению в биотопе выделены группы эпигео- и стратобионтов; обитатели травянистого, кустарникового и древесного ярусов отнесены в группу «прочие». Относительно влажности выделили гигро-, мезо- и ксерофильные виды. По биотопической приуроченности виды объединены в 3 группы: лесные, эвритопные (лесо-луговые), открытого местообитания (луговые). Размерные характеристики с учетом половых различий взяты из сводки «Spiders of Europe» (Nentwig et al., 2021). По длине тела (головогрудь + брюшко) пауков разделили на 3 размерные группы: мелкие (1–4 мм), средние (4–8) и крупные (8–12 и более). Характеристики всех учтенных видов паукообразных приводятся в Приложении 1.

**Экологические особенности жужелиц** почерпнуты из сводки по фауне Урала (Воронин, 1999), с укрупнением категорий в ряде случаев (табл. 1). По типу питания различали облигатных хищников (зоофаги) и растительноядные виды на стадии имаго (миксофитофаги). Выделили три группы видов по биотопической преференции: лесная (лесные, лиственно-лесные и лесо-болотные виды), эвритопная (лесо-луговые) и открытого местообитания (луго-полевые). По отношению к влажности различали гигро-, мезо- и ксерофильные виды. В качестве характеристики размера особи использовали сумму длины переднеспинки и усредненной длины обоих надкрылий. Средние размеры для каждого вида определяли по 5 самкам и 5 самцам, для 10 редких и единичных видов – по меньшему количеству особей (Бельская, Золотарев, 2017). Виды разделили на 3 размерные группы: мелкие (менее 9 мм), средних размеров (9–11 мм) и крупные (более 11 мм). Характеристика видов по локомоции составлена по литературным источникам (Ribera et al, 1999; Matalin, 2003; Homburg et al., 2013). Базируясь на классификации Ф. Хендрикс с соавторами (Hendrickx et.al, 2009) выделены три группы по степени мобильности: низкая (бескрылые и с неразвитой крыловой мускулатурой, передвигающие по поверхности почвы), умеренная (ди- и полиморфные и длиннокрылые, у которых часть особей способна к полету), высокая (длиннокрылые с функционирующей крыловой мускулатурой, хорошо летающие). Характеристики всех учтенных видов жужелиц приводятся в Приложении 2.

### ~~Анализ данных~~

Единицей учета во всех случаях была линия из 7 ловушек. Доминирующими считали виды, относительное обилие которых в уловах составляло 5% и выше. При анализе видовой и экологической структуры сообществ использовали как данные абсолютного обилия видов, так и соотношение их долей. В качестве показателя обилия использована динамическая плотность, нормированная до количества особей на 100 лов.-сут. По причине значительных различий в обилии членистоногих, в качестве показателя видового богатства использовали не только наблюдаемое число видов (S), но и интерполированное до 100 особей в пробе (S’) (Chao et al., 2014) средствами пакета iNEXT v. 2.0.20 (Hsieh et al., 2020). Видовая структура сообществ была визуализирована ординацией по методу главных координат (PCoA, пакет ape v. 5.5 (Paradis, Schliep, 2019) на основе расстояния Брея-Кёртиса, рассчитанного в пакете vegan 2.5-7 (Oksanen et al., 2020). Величину эффекта рассчитывали как логарифм отношения откликов (Pustejovsky, 2018) функцией LRRi пакета SingleCaseES v. 0.5.0 (Pustejovsky et al., 2021), в тексте работы обсуждаются только статистически значимые эффекты, если не указано иное. Лепестковые диаграммы (spider chart) готовили при помощи пакетов fmsb v. 0.7.1 (Nakazawa, 2021), все прочие иллюстрации – средствами пакета ggplot2 v. 3.3.5 (Wickham, 2016). На всех этапах преобразования данных широко использовали функции коллекции пакетов tidyverse 1.3.1 (Wickham et al., 2019). Расчёты реализованы в среде программирования R v. 4.1 (R Core Team, 2022). Код и исходные данные размещены на репозитории GitHub по адресу: <https://github.com/ANSozontov/Revda_2022>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### **Arachnida**

Всего на двух участках за два года обнаружено 83 вида паукообразных (78 видов пауков, 5 видов сенокосцев), из них 54 вида на фоновом и 60 на импактном. Обилие паукообразных было ниже в 2018 г. по сравнению с 2005 г. как на фоновом, так и на импактном участке (приложение 3). Тем не менее вблизи завода обилие паукообразных было значимо меньше, чем на удалении в оба года (рис. 1А) причем разница в 40% в 2005 г. усилилась до 60% в 2018 г (приложение 3).

Несмотря на такую существенную разницу в обилии, участки не различались ни по наблюдаемому (S), ни интерполированному числу видов (S’) как до, так и после сокращения выбросов.

Структура таксоцена паукообразных на удаленном от СУМЗа участке за 13 лет изменилась несущественно (рис. 2А, 2Б). В оба года доминантный комплекс, в первую очередь определяющий структуру таксоцена, составляли характерные для елово-пихтовых лесов виды пауков (*A. scopigera*, *T. insecta, A. paganus*) и сенокосцев (*L. ephippiatus,* *N. lugubre*) (табл. 2). Импактное сообщество паукообразных за такой же период изменилось радикальным образом. Расстояние между пробами импактного участка в 2005 и 2018 гг. было сопоставимо с расстоянием между пробами фонового и импактного участков. Данную закономерность отчетливо демонстрирует как ординация по относительным долям видов (рис. 2А), так и по абсолютному их обилию (рис. 2Б). Вариабельность населения паукообразных, отражаемая размером доверительных эллипсов, на импактном участке выше, чем на фоновом. В доминантный комплекс на импактном участке в 2005 г. входили пауки-ликозиды (*A. taeniata, P. lugubris, A. pulverulenta*) и в меньшей степени линифииды (*A. affinis, T. insecta, D. bidentata*) (табл. 2). В 2018 г. из доминантного комплекса ликозиды полностью вытеснены пауками-линифиидами – *C. brevis* и *T. mengei* – и сенокосцем *L. ephippiatus*. Все эти виды отмечались на импактном участке и ранее, однако в 2005 г. совокупно составляли не более 2% от общего обилия паукообразных.

В начале наблюдений (2005 г.) на импактном участке в угнетенном состоянии находились все группы пауков по ярусной (страто- и эпигеобионы) и биотопической (лесные и эвритопные) приуроченности, и почти все по типу охоты (тенетники, тенетники-охотники и падальщики), размеру (мелкие и средние) и отношению к влажности (мезофилы) (рис. 1А). Обилие гигрофилов не различалось между участками, а обилие охотников и крупных видов исходно было выше вблизи завода. Отмеченные различия во многом сохранились при учете соотношения обилий видов (рис. 3А). Однако доли всех групп по ярусной и биотопической приуроченности, а также мелких и тенетных форм на фоновом и импактном участке совпадали.

После снижения выбросов (2018 г.) сохранились прежние соотношения между участками: на фоновом динамическая плотность была выше у всех групп по биотопической приуроченности, эпигеобионтов, тенетников-охотников, мезофилов и средних по размеру пауков (рис. 1А). На участках вблизи завода по-прежнему преобладали бродячие охотники. Отрицательным остался эффект для падальщиков (сенокосцев), однако до снижения выбросов была обнаружена лишь одна особь. В двух зонах загрязнения выровнялось обилие стратобионтов, тенетников, мелких видов (ранее был отрицательный эффект) и крупных видов (ранее был положительный эффект). Обилие гигрофилов, сопоставимое в 2005 г., стало значимо ниже на загрязненной территории после сокращения выбросов. По соотношению долей (рис. 3А) экологические профили фонового и импактного участков существенно отличались, имея сопоставимые доли лишь для пауков-охотников, крупных, лесных и эвритопных видов. На фоновом участке преобладали тенетники-охотники, эпигеобионтны, падальщики и средние по размеру виды, на импактном – стратобионты и мелкие пауки. Доли мезофильных и гигрофильных групп паукообразных в двух зонах загрязнения имеют одинаковое значение и такое соотношение стабильно между годами.

### **Carabidae**

Всего на двух участках обнаружено 32 вида жужелиц, из них 24 вида на фоновом и 16 на импактном. Как и у паукообразных, обилие жужелиц вблизи завода было значимо меньше в оба года исследования (рис. 1, приложение 3). До снижения выбросов наблюдаемое и интерполированное видовое богатство было значимо ниже на импактном (S = 7.7; S’ = 7.2) участке по сравнению с фоновым (S = 12.3, S’ = 9.2). В 2018 г. различия между импактным (S = 5.7; S’ = 5.6) и фоновым (S = 13.9; S’ = 11.7) участками усилились (рис. 1).

Структура таксоцена жужелиц существенно различалась между фоновым и импактным участками в оба года исследований (рисунок 2В, 2Г). Комплексы жужелиц на фоновом участке в 2005 и 2018 гг. существенно различались, как следует из ординации на основании видовых обилий (рис. 2Г). Однако этот эффект не сохраняется, если учитывать не обилия видов, а только их соотношения (доли) (рис. 2В). Вариабельность структуры населения жужелиц, отражаемая размером доверительных эллипсов, выше на импактном участке (рис. 2В) или сопоставима с фоновым участком (рис. 2Г). В состав доминантного комплекса, вносящего наибольший вклад в наблюдаемые различия, повсеместно входили два вида *Trechus secalis* и *Pterostichus oblongopunctatus* (табл. 2), причем первый преобладал на фоновом участке, второй – на импактном. Высокого обилия на фоновом участке в оба года достигал и *P. urengaicus*. В 2018 г. в число доминантов на фоновом участке вошли *P. niger* и *C. caraboides*. На импактном участке состав доминантов включал *A. brunnea* (в 2005 г.) и *Calathus micropterus* (в 2018 г.).

Как и у паукообразных, в начале наблюдений обилие многих экологических групп жужелиц было значимо ниже на импактном участке в сравнении с фоновым. Это касалось всех групп, выделенных по размеру (мелкие, средние, крупные), ярусным (стратобионты и эпигеобионты) и биотопическим предпочтениям (лесные и эвритопные), по отношению к влажности (мезофилы и гигрофилы) (рис. 1Б). Также отрицательный эффект отмечался для зоофагов и бескрылых жужелиц. Обилие жужелиц с умеренной мобильностью не различалось между участками. Динамическая плотность миксофитофагов и высокомобильных видов была выше на импактном участке.

Обилие жужелиц различалось между зонами загрязнения в 2.1–2.6 раза (табл. 2), поэтому в дополнение к нему целесообразно рассмотрение соотношения долей (рис. 3Б). В 2005 г. были сопоставимы доли таких экологических групп как эпигеобионты и стратобионты. На контрольном участке преобладали эвритопные, гигрофильные, бескрылые, мелкие виды и присутствовали крупные. Группа зоофагов составляла основу населения на обоих участках, но на фоновом ее доля выше. Комплекс жужелиц на импактном участке отличался большими долями лесных, умеренно и высокомобильных, мезофильных и средних по размеру видов; крупные жужелицы не зарегистрированы.

После прекращения выбросов большинство экологических групп жужелиц по-прежнему имели меньшее обилие на импактном участке. Однако некоторые отрицательные эффекты исчезли (для мезофилов и лесных видов) или даже стали положительными (для маломобильных и средних по размеру видов). Обилие высокомобильных видов на импактном участке напротив – снизилось до уровня фонового (рис. 1Б).

По соотношению экологических групп население жужелиц стабильно во времени на обоих участках. Межгодовые изменения в структуре сообществ касаются размерных характеристик видов, их мобильности и яруса обитания. Так на фоновом участке доля видов с крупными особями и стратобионтов несколько увеличилась в 2018 г., а доля средних по размеру видов и эпигеобионтов, напротив, уменьшилась (рис. 3Б). Это привело к увеличению различий между участками. На импактном участке заметно некоторое уменьшение доли высокомобильных видов и миксофитофагов, в результате чего различия между участками сократились.

## ОБСУЖДЕНИЕ

### ***Обилие и разнообразие***

Мы не обнаружили существенного увеличения обилия модельных групп беспозвоночных на импактном участке в 2018 г. после прекращения выбросов. Динамическая плотность у исследуемых беспозвоночных на импактном участке по сравнению с фоновым была ниже оба года. Аналогичные выводы получены при исследовании паукообразных и жужелиц на находящихся под техногенным воздействием территориях. В субарктических сосновых лесах окрестностей г. Печенганикель и в еловых лесах окрестностей г. Мончегорска (Кольский п-ов) плотность пауков вблизи металлургических заводов ниже, чем на контрольном участке в первой локации в 6, во второй в 6–10 раз (Koponen, Koneva, 2005; Koponen, 2011). Снижение динамической плотности жужелиц на загрязненных участках по сравнению с контролем отмечено в окрестностях металлургических заводов в Польше, г. Олькуш (Skalski et al., 2010) и России, г. Тула (Gongalsky, Butovsky, 1999).

При этом снижение динамической плотности мы отметили и на фоновом участке. Одной из причин наблюдаемого эффекта могла быть более холодная погода в период учетов, и, как следствие, снижение активности членистоногих (Magura et al., 2004) и их попадания в ловушки. Во время майских учетов среднесуточные температуры в 2018 г. были ниже, чем в 2005 г. на 6.8 ºС, в августовские – на 2.1 ºС. К сожалению, на данном этапе невозможно разделить влияние погодного и токсикологического факторов на динамическую плотность паукообразных и жужелиц.

Мы ожидали увеличения видового богатства жужелиц, т.к. это один из немногих известных эффектов демутационной сукцессии на постиндустриальных территориях (Braun et al., 2004). Существенного увеличения разнообразия паукообразных и жужелиц на импактном участке по истечении девяти лет после почти полного прекращения выбросов обнаружить не удалось. Отмеченные нами различия между разнообразием модельных групп фонового и импактного участков совпадают с выводами исследований, проведенных на этой территории (Ермаков, 2004; Бельская, Зиновьев, 2007; Золотарев, 2009; Золотарев, Нестерков, 2013; Бельская, Золотарев, 2017). Видовое богатство пауков не различалось между участками во все годы исследования. Как наблюдаемое, так и интерполированное число видов жужелиц на импактном участке не только не увеличилось, но даже уменьшилось после прекращения выбросов, а на фоновом участке этот показатель остался без изменений.

### **Экол. св-ва. Arachnida**

Мы наблюдали снижение доли охотников, герпетобионтов, крупных и средних по размеру видов в 2018 г. на импактном участке вследствие резкого сокращения их обилия по сравнению с 2005 г. На смену Lycosidae в доминантный комплекс пришли виды Linyphiidae, что можно рассматривать как один из признаков восстановления. Ранее мы установили, что с увеличением загрязнения в сообществах пауков возрастает доля охотников семейств Gnaphosidae и Lycosidae (Золотарев, 2009; Золотарев, Бельская, 2012). Доминирование пауков сем. Lycosidae на сильно загрязненной территории отмечено и в окрестностях медно-никелевого комбината в Харьявалте (Koponen, Niemelä, 1995), а преобладание пауков сем. Linyphiidae рассматривается как индикатор ненарушенности территории (Jung et al., 2008). Кроме того, авторы последней из работ предполагают у сообществ наземных пауков невысокую чувствительность к умеренным уровням загрязнения тяжелыми металлами.

Представители семейств Lycosidae и Gnaphosidae предпочитают открытые местообитания, их долевое участие в биотопах с луговой растительностью значительно выше, чем в лесных биотопах (Есюнин, 2015; Созонтов, 2018). Именно через изменение растительности другие авторы объясняют специфичную структуру комплексов паукообразных в градиенте загрязнения промышленными выбросами (Koponen, Niemelä, 1995; Золотарев, Бельская, 2012). Вследствие загрязнения происходит угнетение древесного и травяно-кустарничкового яруса, что благоприятно для существования пауков-охотников.

Естественной причиной «линифиидизации» может быть восстановление растительного покрова после снижение промышленных выбросов. Однако, по состоянию на 2013 г. лесная растительность в зоне сильного загрязнения СУМЗ оставалась в угнетенном состоянии из-за сохранения высокой токсичности почвы и подстилки, большой мощности слоя подстилки, отсутствию достаточного количества диаспор, биотическим взаимодействиям и прочим факторам (Воробейчик и др., 2014; Воробейчик, Кайгородова, 2017). Не претерпела изменений площадь проективного покрытия, измеренная нами для травянисто-кустарничкового яруса и древесных крон в 2005 и 2018 гг. Первый показатель изменился с 5.7 до 5.5% (величина эффекта –0.05±0.66), второй – с 45 до 52% (величина эффекта 0.13±0.22). Учитывая это, мы не можем утверждать, что изменение соотношения функциональных групп и таксономической структуры паукообразных на импактном участке в 2018 г. связано со снижением выбросов.

Помимо изменений в структуре населения, заслуживает внимания появление в 2018 г. паука *C. clarus* на импактном участке, встречавшегося ранее только на незагрязненных территориях (Золотарев, личные данные), высокое обилие вблизи завода типично фонового вида сенокосца *L. ephippiatus*, а также десятикратное возрастание обилия на импактном участке всех взрослых сенокосцев (увеличение доли с 0.3 до 9.4%) и их ювенильных особей (увеличение на порядок) (приложение 3). В отличие от пауков, у сенокосцев пищеварение не полностью внешнее (Hillyard, Snkey, 1989), и они вместе с пищей могут поглощать частицы пыли и почвы, содержащие тяжелые металлы, а также хитиновые покровы, в которых насекомые депонируют соединения тяжелых металлов. Значимость сенокосцев как индиакторной группы подчеркивается особенностями их онтогенеза. Они откладывают кладки в почву, подстилку, отмершую растительность (Hillyard, Snkey, 1989), где яйца, непосредственно контактирующие с субстратом, подвержены токсикологической нагрузке. Кладки пауков же окружены коконом и субстрата не касаются даже у оседлых видов, т.к. находятся подвешенными в гнезде. Перечисленные выше изменения по отдельным таксонам могут указывать на начавшиеся восстановительные процессы изначальные предположения о восстановительных процессах в сообществе.

Комментарий к последнему абзацу от Е.А. Бельской: «*Это объяснение было бы логичным, если бы снижалась токсическая нагрузка. Следовало бы привести данные по токсичности подстилки в годы исследований. У меня и Максима таких данных нет. В статье Воробейчика с Кайгородовой (2017) показано снижение кислотности подстилки импактной зоны до фонового уровня, но в 2012 г. и по сравнению с 1999 г. Концентрации же металлов даже увеличились. У нас есть свои данные по кислотности подстилки в импактной зоне в 2004 г., но можно ли сравнивать наши данные с данными из приведенной статьи?*»

### **Экол. св-ва. Carabidae**

Известно, что в результате сукцессии на посиндустриальных территориях происходит увеличение среднего размера хищных жужелиц (Lövei, Magura, 2006). Мы также ожидали появления крупных видов жужелиц на импактном участке после прекращения выбросов. Наше предположение было основано на указании признаков восстановления в сообществах педобионтов для этой территории (Воробейчик и др., 2019). С продвижением дождевых червей в зону сильного загрязнения можно было бы ожидать появления здесь и видов крупных жужелиц, в рационе которых черви составляют существенную долю (Сергеева, Грюнталь 1990; Сергеева, Крючкова 1990; Грюнталь, Сергеева 1994). Но мы не обнаружили изменения размерной структуры комплексов жужелиц на импактном участке после снижения выбросов. Различия в обилии крупных жужелиц между фоновым и импактным участком сохранились и даже увеличились в результате повышения динамической плотности крупных видов на фоновом участке в 2018 г. Возможно, низкое обилие крупных жужелиц на импактном участке связано с малой доступностью их жертв. Черви обитают здесь в гниющих стволах упавших деревьев и под ними в основном в пойменных биотопах (Воробейчик и др., 2020). Активность же других беспозвоночных, пищевых объектов жужелиц, по-прежнему значительно ниже, чем на фоновом участке (Воробейчик и др., 2019; Воробейчик, Бергман, 2020). Через 8 лет после почти полного прекращения выбросов на импактном участке сохранялись типичные для находящегося под действием промышленного загрязнения сообщества жужелиц черты, а именно снижение обилия зоофагов, повышение обилия миксофитофагов (Ермаков, 2004; Бельская, Зиновьев, 2007), и практически полное отсутствие видов с крупными особями (Бельская, Золотарев, 2017).

Мы отметили некоторые изменения в соотношении функциональных групп жужелиц на импактном участке в 2018 г.: несколько сократились доли миксофитоагов и высокомобильных видов и увеличилась доля видов с низкой мобильностью. Однако сравнив их с масштабами перестроек в экологической структуре населения паукообразных, можно утверждать, что соотношение функциональных групп жужелиц остается стабильным. Различия в видовой структуре комплексов жужелиц на фоновом участке (рис. 2Г), где варьирование обилия было наиболее выражено у доминантных видов (табл. 1), на наш взгляд, можно объяснить межгодовой динамикой.

### **Заключение**

Хищные напочвенные членистоногие тесно связаны с условиями среды их обитания: состава почвы, влажности, мощности подстилки, видового состава и проективного покрытия растениями (Walsh et al., 1993; Antvogel, Bonn, 2001; Magura et al., 2008). Изменение параметров среды должно приводить к изменению, в первую очередь, структуры жизненных форм и экологических групп (Ribera et al., 2001; Gobbi, Fontaneto, 2008; Pizzolotto, 2009).

Ожидания положительных изменений динамической плотности модельных таксонов на участке вблизи завода не оправдались. В 2018 г. отмечено снижение обилия паукообразных и жужелиц, причем не только на импактном, но и на фоновом участке. Исходя из метеорологических данных, можно с уверенностью утверждать, что обилие напочвенных членистоногих было меньше в 2018 г. На обоих участках по причине более низких температур в период полевых работ. К сожалению, использованный метод отлова накладывает ограничения, вследствие которых учтенными оказываются и обилие животных, и их активность, напрямую зависящая от температуры окружающей среды.

Для комплексов жужелиц импактного участка характерно снижение обилия зоофагов и повышение обилия миксофитофагов по сравнению с фоновой территорией (Ермаков, 2004; Бельская, Зиновьев, 2007), а также практически полное отсутствие видов с крупными особями (Бельская, Золотарев, 2017). За период наблюдений соотношение жизненных форм и групп по биотопической преференции осталось довольно стабильным в сообществе жужелиц, что хорошо согласуется с отсутствием существенного улучшения состояния древесного и травяно-кустарничкового яруса на удалении 1 и 2 км от СУМЗ (Воробейчик и др., 2014). Таким образом, на примере жужелиц изначальное предположение о восстановлении напочвенных членистоногих не подтвердилось.

У паукообразных же структура населения претерпела некоторые изменения, явных предпосылок для которых не отмечено. Большинство отмеченных нами изменений, скорее всего, не связаны со снижением выбросов. Тем не менее, повышение обилия на импактном участке видов сенокосцев и пауков, характерных для незагрязненных территорий, и «линифиидизация» сообщества, наводит на мысль о начале восстановительных процессов в сообществе паукообразных. Для её проверки требуется продолжение мониторинга.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Метеоданные предоставлены Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации (г. Обнинск) и Свердловским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Екатеринбург).

## Иллюстрации

### Таблица 1. Экологические свойства видов и их обозначения

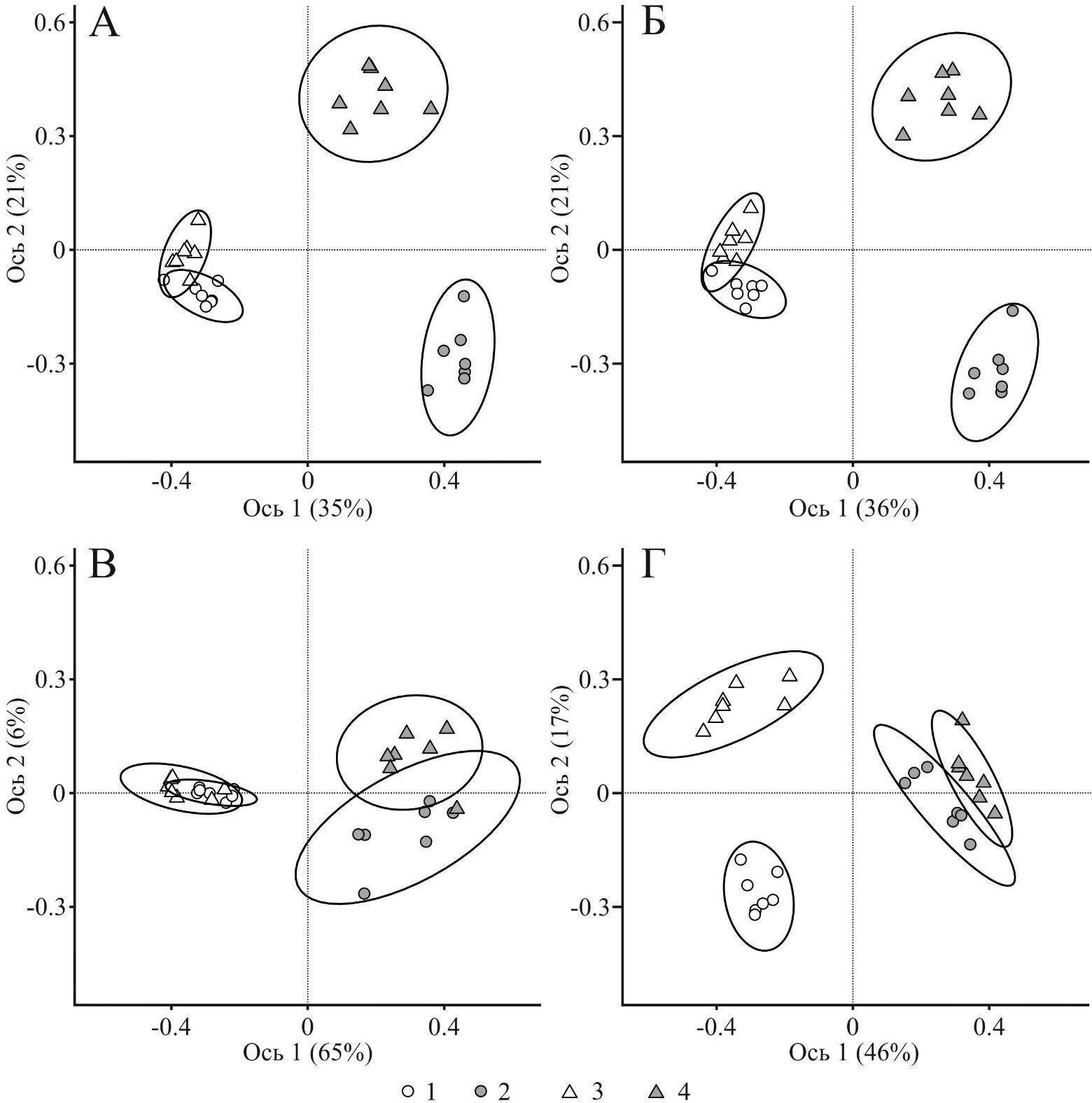
|  |  |
| --- | --- |
| **Свойства видов** | **Градации и обозначения** |
| **Общие** | |
| Отношение к влажности | * hyg – гигрофильный * mes – мезофильный * xer – ксерофильный |
|  |  |
| Ярус обитания | * LS – подстилка, почва (стратобионт) * SS – поверхность почвы (эпигеобионт) * HSD – растительность (хорто-, тамно- и дендробионт) |
|  |  |
| Биотопический преферендум | * F – лесной * E – эвритопный * Oh – открытого местообитания (луговой для пауков, луго-полевой для жужелиц) |
| **Arachnida** | |
| Размерный класс | * S – мелкие (до 3.0 мм) * M – средние (3.1–6.0 мм) * B – крупные (больше 6.1 мм) |
|  |  |
| Способ добычи пищи | * H – бродячий охотник * W – тенетник * HW – бродячий охотник-тенетник * SH – падальщик-охотник |
| **Carabidae** | |
| Размерный класс | * S – мелкие (до 9.0 мм) * M – средние (9.1–11.0 мм) * B – крупные (более 11.1 мм) |
|  |  |
| Степень мобильности (способность к расселению) | * lm – низкая * mm – умеренная * hm – высокая |
|  |  |
| Тип питания имаго | * Z – зоофаг * Mx – миксофитофаг. |

### Таблица 2. Состав доминантного комплекса паукообразных и жужелиц на участках с разным уровнем загрязнения выбросами СУМЗ.

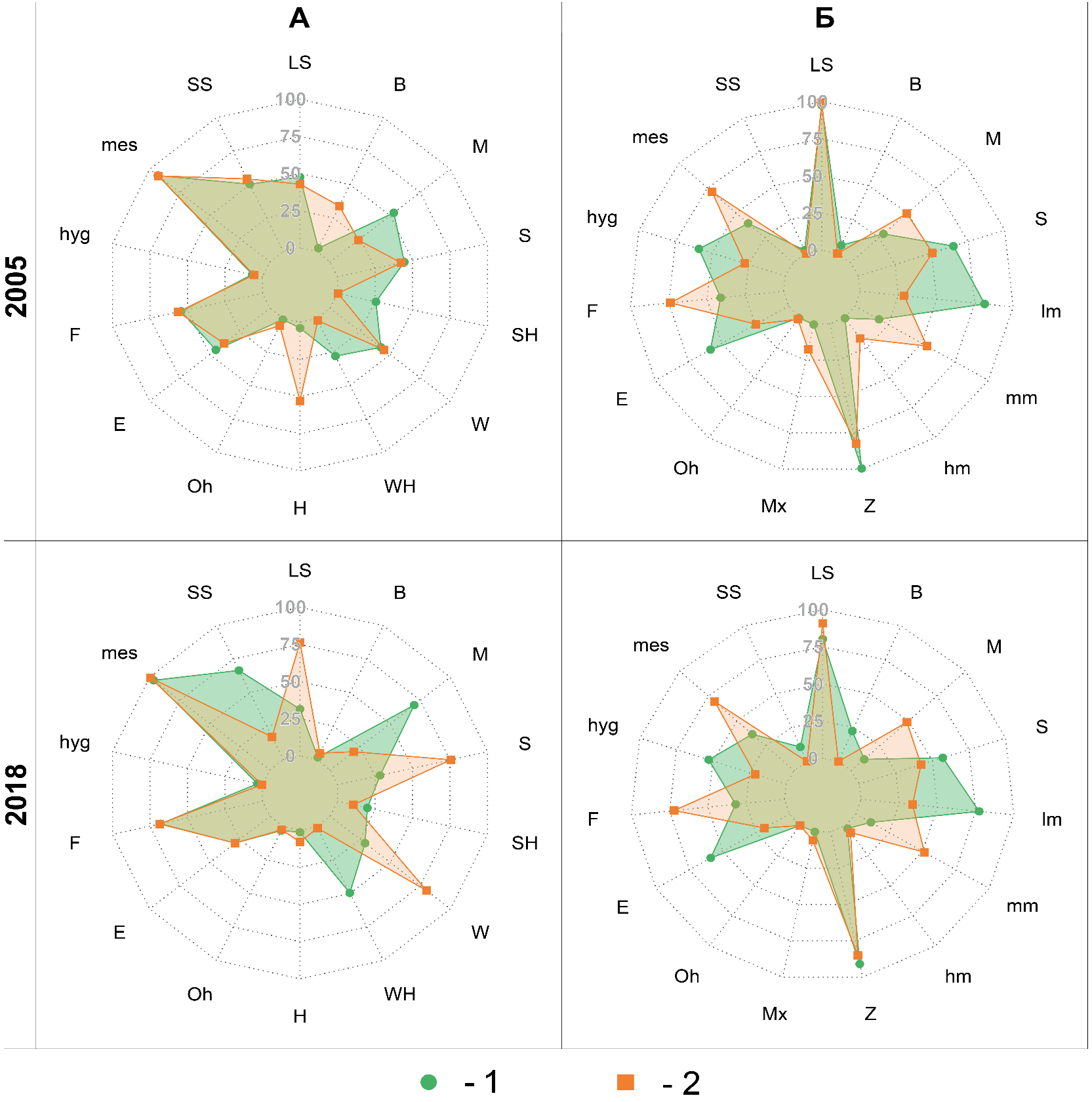
|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вид** | **2005** | | **2018** | |
| **fon** | **imp** | **fon** | **imp** |
| **Arachnida** | | | | |
| *Allomengea scopigera* | 76±23  28.1 | 3±5  1.6 | 117±27  49.6 | 1±2  1.2 |
| *Lacinius ephippiatus* | 39±17  14.6 | 1±2  0.4 | 32±23  13.7 | 11±13  10.6 |
| *Alopecosa taeniata* | – | 33±20  19.4 | – | 1±1  0.8 |
| *Ceratinella brevis* | 1±2  0.3 | 1±2  0.8 | 4±5  1.9 | 31±22  30.7 |
| *Asthenargus paganus* | 18±9  6.5 | – | 1±2  0.5 | – |
| *Nemastoma lugubre* | 18±7  6.5 | – | 8±6  3.3 | – |
| *Pardosa lugubris* | 3±6  1.3 | 17±7  10.1 | 0±1  0.2 | – |
| *Tapinocyba insecta* | 17±8  6.3 | 10±9  5.7 | 1±1  0.3 | 0±1  0.4 |
| *Tenuiphantes mengei* | – | 2±4  1.2 | 0±1  0.2 | 13±4  12.9 |
| *Agyneta affinis* | – | 12±8  7.3 | – | – |
| *Alopecosa pulverulenta* | – | 12±5  7.3 | – | – |
| *Diplocentria bidentata* | 1±2  0.3 | 10±6  6.1 | – | 4±3  4.0 |
| **Carabidae** | | | | |
| *Trechus\_secalis* | 490±124  57.8 | 71±32  22.3 | 192±48  53.6 | 33±13  19.8 |
| *Pterostichus oblongopunctatus* | 119±37  14.1 | 152±50  47.9 | 24±15  6.6 | 89±23  53.1 |
| *Pterostichus urengaicus* | 125±40  14.8 | – | 21±8  5.9 | – |
| *Amara\_brunnea* | 4±7  0.5 | 54±19  17.2 | – | 11±15  6.4 |
| *Pterostichus\_niger* | 6±6  0.7 | – | 37±13  10.2 | – |
| *Cychrus\_caraboides* | 4±6  0.5 | – | 34±6  9.5 | – |
| *Calathus\_micropterus* | 17±12  2.0 | 14±8  4.5 | 6±6  1.7 | 28±7  16.6 |

Примечание: В верхней строке – динамическая плотность, особей на 100 лов./сут., ± 95% доверительный интервал, в нижней – % от общего количества

### **Рис. 1.** Различия в структуре населения паукообразных (А) и жужелиц (Б) между импактным и фоновым участками за 2005 (В) и 2018 (Г) гг. По оси Х величина эффекта (effect size). По оси Y параметры разнообразия и обилия различных экологических групп, обозначенных как в табл. 1.



### Рис. 2 Ординация сообществ паукообразных (А, Б) и жужелиц (В, Г) по долям (А, В) и абсолютному обилию (Б, Г) видов. Участки и года: 1 – фоновый в 2005 г., 2 – импактный в 2005 г., 3 – фоновый в 2018 г., 4 – импактный в 2018 г.



### Рис. 3. Экологический профиль паукообразных (А) и жужелиц (Б) на фоновом (1) и импактном (2) участке, в %. Обозначения как в табл. 1.

## Библиография

см. отдельный xlsx файл

## Приложения

### Приложение 1. Экологические свойства паукообразных

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид | Свойства | | | | |
| Размерный класс | Ярус | Биото. преф. | Отн. к влажн. | Жизн. форма |
|
|
| *Agroeca brunnea* (Blackwall) | B (♀: 7.70) | SS | E | mes | H |
| *Agyneta affinis* (Kulczyn'ski) | S (1.75) | LS | E | mes | W |
| *A. conigera* (O.P.-Cambridge) | S (2.05) | LS | E | mes | W |
| *A. olivacea* (Emerton) | S (2.50) | LS | F | mes | W |
| *Allomengea scopigera* (Grube) | M (♂: 4.20; ♀: 4.75) | SS | F | mes | W |
| *Alopecosa aculeata* (Clerck) | B (♀: 9.7) | SS | F | mes | H |
| *A. pinetorum* (Thorell) | B (♂: 10.50; ♀: 12.00) | SS | F | mes | H |
| *A. pulverulenta* (Clerck) | B (♂: 7.00; ♀: 9.25) | SS | E | mes | H |
| *A. taeniata* (C.L. Koch) | B (♂: 8.50; ♀: 9.60) | SS | F | mes | H |
| *Anguliphantes angulipalpis* (Westring) | S (2.35) | LS | F | mes | W |
| *Antistea elegans* (Blackwal) | S (♂: 2.45) | LS | E | hyg | W |
| *Araneus sturmi* (Hahn) | M (♀: 5.25) | HSD | F | mes | W |
| *Asthenargus paganus* (Simon) | S (♂: 1.75; ♀: 1.95) | LS | E | mes | W |
| *Bathyphantes nigrinus* (Westring) | S (2.75) | LS | F | mes | W |
| *B. parvulus* (Westring) | S (2.15) | LS | F | mes | W |
| *Bolyphantes alticeps* (Sundevall) | M (3.75) | HSD | Oh | mes | W |
| *Centromerus arcanus* (O.P.-Cambridge) | S (♂: 2.00; ♀: 2.25) | LS | E | mes | W |
| *C. clarus* (L. Koch) | S (♂: 1.97) | LS | E | mes | W |
| *C. incilium* (L. Koch) | S (♂: 2.20) | LS | E | mes | W |
| *C. sylvaticus* (Kulczyn'ski) | M (♂: 3.10; ♀: 3.75) | LS | E | mes | W |
| *Ceratinella brevis* (Wider) | S (♂: 1.70; ♀: 1.90) | LS | F | mes | W |
| *Ceratinella scabrosa* (O.P.-Cambridge) | S (♀: 1.90) | LS | F | mes | W |
| *Cercidia prominens* (Westring) | M (♂: 4.5) | HSD | F | mes | W |
| *Clubiona caerulescens* L. Koch | B (♂: 7; ♀: 8) | HSD | E | mes | H |
| *Cnephalocotes obscurus* (Blackwall) | S (1.75) | LS | E | mes | W |
| *Cryphoeca silvicola* (C. L. Koch) | S (♂: 300) | HSD | E | mes | W |
| *Decipiphantes decipiens* (L. Koch) | S (♂: 1.88; ♀: 1.97) | LS | F | mes | W |
| *Diplocentria bidentata* (Emerton) | S (1.70) | LS | E | mes | W |
| *Diplocephalus picinus* (Blackwall) | S (♂: 1.65; ♀: 2) | LS | F | mes | W |
| *Diplostyla concolor* (Wider) | S (2.75) | LS | F | mes | W |
| *Drapetisca socialis* (Sundevall) | M (♂: 3.75; ♀: 4.35) | HSD | E | mes | W |
| *Erigonella hiemalis* (Blackwall) | S (♂: 1.52; ♀: 1.75) | LS | E | mes | W |
| *Ero furcata* (Villers) | S (♂: 2.75) | HSD | F | mes | H |
| *Euophrys frontalis* (Walckenaer) | M (♀: 3.79) | LS | E | xer | H |
| *Evarcha falcata* (Clerck) | M/B (♂: 5.12; ♀: 6.35) | HSD | E | mes | H |
| *Hahnia ononidum* Simon | S (♂: 1.95; ♀: 2.15) | LS | Oh | mes | W |
| *H. pusilla* C. L. Koch | S (1.40) | LS | Oh | mes | W |
| *Haplodrassus soerenseni* (Strand) | M/B (♂: 4.7; ♀: 6.3) | SS | F | mes | H |
| *Hypselistes jacksoni* (O.P.-Cambridge) | S (♂: 1.80; ♀: 2.17) | HSD | F | mes | W |
| *Lacinius ephippiatus* (C.L. Koch) | M (♂: 4.16; ♀: 5.54) | SS | E | mes | SH |
| *Macrargus multesimus* (O.P.-Cambridge) | S (♂: 2.65; ♀: 2.75) | LS | E | mes | W |
| *M. rufus* (Wider) | M (♂: 3.75; ♀: 4.5) | LS | E | mes | W |
| *Maro pansibiricus* Tanasevitch | S (♂: 1.40; ♀: 1.60) | LS | E | mes | W |
| *Micrargus herbigradus* (Blackwall) | S (♂: 2.00; ♀: 2.15) | LS | F | mes | W |
| *Microneta viaria* (Blackwall) | S (2.25) | LS | F | mes | W |
| *Minyriolus pusillus* (Wider) | S (1.25) | LS | F | mes | W |
| *Mitopus morio* (Fabricius) | M/B (♂: 5.05; ♀: 7.43) | SS | E | mes | SH |
| *Nemastoma lugubre* (Muller) | S (♂: 1.86; ♀: 2.28) | LS | E | hyg | SH |
| *Neriene emphana* (Walckenaer) | M (♀: 5.25) | HSD | F | mes | W |
| *Oligolophus tridens* (C.L. Koch) | M (♂: 3.42; ♀: 4.42) | SS | E | mes | SH |
| *Oryphantes geminus* (Tanasevitch) | S (♂: 2.3) | LS | E | mes | W |
| *Ozyptila trux* (Blackwall) | M (♂: 3.50; ♀: 4.7) | LS | F | mes | H |
| *Pachygnatha listeri* Sundevall | M (♂: 3.75; ♀: 4.75) | SS | F | mes | H |
| *Palliduphantes alutacius* (Simon) | S (♂: 1.95; ♀: 2.05) | LS | F | mes | W |
| *Pardosa lugubris* (Walckenaer) | M/B (♂: 4.80; ♀: 6.40) | SS | F | mes | H |
| *Piratula hygrophila* (Thorell) | M (♂: 5.00; ♀: 5.35) | SS | F | hyg | H |
| *Pocadicnemis pumilla* (Blackwall) | S (♂: 1.90) | LS | E | mes | W |
| *Rilaena triangularis* (Herbst) | M/B (♂: 3.72; ♀: 6.94) | SS | E | mes | SH |
| *Robertus lividus* (Blackwall) | M (♂: 3.25; ♀: 3.50) | LS | F | mes | W |
| *Semljicola faustus* (O.P.-Cambridge) | S (♂: 1.5) | LS | F | mes | W |
| *Tapinocyba insecta* (L. Koch) | S (1.65; ♀: 1.80) | LS | F | mes | W |
| *Tenuiphantes cristatus* (Menge) | S (♂: 2.40; ♀: 2.75) | LS | F | mes | W |
| *T. mengei* (Kulczyn'ski) | S (♂: 2.00; ♀: 2.05) | LS | F | mes | W |
| *T. nigriventris* (L. Koch) | S (2.45) | LS | F | mes | W |
| *T. tenebricola* (Wider) | S (2.45) | LS | F | mes | W |
| *Tetragnatha pinicola* L. Koch | M (♂: 4.75) | HSD | E | mes | W |
| *Tibioplus diversus* (L. Koch) | S (♂: 1.84; ♀: 1.92) | LS | E | mes | W |
| *Trochosa ruricola* (De Geer) | B (♂: 8.25) | SS | E | mes | H |
| *T. spinipalpis* (F.O.P.-Cambridge) | B (♂: 7.00; ♀: 10.50) | SS | E | hyg | H |
| *T. terricola* Thorell | B (♂: 8.00; ♀: 10.50) | SS | F | mes | H |
| *Walckenaeria alticeps* (Denis) | S (2.35) | LS | F | mes | W |
| *W. antica* (Wider) | S (♂: 1.90; ♀: 2.35) | LS | E | mes | W |
| *W. atrotibialis* (O. P.-Cambridge) | S (♂: 2.2; ♀: 2.6) | LS | F | mes | W |
| *W. cucullata* (C. L. Koch) | S (♂: 2.00; ♀: 2.15) | LS | E | mes | W |
| *W. lepida* (Kulczyn'ski) | S (♂: 2.25) | LS | F | mes | W |
| *W. obtusa* Blackwall | S (♂: 3.3; ♀: 3.7) | LS | E | mes | W |
| *Xerolycosa nemoralis* (Westring) | M/B (♂: 5.10; ♀: 6.25) | SS | E | xer | H |
| *Xysticus audax* (Schrank) | M (♂: 4.05; ♀: 5.9) | HSD | E | mes | H |
| *X. cristatus* (Clerck) | M (♂: 4.8) | HSD | Oh | mes | H |
| *X. luctuosus* (Blackwall) | M (♂: 4.5) | SS | F | mes | H |
| *Zelotes subterraneus* (C.L. Koch) | M/B (♂: 5.80; ♀: 7.5) | SS | E | mes | H |
| *Zora spinimana* (Sundevall) | M (♂: 4.75) | SS | F | mes | H |

Примечание. Обозначения как в табл. 1. Средние размеры видов для обоих полов приводятся по литературным данным.

### 

### Приложение 2. Экологические особенности жужелиц

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид | Свойства | | | | | |
| Размерный класс  (р-р; n) | Ярус | Биотоп. преф. | Отн. к влажн. | мобиль-ность | Питание |
| *Agonum fuliginosum* (Panz.) | S (5.32;10) | LS | F | hyg | mm | Z |
| *A. gracilipes* (Duft.) | S (6.74; 10) | LS | E | xer | hm | Z |
| *Amara brunnea* (Gyll.) | S (5.17; 10) | LS | F | mes | hm | Mx |
| *A. ovata* (F.) | M (7.20; 1 ♀) | LSP | Oh | mes | mm | Mx |
| *Badister lacertosus* Sturm | S (4.9; 10) | LS | F | mes | mm | Z |
| *Bembidion guttula* (F.) | S (2.65; 4) | LS | Oh | hyg | mm | Z |
| *B. mannerheimii* Sahlb. | S (2.45; 10) | LS | E | hyg | lm | Z |
| *Calathus micropterus* (Duft) | S (6.4; 10) | LS | F | mes | lm | Z |
| *Carabus aeruginosus* Fisch. | B (22.70; 10) | SS | F | mes | lm | Z |
| *C. glabratus* Payk. | B (22.70; 10) | SS | F | mes | lm | Z |
| *C. granulatus* L. | B (15.63; 10) | SS | E | hyg | mm | Z |
| *C. schoenherri* F.-W. | B (24.18; 10) | SS | F | mes | lm | Z |
| *Cychrus caraboides* (L.) | B (13.21; 10) | SS | F | mes | lm | Z |
| *Harpalus laevipes* Zett. | M (7.91; 10) | LSP | F | mes | mm | Mx |
| *Leistus terminates* (Hellw. in Panz.) | S (5.60; 10) | LS | F | hyg | lm | Z |
| *Loricera pilicornis* (F.) | S (6.28; 10) | LS | F | hyg | hm | Z |
| *Notiophilus biguttatus* (F.) | S (3.91; 10) | LS | F | xer | mm | Z |
| *N. fasciatus* Mäkl. | S (4.59; 10) | LS | F | hyg | lm | Z |
| *N. palustris* (Duft.) | S (4.09; 10) | LS | E | hyg | lm | Z |
| *Platynus assimilis* (Payk.) | B (8.33; 10) | LS | F | hyg | mm | Z |
| *Pl. mannerheimii* Dej. | M (8.18; 6) | LS | F | hyg | lm | Z |
| *Poecilus versicolor* (Sturm) | M (8.80; 10) | LS | Oh | mes | mm | Z |
| *Pterostichus aethiops* (Panz.) | B (9.42; 10) | LS | F | mes | lm | Z |
| *P. diligens* (Sturm) | S (4.66; 10) | LS | F | hyg | mm | Z |
| *P. melanarius* (Ill.) | B (11.11; 10) | LS | E | mes | mm | Z |
| *P. niger* (Schal.) | B (14.00; 10) | LS | E | mes | lm | Z |
| *P. oblongopunctatus* (F.) | M (8.11; 10) | LS | F | mes | mm | Z |
| *P. quadrifoveolatus* Letz. | M (8.15; 10) | LS | F | mes | mm | Z |
| *P. strenuus* (Panz.) | S (4.93; 10) | LS | F | hyg | mm | Z |
| *P. urengaicus* (Jurecer) | M (9.98; 10) | LS | F | mes | lm | Z |
| *Synuchus vivalis* Ill. | S (5.59; 10) | LS | Oh | mes | lm | Z |
| *Trechus secalis* (Payk.) | S (2.86; 10) | LS | E | hyg | lm | Z |

Примечание. Обозначения как в табл. 1. Для видов указаны средние размеры и количество измеренных особей (самцы и самки в соотношении 1:1).

### Приложение 3. Обилие беспозвоночных в уловах почвенными ловушками на участках с разным уровнем загрязнения при снижении объема промышленных выбросов СУМЗ, экз. на 100 лов./сут.± 95% доверительный интервал (обозначения как в табл. 2).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Год**  **Участок** | **2005 г.** | | **2018 г.** | |
| **фоновый** | **импактный** | **фоновый** | **импактный** |
| **Arachnida** | | | | |
| Обилие | 271±61 | 168±43 | 237±37 | 102±29 |
| Влажность: hyg | 18±6 | 10±13 | 8±6 | – |
| Влажность: mes | 252±57 | 156±43 | 229±33 | 102±29 |
| Влажность: xer | – | 2±4 | – | 0±1 |
| Размеры: B | 7±6 | 57±18 | 4±3 | 5±3 |
| Размеры: M | 144±37 | 39±21 | 166±40 | 20±15 |
| Размеры: S | 120±42 | 71±15 | 67±18 | 77±23 |
| Биотопические связи: E | 122±34 | 64±9 | 69±25 | 30±20 |
| Биотопические связи: F | 147±28 | 95±41 | 161±26 | 70±23 |
| Биотопические связи: Oh | 2±4 | 7±5 | 7±3 | 2±3 |
| Способ охоты: H | 11±9 | 89±29 | 3±3 | 8±5 |
| Способ охоты: SH | 69±24 | 1±2 | 47±28 | 11±13 |
| Способ охоты: W | 114±40 | 76±17 | 69±22 | 82±26 |
| Способ охоты: WH | 76±23 | 3±5 | 117±27 | 1±2 |
| Ярус: SS | 136±34 | 91±35 | 158±42 | 17±15 |
| Ярус: HSD | 5±5 | 4±4 | 5±2 | 7±6 |
| Ярус: LS | 129±40 | 72±16 | 75±18 | 78±24 |
| **Carabidae** | | | | |
| Обилие | 847±143 | 317±34 | 359±58 | 168±31 |
| Питание: Mx | 4±7 | 56±18 | – | 11±15 |
| Питание: Z | 843±140 | 261±33 | 359±58 | 157±28 |
| Ярус: SS | 21±9 | – | 42±7 | – |
| Ярус: HSD | – | 1±2 | – | – |
| Ярус: LS | 826±141 | 316±32 | 317±54 | 168±31 |
| Биотопические связи: E | 496±129 | 78±30 | 233±63 | 34±12 |
| Биотопические связи: F | 348±44 | 235±44 | 126±27 | 133±29 |
| Биотопические связи: Oh | 3±3 | 3±5 | – | – |
| Влажность: hyg | 499±122 | 88±34 | 209±50 | 39±12 |
| Влажность: mes | 334±42 | 225±42 | 145±24 | 128±31 |
| Влажность: xer | 14±10 | 4±6 | 6±4 | 0±1 |
| Расселение: hm | 5±9 | 55±21 | 10±7 | 11±15 |
| Расселение: mm | 152±41 | 171±49 | 44±19 | 95±23 |
| Расселение: lm | 690±141 | 91±31 | 305±58 | 62±11 |
| Размеры: B | 52±22 | 0±0 | 89±20 | 0±0 |
| Размеры: M | 245±38 | 156±49 | 45±16 | 90±23 |
| Размеры: S | 550±123 | 161±44 | 226±49 | 78±13 |
| **Обилие прочих беспозвоночных** | | | | |
| Aranei ювенильные | 8±7 | 33±16 | 14±7 | 48±16 |
| Opiliones ювенильные | 51±24 | 9±6 | 43±15 | 139±59 |
| Carabidae, Staphylinidae, личинки | 13±6 | 15±8 | 32±18 | 33±9 |
| Staphylinidae имаго | 807±81 | 103±26 | 249±65 | 164±56 |
| Coleoptera прочие имаго | 47±14 | 26±14 | 31±7 | 16±6 |
| Formicidae | 120±57 | 434±94 | 91±45 | 245±106 |
| Hemiptera | 16±13 | 17±15 | 5±4 | 26±17 |
| Lithobiomorpha взрослые | 15±7 | – | 34±11 | 6±5 |
| Lithobiomorpha ювенильные | 9±3 | – | 5±4 | 0.8±1 |
| Diplopoda взрослые | 6±5 | – | 3±3 | – |
| Geophilomorpha взрослые | – | – | 0.4±1 | – |
| Oligochaeta | 5±4 | – | 9±6 | – |
| Mollusca | 1±2 | – | 19±8 | 0.4±1 |
| Имаго прочие1 | 441±97 | 210±54 | 147±24 | 246±80 |
| Личинки прочие1 | 42±24 | 22±14 | 36±11 | 23±9 |

1Diptera, Lepidoptera, Hymenoptera, Homoptera, Neuroptera, Thysanoptera, Mecoptera