

*На правах рукописи*



Шешницан Сергей Сергеевич

**БИОГЕННАЯ МИГРАЦИЯ СЕЛЕНА В ЭКОСИСТЕМАХ  
ДОЛИНЫ СРЕДНЕГО И НИЖНЕГО ДНЕСТРА**

**03.02.08 – Экология (биология)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Владимир – 2018

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко»

**Научный руководитель:** доктор сельскохозяйственных наук  
**Голубкина Надежда Александровна**

**Официальные оппоненты:** **Тютиков Сергей Федорович**  
доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды

**Ченикалова Елена Владимировна**  
доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», главный научный сотрудник лаборатории защиты растений

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.07 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп.1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, можно присылать по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, кафедра биологии и экологии.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Кулагина Екатерина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Селен (Se) известен как жизненно важный микроэлемент с уникальными биологическими функциями и широким спектром действия его соединений. Он играет важную антиоксидантную роль в биосфере (Ермаков, Тютиков, 2008). Эссенциальность Se, крайняя неравномерность распределения его в различных регионах вызывают неослабевающий интерес исследователей к этому микроэлементу. К тому же, ощущается явный недостаток в сведениях о распределении Se в пищевых цепях различных по геохимическому и экологическому состоянию регионов (Голубкина, Папазян, 2006). Насекомые представляют подавляющее большинство видов в наземных и пресноводных экосистемах, где являются неотъемлемым компонентом и играют важную роль в их функционировании (Чернышев, 1996; Showalter, 2011). Несмотря на столь значимую роль насекомых, механизмы и закономерности поглощения Se в пищевой цепи с участием этой группы животных изучены слабо (Andrahennadi, 2009; Golubkina et al., 2014).

**Степень разработанности проблемы.** В Молдавии изучением различных аспектов биогеохимии Se занимался ряд исследователей (Крайнов и др., 1983; Бобринский, 1988; Moraru, 2002; Bogdevich et al., 2003; Капитальчук М., 2008; Капитальчук М., Капитальчук И., Голубкина, 2011). Вместе с тем, отсутствуют прямые данные о содержании подвижных форм Se в почвах региона, неисследованными остаются закономерности биоаккумуляции элемента зоокомпонентами биоценозов, а также биогенная миграция Se в пищевой цепи водных экосистем долины Днестра. Существенный вклад в изучение биоаккумуляции Se насекомыми внесли многие зарубежные исследователи (Wu et al., 1995; Vickerman, Trumble, 1999; 2003; Ohlendorf, 2003; Jensen et al., 2005; Andrahennadi, 2009; Conley et al., 2009; Hladun et al., 2012; 2013). В значительной части имеющиеся в литературе данные основаны на лабораторных экспериментах и не учитывают большой комплекс факторов, свойственных природной среде.

**Цель** настоящего исследования состояла в выявлении и изучении закономерностей биоаккумуляции и миграции Se в биогеохимических пищевых цепях в эколого-геохимических условиях долины Среднего и Нижнего Днестра.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

- изучить особенности распределения и подвижности Se в почвах;
- провести оценку влияния геохимического фактора на биоаккумуляцию Se насекомыми в природных и антропогенных экосистемах;
- исследовать закономерности миграции Se в биогеохимической пищевой цепи «почва – растения-медоносы – медоносные пчелы – продукты пчеловодства»;
- определить уровень биоаккумуляции Se в лентических водных экосистемах в условиях различной антропогенной нагрузки

**Научная новизна.** Впервые изучены закономерности распределения подвижных форм Se в почвах долины Днестра, которые свидетельствуют о высоком содержании водорастворимой фракции элемента, тесно взаимосвязанной с его валовым содержанием. Впервые системно исследованы особенности биоаккумуляции Se насекомыми в естественных и антропогенных экосистемах долины Днестра, показана его биомагнификация в пищевых цепях и проанализировано распределение концентраций Se в насекомых разных

систематических групп. Впервые исследованы особенности аккумуляции и миграции Se в биогеохимической пищевой цепи медоносных пчел и изучена взаимосвязь концентраций Se с содержанием Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Hg, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, I, Sn, Sr, V, Zn, Si, P, Fe в теле пчел, меде и прополисе. Впервые проведено комплексное изучение биогенной миграции Se в лентических гидроэкосистемах долины Днестра и показана возможность достижения токсического уровня его концентраций в пищевой цепи экосистемы Кучурганского водохранилища-охладителя Молдавской ГРЭС.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные существенно дополняют и конкретизируют особенности пространственного распределения Se в компонентах экосистем и биогеохимических пищевых цепях долины Днестра и могут послужить основой для моделирования геохимических процессов в ландшафтах. Кроме того, они дополняют уже существующие представления о роли насекомых в биогенной миграции Se по ряду направлений: уровень биоаккумуляции микроэлемента насекомыми в регионах с его оптимальным экологическим статусом, биомагнификация Se в пищевых цепях с участием насекомых, влияние ландшафтно-геохимических условий на аккумуляцию Se в пищевой цепи.

Практическая значимость обусловлена возможностью использования результатов исследования для оптимизации различных технологий (агротехника при освоении залежных земель, разработка пищевых добавок и др.), экологического контроля, а также организации биогеохимического мониторинга природно-антропогенных экосистем долины Днестра. Накопленный фактический материал может являться основой для более детальных исследований загрязнения Se Кучурганского водохранилища и оценки рисков возможного токсического действия элемента в водной пищевой цепи.

**Методология и методы исследования.** Методология исследования основывается на системном подходе к изучаемой проблеме и обусловлена необходимостью создания целостной картины взаимоотношений организма и окружающей его геохимической среды. Наряду с общелогическими и общенаучными методами в исследовании применялись частнонаучные методы, выбор которых был обусловлен особенностями изучаемых объектов (методы сбора биоматериала, методы отбора проб и пробоподготовки, методики разложения и фракционирования проб, флуориметрия, атомно-абсорбционную спектроскопия и масс-спектрометрия, а также методы статистической обработки данных).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Наличие в почвах долины Нижнего Днестра значительных количеств подвижных форм Se обуславливает его активное накопление растениями, а через них – насекомыми, при этом в пищевой цепи может происходить биомагнификация элемента.
2. Накопление Se насекомыми зависит от систематической принадлежности и дифференцировано в зависимости от характера потребляемой пищи, ландшафтно-экологических и ландшафтно-геохимических условий обитания.
3. Концентрация Se в организме пчел и продуктах пчеловодства зависит от содержания в них макро- и микроэлементов и эколого-геохимических условий.

4. В лентических водных экосистемах долины Днестра происходит активная биомагнификация Se в пищевой цепи, обуславливающая возможность достижения токсических концентраций элемента для организмов высших трофических уровней.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность и обоснованность полученных данных обеспечена применением современных методов и средств естественнонаучного исследования; выполнением анализов в лабораториях, имеющих государственную аккредитацию; репрезентативностью выборок и адекватным применением методов статистического анализа данных, их компьютерной обработкой с точным определением уровня значимости статистических показателей и оценок; междисциплинарным уровнем анализа изучаемых процессов и явлений; согласованностью результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, его основных положений и выводов с уже имеющимися теоретическими и экспериментальными данными.

**Личное участие соискателя** в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в самостоятельной разработке программы исследований, постановке проблемы, определении цели и задач, непосредственном выполнении основного объема полевых сборов и пробоподготовки, статистической обработке массива эмпирических данных, обобщении и интерпретации полученных результатов, формулировании выводов. Доля участия автора в совместных публикациях составляет 25–80%.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: «Геоэкологические и биоэкологические проблемы Северного Причерноморья» (г. Тирасполь, 2012); «Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы» (г. Гродно, 2013); «Управление бассейном трансграничного Днестра в условиях нового бассейнового договора» (г. Кишинев, 2013); 9th International Soil Science Congress “The Soul of Soil and Civilization” (Side, Antalya, Turkey, 2014); «Актуальные вопросы энтомологии» (г. Ставрополь, 2014, 2015, 2017); «Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии» (г. Барнаул, 2015); «Академику Л.С. Бергу – 140 лет» (г. Бендеры, 2016); «Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы» (г. Москва, 2017); «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке» (г. Москва, 2017).

**Публикации по теме диссертации.** По материалам диссертации опубликованы 23 печатные работы, из которых 5 – статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 2 – в изданиях, включенных в мировую базу данных научного цитирования Scopus, 16 – статьи в других научных изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 217 страницах, из которых 140 страниц основного текста, содержит 29 рисунков и 18 таблиц, состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, списка цитированной литературы и двух приложений на 36 страницах. Библиография включает 355 литературных источников, из них 261 – на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и признательность своему научному руководителю Н.А. Голубкиной за постоянное внимание и чуткое отношение к работе, ценные советы, дружескую атмосферу общения, за ее доверие и терпение. Выполнение данной работы было бы

невозможно без плодотворного сотрудничества и всестороннего содействия на всех этапах исследования к.б.н. М.В. Капитальчук и к.г.н. И.П. Капитальчук, за что автор выражает им сердечную благодарность. Считаю своим долгом высказать слова искренней признательности своим педагогам-биологам, а впоследствии добрым друзьям и коллегам Котоминой Л.В. и Стяжкиной Е.Е. Отдельную благодарность автор адресует своей матери, а также жене Татьяне за поддержку, понимание и ободрение в трудные моменты, советы в ходе работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ГЛАВА 1. БИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ И ОСОБЕННОСТИ БИОГЕОХИМИИ СЕЛЕНА**

На основе литературных источников приводится история изучения биологической роли Se для живых организмов, рассмотрены общие закономерности его миграции в почвенно-растительном комплексе наземных экосистем и особенности биологического круговорота элемента в пресноводных экосистемах. Особое внимание в обзоре уделено современному состоянию проблемы изучения роли насекомых в процессах биогенной миграции Se.

### **ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ**

В данной главе приведена общая эколого-географическая характеристика долины Среднего и Нижнего Днестра, представлены масштабы антропогенной трансформации экосистем, показаны характерные условия для миграции Se в ландшафтах, а также оценено современное состояние изученности биогеохимии элемента в регионе.

### **ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В основу исследования положен материал, который собирали в период с 2012 по 2016 годы. Исследованием были охвачены характерные для долины Днестра типы экосистем (рис. 1) – степные, пойменные (пойменные леса и луга), агроэкосистемы, пресноводные лентические экосистемы (Кучурганское водохранилище-охладитель Молдавской ГРЭС, Ягорлыкская заводь). Общий объем собранного материала составил 418 проб, из которых 122 – пробы почв, 12 – донные отложения и детрит, 6 – вода, 77 – растения, 16 – водные беспозвоночные, 111 – насекомые, 28 – рыбы, 46 – продукты пчеловодства.

Отбор проб воды, донных отложений, почв и биоматериала проводился в соответствии с общепринятыми методами (ГОСТ 31861–2012; Практикум по агрохимии, 2008; Руководство по методам гидробиологического анализа..., 1983; Ковальский, Гололобов, 1969; Фасулати, 1971). Пробы почвы отбирали из прикопки (на глубину до 30 см) и почвенным буром через каждые 30 см (на глубину до 100 см) в пределах одной почвенной разности на разных элементах мезорельефа (водоразделы, террасы, склоны, поймы).

Сбор проб продуктов пчеловодства проводился с частных пасек. С целью сравнения региональных концентраций элементов были использованы образцы продуктов пчеловодства, отобранные в других регионах (Россия и Монголия). Все пробы (за исключением меда и прополиса) высушивали до воздушно-сухого состояния, тщательно гомогенизировали и хранили в полиэтиленовых пакетах.

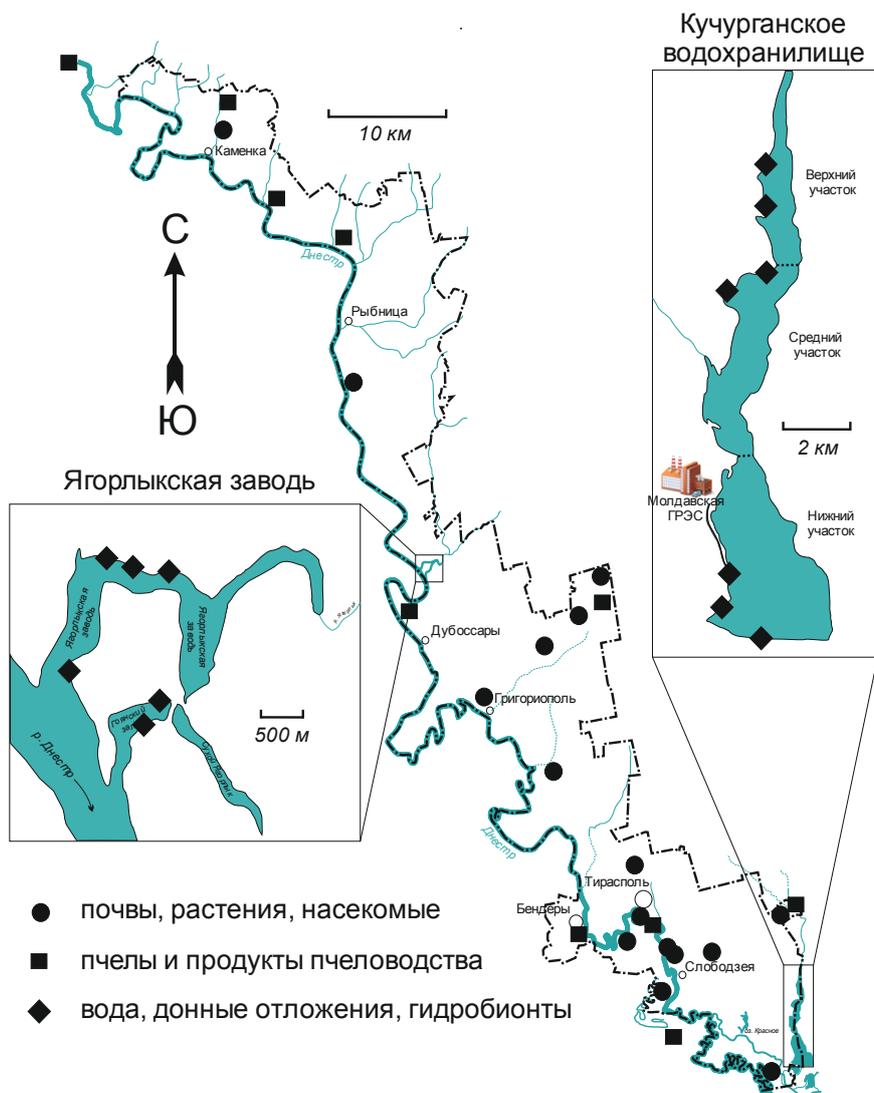


Рисунок 1 – Карта-схема отбора проб в долине Среднего и Нижнего Днестра

Определение содержания Se в пробах воды проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst800 (Perkin Elmer, USA) с проточно-инжекционной системой FLAS-400 (Богдевич и др., 2005). Тщательно подготовленные пробы почв, донных отложений, детрита, растений, животных, а также продуктов пчеловодства (для определения Se) подвергали озолению смесью хлорной и азотной кислот (Alfthan, 1984). Кислотное озоление проб меда, перги, прополиса и пчел (для многоэлементного анализа) проводили в микроволновой печи в соответствии со стандартными методиками (Скальный и др., 2009).

Фракционирование почвенных образцов проводили по методике, приведенной в работе (Wang et al., 2012). Содержание Se определяли флуориметрическим методом (Alfthan, 1984). Элементный состав продуктов пчеловодства (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Hg, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, I, Sn, Sr, V, Zn, Si, P, Fe) определяли с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Nexion 300D (Perkin Elmer, USA) в лаборатории Центра Биотической медицины (г. Москва).

Статистическую обработку данных проводили с помощью пакетов прикладных программ MS Office Excel 2007 и STATISTICA 10. Для проверки достоверности различий между независимыми выборками использовались *t*-критерий Стьюдента, *U*-критерий Манна–Уитни и *H*-критерий Краскела–Уоллиса. Для выявления взаимосвязности между двумя выборками применялся корреляционно-регрессионный анализ (корреляция Пирсона, *r*) и ранговая корреляция Спирмена (*R*). Среди методов многомерного статистического анализа использовался кластерный анализ. Для всех видов статистического анализа был принят уровень значимости  $p < 0,05$ . Интенсивность биологического поглощения Se оценивали с помощью биогеохимических показателей: коэффициента биологического поглощения ( $K_b$ ), представляющего отношение концентрации Se в растении к валовой концентрации элемента в

почве; коэффициента биогеохимической подвижности ( $K_n$ ) – отношение концентрации Se в растении к концентрации водорастворимой фракции элемента в почве (Перельман, Касимов, 1999); коэффициента биоконцентрации ( $K_{бк}$ ) – частное от концентрации Se в воздушно-сухой массе гидробионта и средней концентрации Se в воде (DeForest et al., 2007).

## ГЛАВА 4. СЕЛЕН В ЭКОСИСТЕМАХ СРЕДНЕГО И НИЖНЕГО ДНЕСТРА И ЕГО БИОАККУМУЛЯЦИЯ В ПИЩЕВЫХ ЦЕПЯХ

### 4.1. Миграция и биоаккумуляция Se в наземных экосистемах

**Распределение и подвижность Se в почвах.** Среднее содержание валовых форм Se в верхнем слое почв (0–30 см) составляет  $326 \pm 125$  мкг/кг при достаточно широком диапазоне от 84 до 654 мкг/кг. Наиболее высоким содержанием валового Se отличаются аллювиальные почвы ( $357 \pm 89$  мкг/кг), приуроченные к пойменным экосистемам (рис. 2).

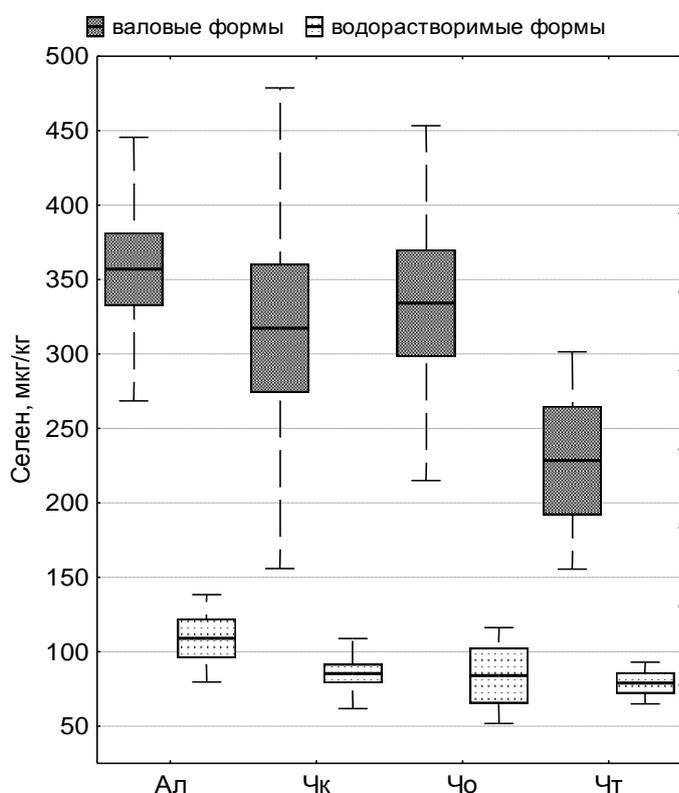


Рисунок 2 – Среднее содержание Se в верхнем слое (0–30 см) основных типов почв долины Нижнего Днестра: Ал – аллювиальная луговая, Чк – чернозем карбонатный; Чо – чернозем обыкновенный, Чт – чернозем типичный.

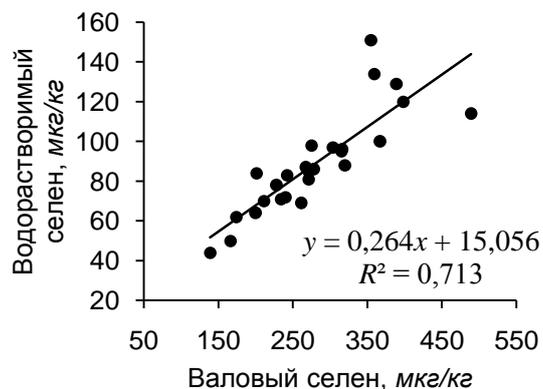


Рисунок 3 – Зависимость концентраций водорастворимых форм Se от валового содержания в почвах ( $n = 26$ )

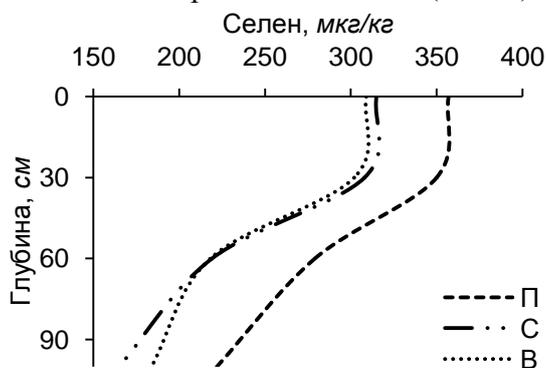


Рисунок 4 – Профильное распределение валовых форм Se в почвах на разных элементах рельефа: П – поймы, С – склоны, В – водоразделы и террасы.

В генетическом ряду черноземов, доминирующих на террасах Днестра, среднее значение концентрации элемента снижается до  $334 \pm 119$  мкг/кг в черноземах обыкновенных и до  $317 \pm 161$  мкг/кг в близких к ним по генезису черноземах карбонатных. Наконец, в черноземах типичных, эволюционно более зрелых степных почвах, верхний почвенный слой содержит наименьшие запасы валового Se ( $229 \pm 73$  мкг/кг), которые значимо ниже, чем в аллювиальных луговых почвах ( $U = 6, p < 0,0272$ ). Эти данные свидетельствуют о наличии в долине

Нижнего Днестра почвенных ареалов с более высоким валовым содержанием Se, чем указывалось ранее (Капитальчук М., 2008).

Среднее содержание подвижных (водорастворимых) форм Se в верхнем слое почв исследуемого района составляет  $89 \pm 25$  мкг/кг или 32,1% от запасов валовых форм, варьируя от 44 до 151 мкг/кг (23,3–42,5% от валовых) и убывает в той же последовательности типов (подтипов) почв, что и среднее содержание валовых форм элемента (рис. 2). При этом содержание водорастворимой фракции Se закономерно возрастает по мере увеличения его валового содержания ( $r = +0,844$ ,  $p < 0,000001$ ) (рис. 3).

В почвах исследуемого района Se аккумулируется преимущественно в гумусовом горизонте почв и слабо выщелачивается в нижние горизонты (рис. 4). Таким образом, очевидно, что комплексы факторов, обусловленных почвообразовательными процессами в разных типах почв, являются благоприятными для мобилизации Se. На это указывает значительное количество водорастворимого Se в почвах региона. Почвы, формирующиеся на разных элементах рельефа и принадлежащих к контрастным геохимическим ландшафтам, достаточно явственно различаются, как по содержанию валовых форм Se, так и по содержанию его водорастворимой фракции.

**Аккумуляция Se растениями в экосистемах, различных по ландшафтно-геохимическим условиям.** Среднее содержание Se в растениях южного степного района долины Днестра составляет  $155 \pm 107$  мкг/кг, варьируя в диапазоне от 55 до 579 мкг/кг, и снижается в ряду (мкг/кг): **подсолнечник (232) > кукуруза (216) > пшеница (145) > пырей (117)**. Несмотря на численные различия средних значений, статистический анализ показал достоверность различий выборочных данных только для подсолнечника и пырея ( $U = 58$ ,  $p = 0,011$ ) и кукурузы и пырея ( $U = 37$ ,  $p = 0,051$ ).

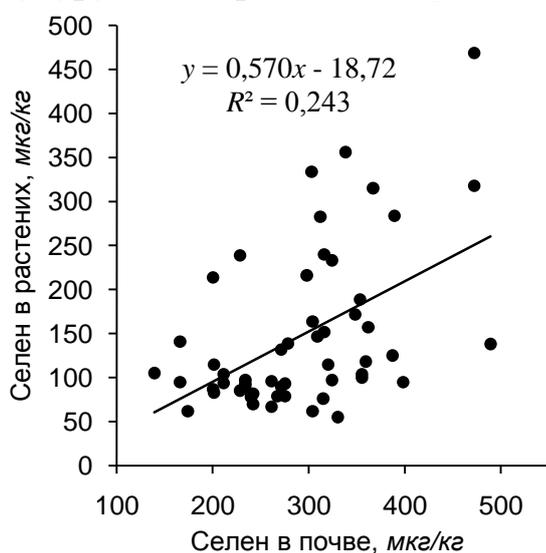


Рисунок 5 – Взаимосвязь содержания Se в растениях с его валовым содержанием в почве ( $n = 53$ )

Корреляционный анализ зависимости содержания Se в растениях от концентраций валовых форм Se в почвах, проведенный без дифференциации по видам растений, показал наличие слабой положительной связи ( $r = +0,494$ ,  $p < 0,0002$ ) (рис. 5). Достаточно большая дисперсия эмпирических точек на графике обуславливает невысокое значение коэффициента детерминации и может быть связана как с различной аккумулирующей способностью отдельных видов растений, так и с целым рядом почвенно-геохимических факторов, влияющих на подвижность и биодоступность Se в системе «почва–растение».

Оценка интенсивности биологического поглощения Se растениями из почвы на основе биогеохимических коэффициентов показала, что коэффициенты  $K_b$  и  $K_n$  слабо зависят от концентрации Se в почве. При этом только для  $K_n$  и содержания водорастворимых соединений в почве подтверждена статистически значимая зависимость ( $r = -0,341$ ,  $p = 0,034$ ) (рис. 6).

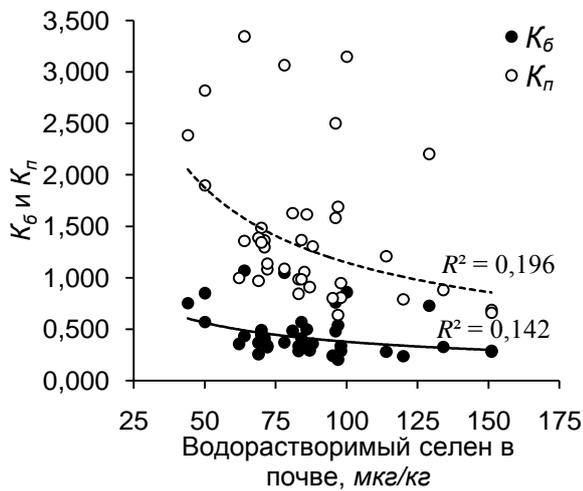


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента биологического поглощения ( $K_b$ ) и коэффициента биогеохимической подвижности ( $K_n$ ) от содержания водорастворимых форм Se в почвах

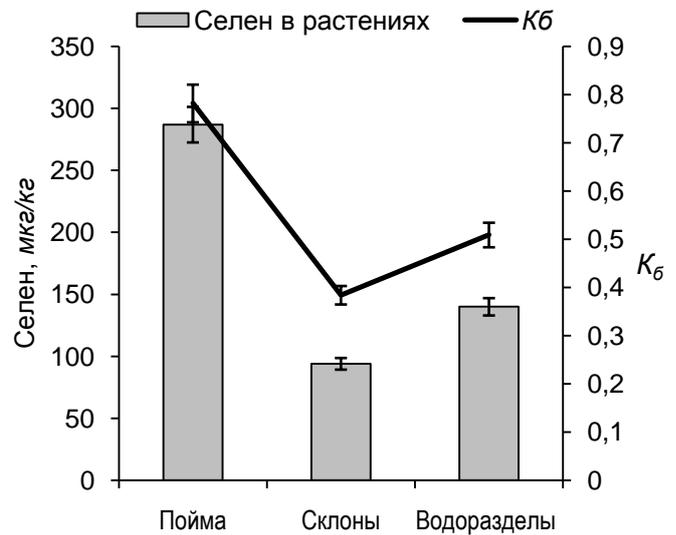


Рисунок 7 – Содержание Se в растениях и его биоаккумуляция на разных элементах рельефа долины Нижнего Днестра

Таким образом, наличие слабой отрицательной корреляции коэффициентов  $K_b$  и  $K_n$  с содержанием Se в почве свидетельствует о том, что в среднем при возрастании концентрации элемента в почве, его содержание в растениях увеличивается гораздо медленнее, приводя к уменьшению их соотношения. Причиной обратной зависимости уровня аккумуляции Se растениями от содержания данного элемента в почве, видимо, является его условная необходимость для растений (Ягодин и др., 2002).

Содержание Se в растениях и его биологическое поглощение дифференцируются в зависимости от структурных элементов рельефа (рис. 7). В пойме наблюдается наиболее интенсивное поглощение элемента ( $K_b = 0,782$ ) и, как результат, его повышенное содержание в растениях (в среднем  $287 \pm 149$  мкг/кг). На водораздельных пространствах и на террасах интенсивность аккумуляции Se уменьшается ( $K_b = 0,509$ ), приводя к снижению концентрации элемента в растениях почти в два раза ( $140 \pm 53$  мкг/кг). На склонах с черноземными почвами различной степени смывости интенсивность биологического поглощения еще ниже ( $K_b = 0,384$ ), что обусловило на этой форме рельефа самые низкие концентрации Se в растениях ( $94 \pm 24$  мкг/кг). Такая дифференцированная биоаккумуляция Se растениями может иметь существенное экологическое значение, поскольку обуславливает различную доступность его для организмов-фитофагов.

**Аккумуляция Se насекомыми в естественных и антропогенных экосистемах.** В геохимических условиях экосистем долины Среднего и Нижнего Днестра среди 53 изученных видов насекомых концентрации Se варьируют в пределах двух порядков от 302 до 8966 мкг/кг сухой массы при среднем значении  $1427 \pm 1513$  мкг/кг. Для стрекоз (*Odonata*), вероятно в силу их трофической специализации (облигатные зоофаги) и топической связи с пресноводными экосистемами, характерны существенно более высокие концентрации Se ( $3263 \pm 1053$  мкг/кг). Представители отряда *Manthoptera*, также являющиеся облигатными хищниками, но населяющие исключительно наземные места обитания, аккумулируют гораздо меньшие количества Se ( $992 \pm 529$  мкг/кг). Среднее содержание элемента у насекомых отрядов *Coleoptera* и *Heteroptera*

составило  $1438 \pm 1974$  и  $1340 \pm 1095$  мкг/кг соответственно. Представители этих отрядов характеризуются чрезвычайным разнообразием жизненных форм, объектов питания и местообитаний. Отчасти поэтому содержание Se у них находится на сопоставимых уровнях. Для прямокрылых насекомых (*Orthoptera*) характерно самое низкое среднее значение ( $655 \pm 288$  мкг/кг), обусловленное тем, что подавляющее большинство видов прямокрылых являются растительноядными (рис. 8А).

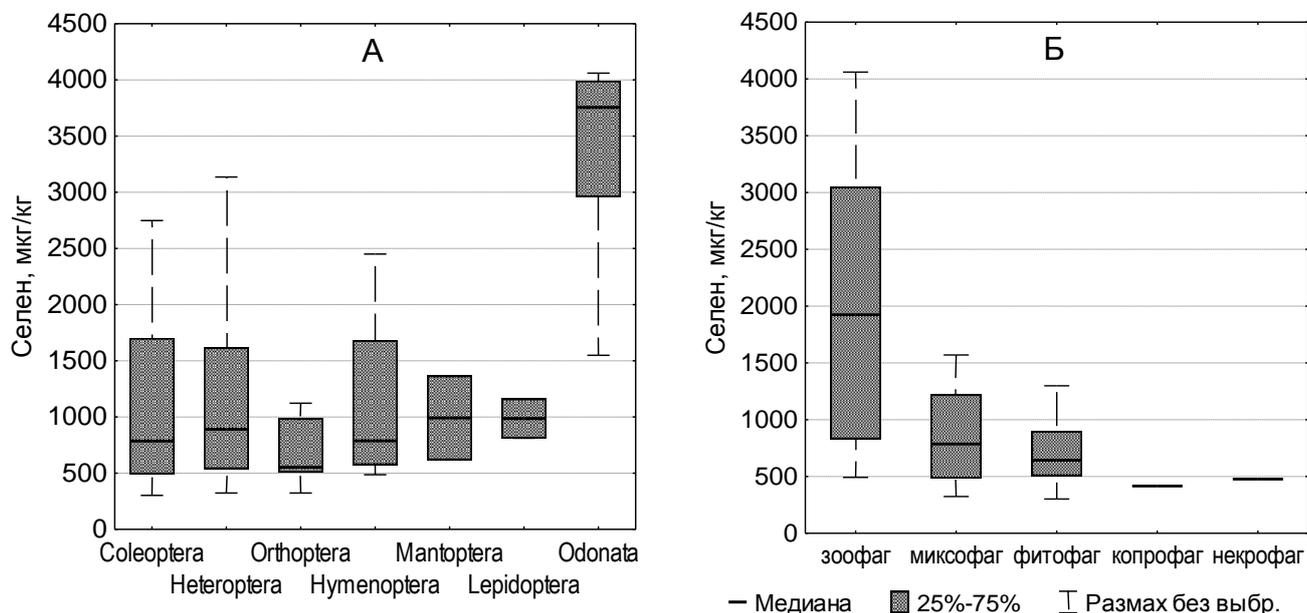


Рисунок 8 – Содержание Se в насекомых разных отрядов (А) и трофических групп (Б) в экосистемах долины Среднего и Нижнего Днестра

Очевидно, что содержание Se у насекомых разных отрядов зачастую связано с типом потребляемой пищи (рис. 8Б). Действительно, максимальные концентрации Se аккумулируют зоофаги ( $2065 \pm 1264$  мкг/кг), которые значительно выше, чем содержание элемента у представителей растительноядных видов – фитофагов ( $693 \pm 288$  мкг/кг,  $U = 60$ ,  $p = 0,0004$ ) и насекомых-миксофагов ( $848 \pm 422$  мкг/кг,  $U = 23$ ,  $p = 0,0299$ ).

Еще одной выраженной закономерностью аккумуляции Se насекомыми в долине Днестра является увеличение содержания элемента в одних и тех же видах энтомофауны в южном степном районе по сравнению с северным лесостепным. Подобные различия в целом характерны для насекомых независимо от трофической группы, причем у видов миксофагов и зоофагов они становятся более резкими.

У насекомых-фитофагов, населяющих пойменные агроэкосистемы, содержание Se выше, чем у особей тех же видов в агроэкосистемах на террасах и водораздельных пространствах ( $U = 13$ ,  $p = 0,0160$ ). Независимо от места обитания отдельные особи насекомых-фитофагов способны аккумулировать более высокие концентрации Se, чем его содержится в кормовых растениях. В системе «растение–фитофаг», как правило,  $K_6 > 1$ . Аналогичная закономерность характерна для миксофагов и облигатных зоофагов, при этом особи популяций миксофагов пойменных экосистем в среднем накапливают более чем в 2,5 раза большие количества элемента, чем особи тех же видов, населяющие агроэкосистемы на террасах и водоразделах ( $U = 1$ ,  $p = 0,0373$ ).

Нормирование концентраций Se в пищевых цепях относительно валового содержания элемента в почве показывает (рис. 9), что в пойменных экосистемах наблюдается биомагнификация Se, которая приводит практически к пятикратному увеличению концентраций элемента у особей в популяциях насекомых-миксофагов. В экосистемах на террасах закономерное увеличение концентрации элемента прослеживается только при переходе от растений к фитофагам, а от них к миксофагам (или зоофагам).

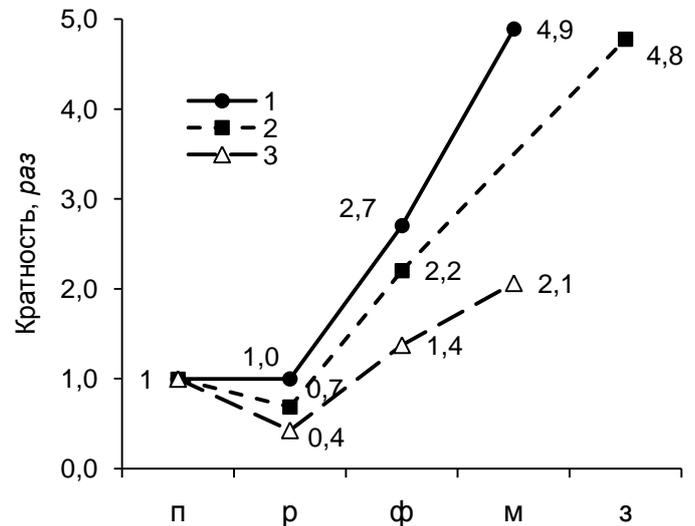


Рисунок 9 – Соотношение концентраций Se в биогеохимических пищевых цепях экосистем долины Нижнего Днестра: 1 – агроэкосистемы в пойме, 2 – степная экосистема, 3 – агроэкосистемы на террасах и водо-разделах; п – почва, р – растения, ф – фитофаги, м – миксофаги, з – зоофаги.

#### 4.2. Se в биогеохимической цепи «почва – растения-медоносы – медоносные пчелы – продукты пчеловодства»

Содержание Se в растениях-медоносах, медоносных пчелах и продуктах пчеловодства. По величине средних концентраций Se в компонентах пищевой цепи медоносных пчел и с учетом достоверности наблюдаемых различий (рис. 10) их можно расположить в следующей последовательности (мкг/кг): *пчелы (663) > растения-медоносы (259) > перга (222) ≈ прополис (220) > полифлорный мед (56)*. При этом статистически значимых различий в содержании элемента в продуктах пчеловодства лесостепного и степного районов долины Днестра не выявлено.

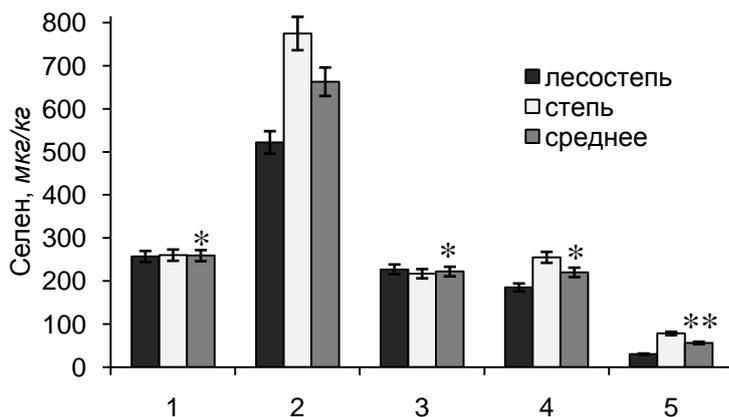


Рисунок 10 – Содержание Se в компонентах пищевой цепи медоносных пчел в экосистемах лесостепного и степного районов долины Днестра: 1 – соцветия растений-медоносов, 2 – медоносные пчелы, 3 – перга, 4 – прополис, 5 – полифлорный мед  
\* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$

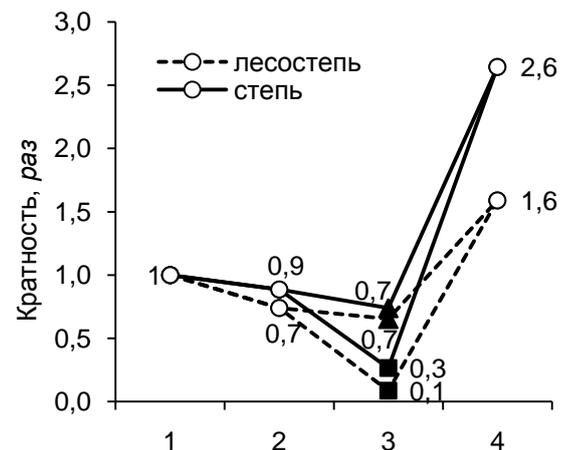


Рисунок 11 – Соотношение содержания Se в биогеохимической пищевой цепи медоносных пчел в лесостепном и степном районах долины Днестра: 1 – почва; 2 – растения-медоносы (соцветия); 3 – продукты пчеловодства: ▲ – перга; ■ – полифлорный мед; 4 – пчелы

Концентрации Se в меде и прополисе тесно коррелируют ( $R = -0,733$ ;  $p = 0,0246$ ), причем характер этой связи указывает на обратную зависимость. Причиной этого может быть активное извлечение Se пчелами из нектара в процессе изготовления меда при повышении его концентраций в растениях. Результаты нормирования концентраций Se в звеньях биогеохимических пищевых цепях медоносных пчел относительно валовых концентраций Se в почвах (рис. 11) показывают, что более высокий уровень биоаккумуляции элемента характерен для южного степного района. Это проявляется в интенсивности аккумуляции Se медоносными растениями, с которых пчелы собирают пыльцу и нектар, а также в содержании элемента в продуктах пчеловодства. Повышенную интенсивность поглощения Se в условиях степи доказывает коэффициент  $K_6$  (рассчитанный как частное от концентраций элемента в организме пчел и перге), значения которого составляют  $K_6 = 1,125$  и  $K_6 = 2,481$  в лесостепных и степных экосистемах соответственно.

**Элементный состав компонентов пищевой цепи медоносных пчел в лесостепных и степных экосистемах долины Днестра.** Средние значения концентраций элементов в медоносных пчелах и производимых ими продуктах убывают в следующих порядках (в мг/кг):

1) медоносные пчелы

$$\frac{K, P}{n \cdot 10^4} > \frac{Ca, Mg, Na}{n \cdot 10^3} > \frac{Fe, Zn}{n \cdot 10^2} > \frac{Mn, Si, B, Al, Cu, Sr}{n \cdot 10} > \frac{I, Ni, Se, Pb, Cr, Li, Cd, Sn, Co, V, As}{n \cdot 10^{-1}} > \frac{Hg}{n \cdot 10^{-2}}$$

2) перга

$$\frac{K, P, Ca}{n \cdot 10^3} > \frac{Mg}{n \cdot 10^2} > \frac{Na, Fe, Si, Zn, B, Al, Mn, Cu}{n \cdot 10} > \frac{Sr, Ni}{n \cdot 10^0} > \frac{Se, Pb, I, Cr}{n \cdot 10^{-1}} > \frac{Co, V, Cd, Li, As, Sn}{n \cdot 10^{-2}} > \frac{Hg}{n \cdot 10^{-3}}$$

3) прополис

$$\frac{Ca, K}{n \cdot 10^3} > \frac{Fe, P, Mg, Na}{n \cdot 10^2} > \frac{Al, Si, Zn, Sr, Pb, Mn}{n \cdot 10} > \frac{B, Cu, Co, Cr}{n \cdot 10^0} > \frac{Ni, Sn, I, V, Li, Cd, Se, As}{n \cdot 10^{-1}} > \frac{Hg}{n \cdot 10^{-2}}$$

4) полифлорный мед

$$\frac{K}{n \cdot 10^2} > \frac{P, Ca, Si, Mg, Na}{n \cdot 10} > \frac{B, Fe, Al, Zn}{n \cdot 10^0} > \frac{Sr, Cu, Cr, Mn}{n \cdot 10^{-1}} > \frac{I, Se, Ni, Li, Pb, Sn, Cd, V}{n \cdot 10^{-2}} > \frac{Co, Hg, As}{n \cdot 10^{-3}}$$

Самые высокие уровни концентраций элементов характерны для медоносных пчел. В прополисе и перге многие элементы содержатся в концентрациях на порядок ниже, чем в телах пчел, а в меде – еще на один порядок ниже, по сравнению с пергой и прополисом. Такая закономерность наиболее отчетливо прослеживается для большинства макроэлементов (K, Na, Mg, P) и некоторых микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Sr). Концентрации Ca, Mn, Al, а также I и Se находятся на сопоставимых уровнях в теле пчел, перге и прополисе и только в меде снижаются на один – два порядка. Статистические расчеты показали, что различия между выборочными данными по содержанию отдельных элементов в организме пчел, перге, меде и прополисе лесостепного и степного районов долины Днестра при  $p < 0,05$  не наблюдаются. Однако в целом, более выражены различия в элементном статусе у медоносных пчел из разных ландшафтных зон, чем в производимых ими продуктах.

**Соотношение содержания элементов в компонентах пищевой цепи медоносных пчел и его влияние на аккумуляцию Se.** С целью изучения взаимосвязи концентраций макро- и микроэлементов в организме медоносных

пчел, в меде и прополисе был проведен корреляционный анализ всего массива данных, приведенных к нормированному и центрированному виду. На основе корреляционных матриц проведен кластерный анализ и построены дендрограммы (рис. 12).

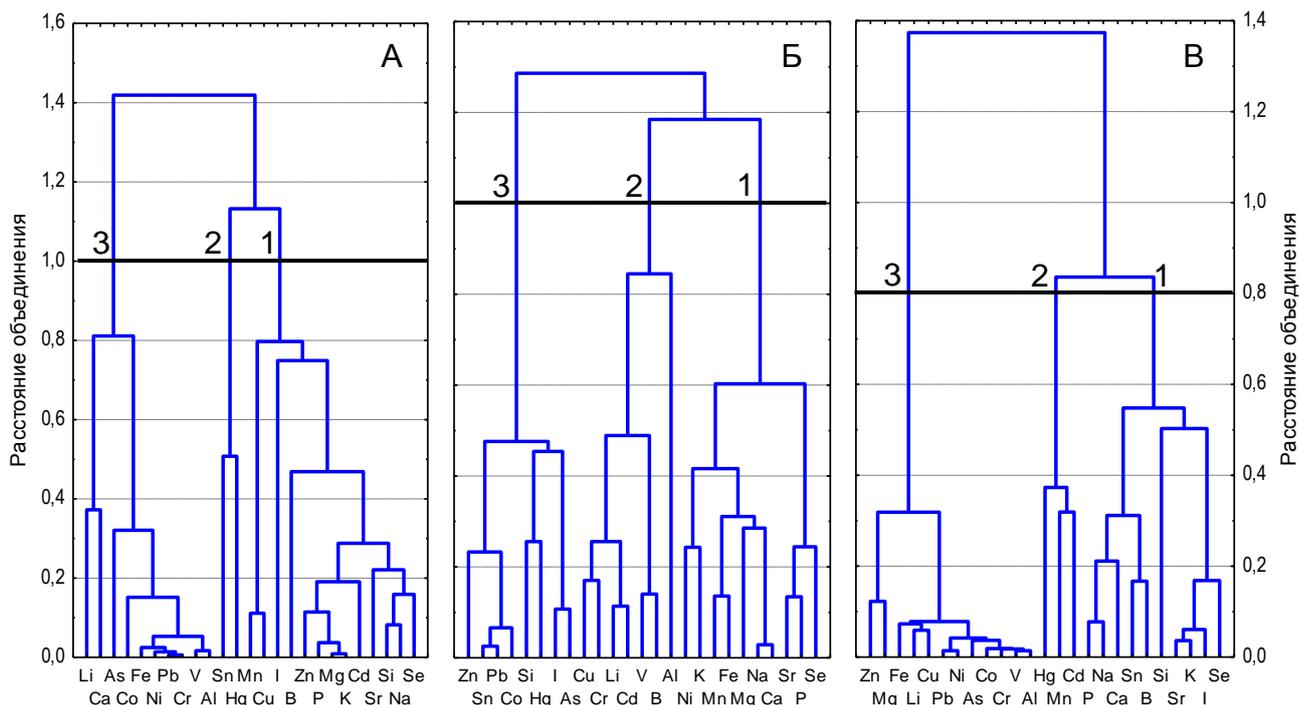


Рисунок 12 – Дендрограммы связи концентраций макро- и микроэлементов в медоносных пчелах (А), полифлорном меде (Б) и прополисе (В). Метод объединения: невзвешенное попарное среднее; метрика расстояния: 1– $r$  Пирсон

В целом характер кластеризации корреляционных связей в организме медоносных пчел (рис. 12А) вполне адекватно отражает накопление металлов пчелами в процессе переработки нектара в мед. Концентрации большинства рассматриваемых элементов в меде слабо взаимосвязаны (рис. 12Б), а общее количество статистически значимых коэффициентов корреляции в меде снижено. Характер взаимосвязи и особенности кластеризации элементов меде по всей вероятности свидетельствуют о разной степени извлечения элементов пчелами из нектара в процессе изготовления меда. Наиболее сильно извлекаются токсичные элементы (Hg, Pb, As), входящие в состав третьей группы, в меньшей степени этому подвержены элементы первой группы, а вторая группа в этом отношении занимает промежуточное положение. Характер разделения на кластеры взаимосвязей элементов в прополисе (рис. 12В) во многом сходен с таковым для медоносных пчел, однако ввиду значительно большего количества тесных корреляций концентраций элементов в прополисе аналогичное разделение взаимосвязей на три ассоциации наблюдается на расстоянии объединения 0,8.

Таблица 1 позволяет детально оценить характер взаимосвязи элементов с Se. Очевидно, что в выборках из долины Днестра практически нет статистически значимых коэффициентов за исключением антагонистической взаимосвязи Se и V в прополисе. Наиболее общие закономерности взаимосвязи концентраций элементов в продуктах пчеловодства можно выявить на основе общей выборки при включении в анализ данных по биогеохимическим провинциям с более низким содержанием Se в среде (регионы России, аймаки Монголии). Для многих

пар элементов наблюдается увеличение силы корреляционной связи при сохранении ее характера.

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции между элементами в пчелах, меде и прополисе

Продукты пчеловодства	Элементы	Выборка по долине Днестра				Общая выборка			
		$r_1$	$p$	$R_1$	$p$	$r_2$	$p$	$R_2$	$p$
Пчелы	Se–B	0,209	0,653	0,143	0,760	0,321	0,264	<b>0,888</b>	<b>0,0001</b>
	Se–I	–0,390	0,389	0,214	0,645	0,097	0,741	<b>0,677</b>	<b>0,022</b>
	Se–Na	0,508	0,244	0,607	0,148	<b>0,678</b>	<b>0,008</b>	<b>0,802</b>	<b>0,001</b>
	Se–Si	0,289	0,529	0,107	0,819	<b>0,554</b>	<b>0,040</b>	0,465	0,117
	Se–Sr	0,472	0,285	0,429	0,337	0,529	0,052	<b>0,599</b>	<b>0,031</b>
	Se–Pb	–0,110	0,814	–0,071	0,879	–0,253	0,383	<b>–0,600</b>	<b>0,030</b>
Мед	Se–P	0,801	0,055	0,771	0,072	<b>0,674</b>	<b>0,033</b>	0,407	0,243
	Se–Sr	0,699	0,123	0,771	0,072	0,569	0,086	<b>0,634</b>	<b>0,049</b>
	Se–Hg	–0,753	0,084	–0,772	0,072	<b>–0,639</b>	<b>0,047</b>	–0,351	0,319
Прополис	Se–B	0,571	0,181	0,143	0,760	<b>0,589</b>	<b>0,044</b>	0,364	0,245
	Se–I	0,427	0,399	–0,107	0,819	<b>0,660</b>	<b>0,027</b>	<b>0,655</b>	<b>0,029</b>
	Se–K	0,170	0,716	0,214	0,645	0,460	0,133	<b>0,580</b>	<b>0,048</b>
	Se–Si	0,375	0,407	–0,071	0,879	<b>0,586</b>	<b>0,045</b>	0,503	0,095
	Se–Al	–0,299	0,516	–0,321	0,482	<b>–0,689</b>	<b>0,012</b>	<b>–0,650</b>	<b>0,022</b>
	Se–Co	–0,227	0,665	–0,203	0,700	<b>–0,626</b>	<b>0,039</b>	<b>–0,651</b>	<b>0,030</b>
	Se–Cr	–0,481	0,275	–0,571	0,180	<b>–0,698</b>	<b>0,012</b>	<b>–0,811</b>	<b>0,001</b>
	Se–Sn	0,705	0,077	0,500	0,253	<b>0,650</b>	<b>0,022</b>	0,455	0,137
	Se–Sr	0,501	0,311	0,371	0,468	0,575	0,064	0,582	0,060
	Se–V	<b>–0,777</b>	<b>0,040</b>	<b>–0,893</b>	<b>0,007</b>	<b>–0,745</b>	<b>0,005</b>	<b>–0,648</b>	<b>0,023</b>
	Se–Pb	–0,197	0,709	–0,086	0,872	<b>–0,703</b>	<b>0,016</b>	<b>–0,764</b>	<b>0,006</b>

Примечание. Объем выборок составил для пчел  $n_1 = 7$  и  $n_2 = 13-14$ , меда  $n_1 = 6$  и  $n_2 = 10$ , прополиса  $n_1 = 6-7$  и  $n_2 = 11-12$  долины Днестра и всего массива данных соответственно. Полу жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при  $p < 0,05$ .

В целом, используемые статистические методы позволяют говорить о синергизме Se в организме пчел с Na и Sr. В цветочном меде сходные результаты параметрического и непараметрического корреляционного анализа показаны для концентраций Se и Sr. Снижение содержания Se в прополисе связано с V, Pb, Cr, Al и Co, и, напротив, I может накапливаться в этом продукте пчеловодства вместе с Se. Se во всех трех случаях по характеру взаимодействий объединен в одну группу с эссенциальными макро- и микроэлементами (рис. 12) и синергически связан со Sr (табл. 1). Анализ доступной литературы в основном показал сопоставимость результатов настоящей работы с данными, полученными исследователями в разных регионах мира.

#### 4.3. Миграция и биоаккумуляция Se в лентических водных экосистемах.

Общие закономерности аккумуляции Se разными группами гидробионтов в лентических экосистемах долины Днестра (Кучурганское водохранилище и Ягорлыкская заводь) можно выявить при анализе рисунка 13А. Статистический анализ позволил подтвердить значимость различий в накоплении Se ( $H = 18,527$ ,  $df = 4$ ,  $p = 0,001$ ). Наименьшим содержанием элемента отличаются продуценты ( $1329 \pm 2033$  мкг/кг), за которыми в порядке возрастания средних концентраций элемента в организме следуют ракообразные ( $1393 \pm 208$  мкг/кг), насекомые ( $2962 \pm 2584$  мкг/кг), моллюски ( $3126 \pm 3286$  мкг/кг) и рыбы ( $3428 \pm 2857$  мкг/кг).

Учитывая наибольшую значимость пищевого пути миграции Se в водных биоценозах (Stewart et al., 2010), рассмотрим различия концентраций элемента у организмов разных трофических групп (рис. 13Б).

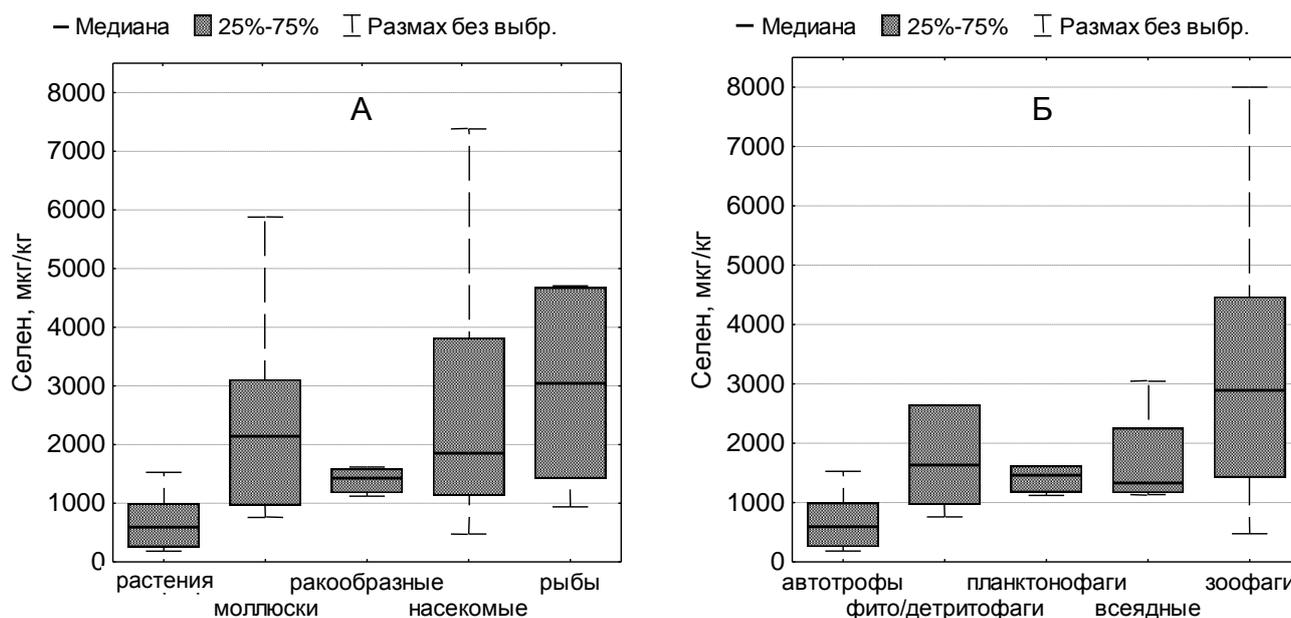


Рисунок 13 – Содержание Se в компонентах гидробиоценозов долины Днестра: А – систематические группы, Б – трофические группы.

Максимальные концентрации элемента аккумулируются зоофагами ( $3504 \pm 2876$  мкг/кг), а также фито- и детритофагами ( $2967 \pm 3325$  мкг/кг). Близкими оказались концентрации селена у всеядных гидробионтов и планктонофагов –  $1709 \pm 901$  и  $1657 \pm 736$  мкг/кг соответственно, что, вероятно, отражает сходство концентраций элемента в кормовых ресурсах. Минимальное содержание селена характерно для автотрофов ( $1329 \pm 2023$  мкг/кг), составляющих основание пищевой цепи. Статистический анализ подтверждает существование значимых различий у организмов разных трофических групп ( $H = 20,058$ ,  $df = 4$ ,  $p = 0,0005$ ). В целом, рассмотренная последовательность отражает увеличение среднего содержания элемента с возрастанием трофического уровня.

На уровне абиотических компонентов экосистем Кучурганского водохранилища и Ягорлыкской заводи не обнаружено достоверных различий по содержанию элемента в воде, донных отложениях и детрите. Исходя из анализа пищевых сетей исследованных водных экосистем, амфибиотические насекомые являются важным связующим звеном в миграции Se и существенным его источником в пищевой цепи ввиду его сравнительно высоких концентраций. При этом биомагнификация Se не происходит в трофической цепи, если пищей насекомых является детрит. Противоположная закономерность наблюдается для насекомых-зоофагов, в которых концентрации Se, как правило, выше, чем в их основных пищевых ресурсах.

Анализ коэффициентов биологического поглощения, рассчитанных для отдельных звеньев водных пищевых цепей, указывает на то, что в исследованных гидроэкосистемах происходит активная аккумуляция Se. При этом наиболее высокая интенсивность биоаккумуляции элемента характерна для пищевой цепи Кучурганского водохранилища, где наблюдается резкое увеличение его концентраций (рис. 14).

Самым значительным этапом аккумуляции Se является его биоконцентрация продуцентами ( $K_{бк}$ ), способствующая увеличению содержания элемента в водной растительности в экосистеме Ягорлыкской заводи на два порядка ( $K_{бк} = 1,73 \cdot 10^2$ ), а в Кучурганском водохранилище – на три ( $K_{бк} = 1,74 \cdot 10^3$ ).

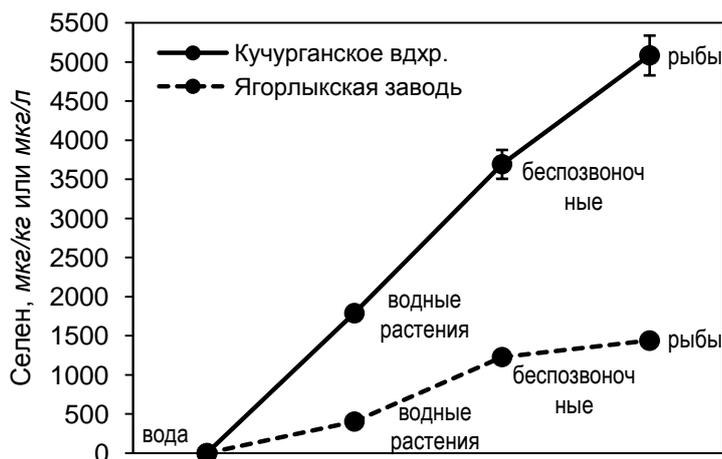


Рисунок 14 – Биоматрификация Se в пищевых цепях лентических гидроекосистем долины Днестра.

В Кучурганском водохранилище преобладающим путем миграции и биоаккумуляции Se являются детритные пищевые цепи. В отличие от водной экосистемы, подвергающейся антропогенному влиянию, в Ягорлыкской заводи большее значение для миграции элемента приобретает планктонная пищевая цепь.

Различия в концентрациях элемента в автотрофном компоненте, а также у фито- и детритофагов рассматриваемых гидроекосистем являются статистически значимыми. В конечном счете, на высших трофических уровнях у зоофагов в условиях разных экосистем содержание Se в организме различается достаточно резко.

Необходимо отметить, что в экосистеме Кучурганского водохранилища имеет место пространственная дифференциация концентраций Se в компонентах гидробиоценоза: содержание Se в разных группах гидробионтов, населяющих литоральную зону верхнего участка водохранилища, выше по сравнению представителями тех же таксонов в других участках водоема, а также в Ягорлыкской заводи. Повышенные концентрации характерны для всех звеньев пищевой цепи – от автотрофов до организмов высших трофических уровней. Причину данного явления следует усматривать в его повышенной биодоступности, обусловленной рядом природных и антропогенных факторов. Учитывая высокий уровень биоаккумуляции Se в пищевой цепи Кучурганского водохранилища, актуальным становится сопоставление уровней концентраций элемента в различных компонентах исследованных водных экосистем с установленными пороговыми значениями токсичности (табл. 2).

Таблица 2 – Процентное соотношение проб воды, донных отложений и гидробионтов, содержание Se в которых превышает порог токсичности (% >)

	Порог токсичности (Hamilton, 2004)	Ягорлыкская заводь		Кучурганское вдхр.	
		min-max	% >	min-max	% >
Вода, мкг/л	>2	0,71–3,25	67	0,78–1,43	0
Донные отложения, мкг/кг	>4000	231–428	0	349–3937	0
Пища рыб:	>3000				
растения, мкг/кг		182–759	0	211–8056	17
беспозвоночные, мкг/кг		475–2436	0	1134–11394	55
в т.ч. насекомые, мкг/кг		475–2436	0	1134–10551	57
Рыбы, мкг/кг	>4000	532–2133	0	2842–11017	46
<b>Все пробы</b>		–	<b>4</b>	–	<b>42</b>

В гидроэкосистеме Ягорлыкской заводи концентрации Se в донных отложениях, а также у всех рассмотренных групп гидробионтов ниже установленных порогов, хотя в большинстве проб воды концентрации элемента превышают порог в 2 мкг/л. Среди образцов абиотических компонентов Кучурганского водохранилища нет превышения пороговых концентраций, при этом максимальная концентрация элемента в донных отложениях близка к ним. В пробах гидробионтов концентрации Se могут превышать 3000–4000 мкг/кг, причем наиболее высока доля таких проб среди зоокомпонента водного биоценоза. Так, если среди растений – потенциальных пищевых ресурсов рыб – только 17% проб превышают порог токсичности, то для проб беспозвоночных его превышение наблюдается в более чем половине всех проб. Подобные концентрации элемента в кормовых ресурсах рыб существенно отражаются на аккумуляции ими Se: в 46% проб мышечной ткани рыб отмечается превышение порога токсичности в 4000 мкг/кг.

Таким образом, в экосистеме Кучурганского водохранилища в результате биоаккумуляции и миграции в пищевых сетях Se накапливается в повышенных концентрациях, которые у отдельных представителей гидробиоценоза превышают установленные пороги токсичности. Причиной этому в первую очередь являются антропогенные факторы, связанные с работой электростанции, регулированием водоема и последующим коренным изменением гидрологического, термического, гидрохимического и гидробиологического режимов.

## ВЫВОДЫ

1. В почвах долины Нижнего Днестра валовое содержание Se изменяется в широких пределах от 83 до 654 мкг/кг в зависимости от типа почв и ландшафтно-геохимических условий. Количество подвижных водорастворимых соединений элемента в почвах закономерно возрастает по мере увеличения его валового содержания ( $r = +0,844$ ) и составляет 44–151 мкг/кг (23,3–42,5% от содержания валовых форм).

2. Содержание Se в надземной части растений возрастает с увеличением запасов валовых форм в почве ( $r = +0,494$ ) и определяется конкретными эколого-геохимическими условиями произрастания. При этом интенсивность биоаккумуляции Se растениями снижается с увеличением запасов его подвижных водорастворимых форм в почвах.

3. Содержание Se в организме насекомых варьирует в широких пределах от 302 до 8966 мкг/кг в зависимости от характера потребляемой пищи, конкретных геохимических условий и в меньшей степени определяется систематической принадлежностью. Уровень аккумуляции элемента выше в южном степном районе долины Днестра в условиях пойменных экосистем, при этом в биогеохимической пищевой цепи насекомых происходит биомагнификация Se.

4. Произведенные в биогеохимических условиях долины Днестра продукты пчеловодства – перга и прополис – характеризуются сравнительно высоким содержанием Se (142–312 мкг/кг и 113–491 мкг/кг соответственно), при этом в прополисе концентрация микроэлемента практически не зависит от концентраций других макро- и микроэлементов в его составе.

5. Содержание элементов в организме медоносных пчел более адекватно отражает эколого-геохимические условия места расположения пасеки, чем производимые пчелами продукты – прополис и мед.

6. Содержание Se в организме медоносных пчел зависит от концентрации натрия ( $r = +0,678$ ) и стронция ( $r = +0,529$ ), а в прополисе может быть тесно взаимосвязано с концентрациями ванадия ( $r = -0,745$ ), свинца ( $r = -0,703$ ), хрома ( $r = -0,698$ ), алюминия ( $r = -0,689$ ), кобальта ( $r = -0,626$ ) и йода ( $r = +0,660$ ).

7. В лентических водных экосистемах Ягорлыкской заводи и Кучурганского водохранилища происходит активная биомагнификация Se в пищевой цепи, причем в последнем случае ввиду антропогенного загрязнения возможна аккумуляция элемента до токсических уровней, а беспозвоночные-гидробионты способствуют энергичному включению Se в трофическую сеть гидроэкосистемы.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в научных журналах, включенных в Перечень ВАК РФ*

1. Капитальчук, М.В. Особенности аккумуляции селена растениями водных экосистем Молдавии / М.В. Капитальчук, Н.А. Голубкина, **С.С. Шешнищан**, Капитальчук И.П. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Естественные науки». – 2013. – №3. – С. 104–109.

2. Капитальчук, И.П. Влияние рельефа на распределение селена в почвах Молдовы / И.П. Капитальчук, М.В. Капитальчук, **С.С. Шешнищан**, Н.А. Голубкина // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Естественные науки». – 2015. – №3. – С. 44–53.

3. Капитальчук, И.П. Седименты как источник микроэлементов для восстановления эродированных почв Молдовы / И.П. Капитальчук, М.В. Капитальчук, Н.А. Голубкина, **С.С. Шешнищан**, Т.Л. Шешнищан // Проблемы региональной экологии. – 2015. – №4. – С. 38–42.

4. **Шешнищан, С.С.** Миграция и аккумуляция селена в пищевой цепи медоносных пчел (*Apis mellifera* L.) в лесостепных и степных экосистемах долины Днестра / С.С. Шешнищан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2016. – №3(23). – С. 107–114.

5. **Шешнищан, С.С.** Особенности биоаккумуляции селена в контрастных ландшафтно-геохимических условиях / С.С. Шешнищан, М.В. Капитальчук, Н.А. Голубкина // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Естественные науки». – 2016. – №4. – С. 67–76.

*Статьи в изданиях, включенных в мировую базу данных научного цитирования Scopus:*

6. Golubkina, N.A. Ecological importance of insects in selenium biogenic cycling [Электронный ресурс] / N.A. Golubkina, **S.S. Sheshnitsan**, M.V. Kapitalchuk // International Journal of Ecology. – 2014. – Vol. 2014, Article ID 835636. – 6 p. – Режим доступа: doi:10.1155/2014/835636

7. Golubkina, N.A. Variations of chemical element composition of bee and beekeeping products in different taxons of the biosphere / N.A. Golubkina, **S.S. Sheshnitsan**, M.V. Kapitalchuk, E. Erdenotsogt // Ecological Indicators. – 2016. – Vol. 66. – P. 452–457.

8. **Шешницан, С.С.** Обоснование сети биогеохимического мониторинга Кучурганской степной равнины / С.С. Шешницан // Вестник Приднестровского университета. Серия «Медико-биологические и химические науки». – 2013. – №2(44). – С. 170–175.

9. **Шешницан, С.С.** О включении беспозвоночных животных в систему биогеохимического мониторинга наземных экосистем Кучурганской степной равнины / С.С. Шешницан // Вестник Приднестровского университета. Серия «Медико-биологические и химические науки». – 2014. – №2(47). – С. 186–190.

10. Kapitalchuk, I. Selenium in Soils of Moldova / I. Kapitalchuk, N. Golubkina, M. Kapitalchuk, **S. Sheshnitsan** // Journal of Environmental Science and Engineering A. – 2014. – Vol. 3. – P. 268–273.

11. **Шешницан, С.С.** К вопросу о биоаккумуляции селена растениями в агроэкосистемах Кучурганской степной равнины / С.С. Шешницан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук // Вестник Приднестровского университета. – Серия «Медико-биологические и химические науки». – 2015. – №2(50). – С. 139–143.

12. Голубкина, Н.А. Об особенностях биоаккумуляции селена насекомыми в условиях лесостепи и степи долины Днестра / Н.А. Голубкина, **С.С. Шешницан**, М.В. Капитальчук, Н.В. Пэдуарь // Геоэкологические и биоэкологические проблемы Северного Причерноморья : материалы IV Международной научно-практической конференции (9–10 ноября 2012 г.). – Тирасполь : Изд-во Приднестр. ун-та, 2012. – С. 82–83.

13. **Шешницан, С.С.** Насекомые в процессах биогенной миграции селена: современное состояние проблемы / С.С. Шешницан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук // Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы : материалы VIII международной Биогеохимической школы, посвященная 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского (11–14 сентября 2013 г.). – М. : ГЕОХИ РАН, 2013. – С. 184–187.

14. Капитальчук, М.В. О содержании селена в водных и прибрежных растениях Кучурганской степной равнины и влиянии марганца и свинца на его накопление / М.В. Капитальчук, **С.С. Шешницан**, Н.А. Голубкина, А.С. Коваленко // Управление бассейном трансграничного Днестра в условиях нового бассейнового договора : материалы Международной конференции (20–21 сентября 2013 г.). – Кишинев : Есо-Tiras, 2013. – С. 135–138.

15. Капитальчук, М.В. К вопросу о влиянии железа, никеля, кадмия и селена в воде на накопление селена водными и прибрежными растениями Кучурганской степной равнины / М.В. Капитальчук, **С.С. Шешницан**, Н.А. Голубкина, А.М. Йожица // Управление бассейном трансграничного Днестра в условиях нового бассейнового договора : материалы Международной конференции (20–21 сентября 2013 г.). – Кишинев : Есо-Tiras, 2013. – С. 139–142.

16. **Шешницан, С.С.** Видовые особенности аккумуляирования селена насекомыми в биогеохимических условиях долины Днестра / С.С. Шешницан, М.В. Капитальчук, Н.А. Голубкина // Труды Ставропольского отделения Русского энтомологического общества : материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции «Актуальные вопросы энтомологии» (31

января 2014 г.). – Вып. 10. – Ставрополь : Ставропольское книжное издательство «Параграф», 2014. – С. 48–52.

17. Kapitalchuk, I. Selenium in Soils of Moldova / I. Kapitalchuk, N. Golubkina, M. Kapitalchuk, S. *Sheshnitsan* // Abstract Book of the 9th International Soil Science Congress “The Soul of Soil and Civilization”. Side, Antalya, Turkey, 14–16 October, 2014 / R. Kızılkaya, Coşkun Gülser eds. – 2014. – P. 187.

18. *Шешнищан, С.С.* О содержании макро- и микроэлементов в продуктах пчеловодства / С.С. Шешнищан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук, Э. Эрденэцогт // Труды Ставропольского отделения Русского энтомологического общества : материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции «Актуальные вопросы энтомологии» (28 мая 2015 г.). – Вып. 11. – Ставрополь : Ставропольское книжное издательство «Параграф», 2015. – С. 127–129.

19. *Шешнищан, С.С.* Продукты пчеловодства в экологическом мониторинге / С.С. Шешнищан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук, Э. Эрденэцогт // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии (в двух томах) : материалы IX международной Биогеохимической школы (24–28 августа 2015 г.). – Т. 2. – Барнаул, 2015. – С. 119–122.

20. *Шешнищан, С.С.* Формирование элементного состава продуктов пчеловодства в лесостепных и степных ландшафтах / С.С. Шешнищан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук, Т.Л. Шешнищан // Академику Л.С. Бергу – 140 лет: сборник научных статей. – Бендеры : Есо-TIRAS, 2016. – С. 294–296.

21. *Шешнищан, С.С.* Биоаккумуляция и биомагнификация селена в биогеохимических пищевых цепях долины Днестра / С.С. Шешнищан, Н.А. Голубкина, М.В. Капитальчук // Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы. – М. : ГЕОХИ РАН, 2017. – С. 338–344.

22. *Шешнищан, С.С.* Марганец, цинк, медь, молибден и селен в системе «почва-растение» в долине Нижнего Днестра: ретроспектива и перспектива исследований / С.С. Шешнищан, Т.Л. Шешнищан, И.П. Капитальчук // Успехи современной науки. – 2017. – №10(2). – С. 176–179.

23. *Шешнищан, С.С.* Закономерности биологического поглощения селена насекомыми в долине Днестра / С.С. Шешнищан, Н.А. Голубкина // Труды Ставропольского отделения Русского энтомологического общества : материалы X Международной научно-практической интернет-конференции «Актуальные вопросы энтомологии» (5 октября 2017 г.). – Вып. 13. – Ставрополь : Изд-во АГРУС Ставропольского государственного аграрного ун-та, 2017. – С. 36–40.