

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Анпилогова Дарья Дмитриевна

Экосистемная функция опыления в агроландшафтах Тульской области

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре рационального природопользования географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Пакина Алла Анатольевна –
доцент, кандидат географических наук

Официальные оппоненты:

Мячина Ксения Викторовна – доктор географических наук, Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, заведующая отделом природно-техногенных геосистем, ведущий научный сотрудник.

Гонгальский Константин Брониславович – доктор биологических наук, доцент, профессор РАН, Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, заместитель директора, главный научный сотрудник.

Голеусов Павел Вячеславович – доктор географических наук, доцент, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, кафедра природопользования и земельного кадастра, и.о. заведующего кафедрой, профессор.

Защита диссертации состоится «14» мая 2026 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.9 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1801.

E-mail: dissovetmsu016.9@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте АИС «Диссовет»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3860>

Автореферат разослан «__» апреля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

М.А. Смирнова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опыление растений насекомыми – это фундаментальный экологический процесс, от которого критически зависит как воспроизводство популяций растений в природных экосистемах, так и продуктивность аграрного сектора (Экосистемные услуги России, 2016. Т.1). По современным оценкам, до 75% ведущих мировых сельскохозяйственных культур, обеспечивающих 35% мирового производства продовольствия, в той или иной степени зависят от опыления животными, преимущественно насекомыми (Klein et al., 2007; FAO, 2019). Отсутствие эффективного опыления ставит под угрозу стабильность урожаев овощных, плодово-ягодных, масличных и зернобобовых культур, составляющих основу рациона человека, а также снижает качество семян кормовых культур, что негативно сказывается на продуктивности животноводства (IPBES, 2016). В связи с этим исследование опыления энтомофильных культур приобретает стратегическое значение в контексте реализации глобальных приоритетов ООН – обеспечение продовольственной безопасности (ЦУР 2) и защита экосистем суши (ЦУР 15).

Наиболее эффективными опылителями среди насекомых признаны пчёлы (Hymenoptera, Apoidea), что обусловлено комплексом их морфофизиологических и экологических адаптаций (Фегри, Пэйл, 1982; Willmer et al., 2017). Ключевым агентом опыления сельскохозяйственных культур выступает медоносная пчела (*Apis mellifera*), однако исключительная опора на этот вид не может обеспечить полноценного опыления энтомофильных культур из-за дефицита пчелиных семей и низкой эффективности на отдельных видах растений (Ченикалова, 2005). Исследования показывают, что существенный вклад в опыление вносят различные виды диких пчёл, которые действуют как самостоятельно, так и в синергии с медоносными (Garibaldi et al., 2013). Экономическая значимость диких опылителей высока: на долю культур, зависящих от их деятельности, приходится 9,5% стоимости мирового сельскохозяйственного производства (Gallai et al., 2009).

Степень разработанности темы исследования. Изучение биоэкологических основ опыления культурных растений насекомыми как ключевого элемента агротехники началось в середине XX века (Губин, 1947; Глушков, 1957; Панфилов, 1968; Лебедев, Бурмистров, 1975; Free, 1993 и др.). Основное внимание уделялось медоносной пчеле, однако роль диких опылителей, в частности шмелей (род *Bombus*) и люцерновой пчелы-листореза (*Megachile rotundata*), также была предметом исследований (Малышев, 1963; Гребенников, 1980; Песенко, 1982).

С середины 1990-х гг. исследования опыления хозяйственно значимых культур получили новый импульс в рамках концепции экосистемных услуг (ЭУ), что было обусловлено обострением продовольственной проблемы и глобальным расширением

посевных площадей энтомофильных культур (Bartholomé, Lavorel, 2019). В основополагающих работах по ЭУ (Daily et al., 1997; Costanza et al., 1997) и международных проектах (МЕА, ТЕЕВ, CICES) опыление выделено в качестве одной из важнейших регулирующих услуг. Основной массив исследований начал формироваться в 2000-х гг., что связано с признанием научным сообществом глобального кризиса опыления, вызванного сокращением популяций диких опылителей (Potts et al., 2010; IPBES, 2016). Один из ключевых факторов развития кризиса – изменения в структуре земельного покрова: расширение площадей под монокультурами, упрощение пространственной структуры агроландшафтов и фрагментация естественных местообитаний. Все это приводит к деградации кормовой базы, сокращению мест, пригодных для гнездования пчёл, и, как следствие, к ухудшению состояния экосистемной функции опыления.

В ответ на эти вызовы были разработаны концептуальные модели оценки обеспеченности агроландшафтов ЭУ опыления (Lonsdorf et al., 2009; Polce et al., 2013), апробированные на территориях разного пространственного масштаба. Основная часть методик направлена на моделирование пространственного распределения диких пчёл и учитывает их биоэкологические особенности.

Цель и задачи работы. *Цель исследования* – выявить зависимость экосистемной функции опыления энтомофильных сельскохозяйственных культур от структуры использования земель.

Для достижения цели выделены следующие *задачи*:

1. На примере модельной территории (в границах Венёвского района Тульской обл.) идентифицировать ценность различных категорий земельного покрова в качестве местообитаний насекомых-опылителей.
2. Определить факторы, на локальном уровне влияющие на обеспеченность сельскохозяйственных угодий с энтомофильными культурами экосистемной услугой опыления.
3. Принимая во внимание локальный характер формирования экосистемной услуги опыления, установить наличие взаимосвязи между потенциалом опыления сельхозугодий и пространственными характеристиками более крупных территориальных единиц (муниципальный район).

Объекты и методы исследования. В качестве *объекта* исследования выступают сельскохозяйственные угодья Венёвского района Тульской области. Выбор района обусловлен его аграрной специализацией и значительной, имеющей тенденцию к росту, долей энтомофильных культур в структуре посевов. Для крупномасштабного анализа выбрана территория в границах района площадью 42 км².

Методологической основой работы послужила методика пространственного моделирования обеспеченности территорий опылением, разработанная Lonsdorf et al. (2009) и реализованная в программном модуле InVEST Crop Pollination (версия InVEST 3.13.0). Для картографирования и анализа геоданных использовался программный комплекс QGIS 3.28.4.

Подготовка входных данных для программы InVEST (карты и таблицы земельного покрова, таблица гильдий) осуществлялась с применением комплекса методов. Выделение релевантных классов земельного покрова проводилось по результатам авторских полевых рекогносцировочных исследований Венёвского района. Параметризация модели осуществлена на материалах авторских геоботанических исследований (2021–2023 гг.), выполненных по стандартным методикам. Формирование таблицы гильдий пчёл реализовано на основе анализа литературных источников с привлечением энтомологических учётов. Карта земельного покрова основана на полуавтоматической классификации космического снимка (модуль Orfeo Toolbox 8.1.1 в QGIS) с постобработкой. Анализ латеральной структуры территории выполнен с использованием модуля Landscape Ecology Statistics для QGIS, реализующего алгоритмы расчёта ландшафтных метрик FRAGSTATS. Кластеризация пространственных данных распределения индекса обилия опылителей проводилась средствами модуля Orfeo Toolbox в QGIS (алгоритм k-средних).

Научная новизна. Впервые в российской практике проведена комплексная оценка состояния экосистемной функции опыления на разных пространственных уровнях при различных сценариях использования земель. Для анализа по методике Лонсдорфа разработан формализованный подход к выделению экологических групп пчёл, идентификации значимых для опыления классов земельного покрова и количественной оценке их параметров на основе результатов полевых исследований с привлечением актуальных литературных данных. Обосновано применение кластерного анализа для выявления статистически значимых пространственных неоднородностей в обеспеченности сельхозугодий опылением на уровне муниципального района.

Защищаемые положения:

- 1.** Ключевыми источниками экосистемной услуги опыления для сельскохозяйственных угодий служат травянистые экосистемы, представленные в границах модельной территории преимущественно залежами на луговой стадии постагрогенной сукцессии. Сельскохозяйственные угодья, обладая сравнительно низкой ценностью в качестве местообитаний диких пчёл-опылителей, выступают реципиентами экосистемной услуги опыления от сопредельных природных экосистем.
- 2.** Обеспеченность сельскохозяйственных угодий экосистемной услугой опыления определяется долей природных территорий в структуре земельного покрова

на локальном уровне и морфометрическими параметрами полей (размер, конфигурация), влияющими на доступность всей их площади для опылителей. Вовлечение в оборот необрабатываемых земель, сопровождаемое снижением доли участков-источников опыления, приводит к значительному снижению потенциала опыления полей. Интеграция в массивы обрабатываемых земель энтомологических микрозаказников является эффективным инструментом улучшения состояния экосистемной функции опыления сельскохозяйственных угодий в агроландшафте.

3. Установлена взаимосвязь между опылением как экосистемной услугой, реализуемой в локальном масштабе, и латеральной организацией территориальных единиц более высокого пространственного уровня (муниципальный район): территориям с более высоким потенциалом опыления полей соответствуют меньшая степень вовлечения земель в сельскохозяйственное производство и высокая фрагментация пахотных угодий.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научных представлений о закономерностях формирования и пространственной дифференциации ЭУ опыления в агроландшафтах средней полосы России. Обоснована и верифицирована применимость процессно-ориентированной модели Лонсдорфа для оценки потенциала опыления на разных пространственных уровнях. Вклад в развитие теоретических основ экосистемного учета состоит в установлении взаимосвязи между структурой землепользования на муниципальном уровне и ЭУ опыления. Разделение диких пчёл-опылителей на гильдии с детальной характеристикой их экологических параметров создаёт теоретическую базу для последующих исследований апидофауны в контексте предоставления экосистемных услуг.

Практическая значимость исследования обусловлена возможностью применения его результатов и разработанного методического подхода в системе управления сельскохозяйственным землепользованием и территориальным планированием. На уровне хозяйств предложенный инструментарий позволяет оптимизировать размещение севооборотов с энтомофильными культурами, научно обосновывать создание элементов экологического каркаса и выбирать участки для создания энтомологических микрозаказников с целью повышения урожайности. На муниципальном уровне результаты кластерного анализа и карты индекса обилия опылителей служат основой для дифференциации агроэкологической политики, выделения зон, приоритетных для развития энтомофильного растениеводства, и территорий, требующих проведения компенсационных мероприятий для поддержания опыления. Разработанный подход может использоваться при оценке экологических последствий решений о вовлечении залежей в оборот или изменении границ сельскохозяйственных земель.

Личный вклад автора. Для повышения точности моделирования потенциала опыления автором предложен методологический подход к параметризации входных данных модели InVEST Crop Pollination с использованием естественнонаучных индикаторов. В 2021–2024 гг. проведены маршрутные (7 выездов в разные месяцы вегетационного периода), геоботанические (58 описаний) и энтомологические исследования на территории Венёвского района, результаты которых применены для выделения и параметризации классов земельного покрова и гильдий опылителей. По результатам моделирования подготовлены тематические карты распределения потенциала опыления. Выполненный кластерный анализ позволил выделить в пределах муниципального района два кластера, однородных по обеспеченности полей опылением.

Степень достоверности. Достоверность сформулированных выводов подтверждается использованием репрезентативного фактического материала и согласованностью полученных данных с выводами других авторов. Обработка входных данных выполнялась на основе апробированной методики пространственного моделирования Лонсдорфа, признанной в международной практике. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях и прошли обсуждение в докладах на международных и российских научных конференциях.

Апробация. Результаты работы представлены на конференциях: Scientific conference of PhD students of FAFR, FBFS and FHLE SUA with international participation (Нитра, Словакия, 2020); Всероссийская школа-семинар «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды», посвящённая памяти Н. Ф. Реймерса и Ф. Р. Штильмарка (Пермь, 2021, 2022, 2023, 2024); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современная географическая картина мира и технологии географического образования: Трёшниковские чтения-2023» (Ульяновск, 2023).

Публикации. Материалы исследования изложены в 11 печатных работах, в том числе в 3 статьях в научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук. Методика крупномасштабной оценки ЭУ опыления с использованием модели Лонсдорфа апробирована в статьях (Анпилогова, 2024) и (Анпилогова, 2025). Оценка распределения ЭУ опыления в границах Венёвского района приводится в статьях (Анпилогова, 2024-2) и (Анпилогова, Пакина, 2025), вклад автора – 70%. Комплексная оценка регулирующих ЭУ залежных земель представлена в статье (Anpilogova, Pakina, 2022), вклад автора – 70%.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Работа изложена на 200 страницах, включает 27 таблиц и 62 рисунка. Библиографический список содержит 308 литературных источников, из них 148 на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Экосистемная функция опыления и ее значение в агроландшафтах

Антропогенная нагрузка на природные комплексы меняет ход экологических процессов, влияющих на благополучие общества (МЕА, 2005). Осознание этой взаимосвязи стимулировало с 1990-х гг. развитие концепции **экосистемных услуг (ЭУ)** – материальных и нематериальных благ, получаемых обществом от экосистем (Costanza et al., 1997). По классификации CICES, ЭУ подразделяются на обеспечивающие, регулирующие и культурные (Haines-Young and Potschin, 2018). В основе классификации лежит каскадная модель – концептуальная схема формирования ЭУ, иллюстрирующая зависимость выгод человека от биотических процессов. В рамках этой модели ЭУ – это блага, извлекаемые из **экосистемных функций** – свойств или проявлений экосистем. В современной литературе понятия экосистемных функций и услуг семантически близки и часто взаимозаменяемы, при этом оценка состояния экосистемных функций не предполагает денежного выражения (Тишков, 2005; Дьяконов, Харитонов, 2017).

Применение концепции ЭУ особенно актуально для староосвоенных территорий, трансформированных сельским хозяйством. Ключевой регулирующей ЭУ для растениеводства выступает перекрестное опыление хозяйственно значимых растений насекомыми (IPBES, 2016), среди которых особенно выделяются пчёлы (Hymenoptera: Apoidea: Anthophila). Их эффективность как опылителей связана с типичным поведением (регулярное посещение цветков для фуражировки гнёзд) и морфологическими особенностями (размер тела, опушение и наличие приспособлений для сбора и транспортировки пыльцы) (Willmer et al., 2017). Важным опылителем выступает медоносная пчела, однако численности пчелосемей, как правило, недостаточно для эффективного опыления культур (Наумкин, Мазалов, 2016). Показано, что насыщенное опыление достигается при сочетании медоносных и диких пчёл (Garibaldi et al., 2013), причем на некоторых культурах результативно работают исключительно дикие пчёлы определенных видов (Ченикалова, 2005).

Высокий научный интерес к ЭУ опыления обусловлен, с одной стороны, ростом мирового спроса на энтомофильные культуры (Venturini et al., 2017), а с другой – **глобальным кризисом опыления**, вызванным сокращением популяций диких опылителей (Potts et al., 2010). Ключевым фактором этого кризиса признана антропогенная трансформация земель, ведущая к обеднению кормовой базы и утрате мест гнездования диких пчёл (Connelly et al., 2015).

ГЛАВА 2. Управление экосистемной услугой опыления: концептуальные и методические подходы

Обоснованные управленческие решения по обеспечению сельхозкультур опылением требуют оценки ЭУ опыления на ключевых территориях, для чего в современной науке применяют различные методологические подходы. Полевые и экспериментальные методы позволяют измерять непосредственные результаты опыления (объем перенесенной пыльцы, рост урожайности), в то время как при трактовке ЭУ через присутствие опылителей на сельхозугодьях используют агентное и процессное моделирование (Bartholomé, Lavorel, 2019). Среди процессных подходов востребованы модели на основе параметров земельного покрова (Perennes et al., 2021), оценивающие обилие диких пчёл на основе их биоэкологических характеристик. Наиболее распространенной моделью этого типа является модель Лонсдорфа (Lonsdorf et al., 2009), описывающая распределение опылительной активности на мозаичной территории и влияние изменений землепользования на опыление. Модель базируется на зависимости популяций диких пчёл от доступности двух ресурсов: **субстрата гнездования** и **цветущих кормовых растений** в радиусе лётной доступности. Параметры обеспеченности каждого класса земельного покрова этими ресурсами формируют входные данные.

Пространственное моделирование опыления по Лонсдорфу позволяет описать каждый пиксель территории исследования двумя параметрами: **ценностью в качестве места гнездования** и **потенциальным присутствием диких пчёл**. Для оценки каждого параметра рассчитывается относительный индекс.

Индекс источников опылителей для пикселя x и вида (гильдии) s рассчитывается по формуле (1) (Sharp et al., 2020):

$$PS(x, s) = FR(x, s)HN(x, s)sa(s) \quad (1)$$

где $sa(s)$ – относительное обилие гильдии s ; $FR(x, s)$ – индекс доступных кормовых ресурсов; $HN(x, s)$ – индекс пригодности пикселя x для гнездования. Значения FR и HN вычисляются программой по параметрам земельного покрова и гильдий. Результат моделирования – карта источников опылителей, показывающая местообитания, из которых пчёлы распространяются по территории.

На основе индекса источников опылителей для каждого пикселя рассчитывается показатель, отражающий состояние ЭУ опыления – **индекс обилия опылителей (ИОО)**. Он зависит от доступности кормовых ресурсов, привлекающих опылителей, и количества особей, способных достичь данного пикселя. В формулу расчёта (2)

заложено экспоненциальное снижение обилия опылителей по мере удаления от мест гнездования:

$$P A(x, s, j) = \left(\frac{R A(l(x), j) f a(s, j)}{F R(x, s)} \right) \frac{\sum_{x' \in X} P S(x', s) \exp(-D(x, x')/\alpha_s)}{\exp(-D(x, x')/\alpha_s)} \quad (2)$$

где RA – индекс относительного обилия кормовых ресурсов для класса земельного покрова l в сезон j ; PS – индекс источников опылителей (1); fa – показатель активности вида s в сезон j ; $D(x, x')$ – расстояние между пикселями x и x' ; α – средняя дальность полёта вида s (м).

Несмотря на отмеченные в литературе ограничения (напр., Perennes et al., 2021; Rahimi et al., 2021a), модель Лонсдорфа является оптимальным инструментом оценки пространственного распределения диких пчёл при различных сценариях землепользования и широко применяется в современных научных исследованиях. Модифицированная версия модели Лонсдорфа, откалиброванная на полевых данных в разных природных зонах, легла в основу программы InVEST Crop Pollination. В зарубежных исследованиях выделяют два пространственных уровня оценки и управления ЭУ опыления: **уровень хозяйства и ландшафтный уровень** (территория большой площади) (Rahimi et al., 2021b). Учитывая универсальность экологических процессов и схожесть агроэкологических проблем, подобный двухуровневый подход можно считать применимым и для России.

К числу ключевых мер охраны диких опылителей относятся **организация энтомологических микрозаказников** и сохранение естественной растительности на **залежных землях** (Ченикалова, 2005; Govorushko, Nowicki, 2019). Массовый вывод пахотных земель из оборота в 1990–2000-х гг., несмотря на негативные социально-экономические последствия, создал возможности для повышения экологической устойчивости агроландшафтов. Сохранение части залежей в качестве микрозаказников улучшает потенциал опыления, а потеря пашни может быть скомпенсирована ростом урожайности на прилегающих полях.

ГЛАВА 3. Венёвский район Тульской области: характеристика

Территорией исследования стал крупнейший муниципальный район Тульской области – Венёвский (площадь – 1620 км²), расположенный на северо-востоке области на стыке лесной и лесостепной природных зон (Федотов, Васильев, 1979).

Рельеф северной части района представляет собой пологоволнистую равнину, пересечённую долинами рек, балками и оврагами. Южная часть района также

характеризуется эрозионным рельефом, при этом широкое развитие волнистых и местами плоских междуречий определяет меньшую расчлененность.

Почвенный покров района неоднороден ввиду мозаичности естественной растительности. В его составе преобладают различные подтипы серых лесных почв, сформировавшиеся под широколиственными лесами с развитым кустарниковым подлеском и густым травостоем, и оподзоленные чернозёмы, образовавшиеся под лугово-степной травянистой растительностью (Национальный атлас почв..., 2011).

Климат района умеренно-континентального типа с умеренно холодной зимой и теплым летом. Гидротермический коэффициент Селянинова снижается с 1,46 на севере до 1,34 на юге.

Венёвский район относится к промышленно-аграрным. Интенсивное сельскохозяйственное использование земель обусловило низкую лесистость района (12,7%). В структуре сельского хозяйства преобладает растениеводство (67,5% продукции) (Итоги социально-экономического развития..., 2024). Сельхозугодья занимают 97,7 тыс. га (60% территории), из них 92,4% – пашня (Доклад о состоянии..., 2024). С начала 2010-х гг. наблюдается тенденция возвращения в оборот заброшенных земель: в период 2010–2023 гг. доля необрабатываемой пашни сократилась с 74% до 45% и продолжает снижаться.

В структуре посевных площадей Венёвского района доминируют зерновые (58%), включающие энтомофильную культуру гречиху с тенденцией к расширению посевов. Технические культуры занимают 20,5% (основная доля – яровой рапс, смешанный тип опыления), кормовые травы (включая бобовые) – 12,3%. Насекомоопыляемые овощные и плодово-ягодные культуры сосредоточены в личных подсобных хозяйствах.

Природно-климатические условия региона благоприятны для пчеловодства, что подтверждается увеличением численности пчелосемей с 2016 г., однако имеющегося количества семей недостаточно для эффективного опыления площадей, занятых энтомофильными культурами.

ГЛАВА 4. Методические аспекты исследования

Для оценки зависимости ЭУ опыления энтомофильных культур от управления землепользованием необходима методика, применимая на разных пространственных уровнях. Такой подход должен учитывать управляемые факторы численности диких опылителей, при этом климатические и иные неконтролируемые факторы

фиксируются как фоновые. В этой связи перспективно применение моделирования на основе параметров земельного покрова по методике Лонсдорфа.

Набор входных данных InVEST Crop Pollination включает: 1) растровую **карту земельного покрова**; 2) **таблицу земельного покрова** (содержит значимые для опылителей особенности классов земельного покрова); 3) **таблицу гильдий** (отражает ключевые характеристики обитающих на территории экологических групп пчёл).

Вопросы подготовки входных данных для модели в существующих исследованиях проработаны недостаточно и требуют методического уточнения для повышения точности расчётов. Показано, что значения индексов высокочувствительны к параметрам таблиц гильдий и земельного покрова (Williams et al., 2012). Поэтому реализация моделирования потенциала опыления в среде InVEST требует решения двух задач: 1) выделение классов земельного покрова и экологических групп пчёл; 2) разработка метода параметризации классов и групп.

Классификация земельного покрова должна основываться на функциональном принципе, отражающем потенциал каждого класса в формировании кормовой базы и обеспечении диких пчёл субстратами гнездования. Для выделения классов предлагается использовать маршрутные рекогносцировочные исследования.

Для повышения точности моделирования при *параметризации таблицы земельного покрова* целесообразно опираться на данные геоботанических исследований (Gardner et al., 2020). Для оценки доступности субстратов гнездования предлагается использовать глазомерный учет на пробных площадях. Индикаторы доступности различных субстратов: готовые полости – проективное покрытие растительности, образующей полые стебли; мертвая древесина – средний объем мертвой древесины в сравнении со стандартным объемом для зонального типа лесов; открытые места и широкие полости (от 2 см в диаметре) – доля ненарушенного напочвенного покрова (в т. ч. покрытого войлоком/ветошью); почва – доля участков открытой или слабозадернованной почвы.

В качестве индикатора доступности кормовых растений предлагается использовать проективное покрытие цветущей энтомофильной растительности. Параметр оценивается глазомерно при проведении геоботанических описаний на пробных площадях (Борисова, 2009).

Фаунистический анализ для *выделения гильдий диких пчёл* базировался на списке Левченко и др. (2021). На основе значимых для опыления экологических параметров 99 видов гнездостроящих пчёл Венёвского района распределены по 7 гильдиям. В качестве первичного критерия формирования гильдий выступил субстрат гнездования. Виды с одинаковым типом гнездования, различающиеся по

фенологическим характеристикам и средней дальности фуражировочного полёта, отнесены к разным гильдиям.

Параметризация таблицы гильдий (табл. 1). Присвоение коэффициентов осуществлялось по результатам литературного анализа фауны пчёл Венёвского района. Для оценки относительного обилия гильдий проводились количественные учёты насекомых (июль 2024 г.).

Таблица 1 – Таблица гильдий

Гильдия	Субстрат гнездования				Активность (по месяцам)					Дальность полёта, м.	Обилие (июль)
	Готовые полости	Древесина	Открытые места	Почва	V	VI	VII	VIII	IX		
Bombus	0	0	1	0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	500	0,273
Wood-nesting	0	1	0	0	0,05	0,30	0,30	0,30	0,05	300	0,072
Cavity-nesting	1	0	0	0	0,05	0,35	0,35	0,20	0,05	200	0,172
Ground-solitary1	0	0	0	1	0,33	0,34	0,33	0	0	250	0,005
Ground-solitary2	0	0	0	1	0	0,35	0,35	0,30	0	100	0,137
Ground-solitary3	0	0	0	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0	370	0,072
Ground-social	0	0	0	1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	400	0,269

ГЛАВА 5. Оценка экосистемной услуги опыления на крупномасштабном уровне

Крупномасштабная оценка ЭУ опыления позволяет учесть при анализе небольшие участки-местообитания опылителей, что даёт возможности управления данной ЭУ без кардинальных изменений в территориальном планировании.

Для оценки выбрана модельная территория площадью 42 км² (рис. 1). Выбор объекта обусловлен однородностью рельефа (пологоволнистая равнина) и почвенного покрова (оподзоленные черноземы), разнообразием классов земельного покрова и типов сельхозугодий (полевые севообороты с рапсом, многолетние травы) и высокой долей залежей на разной стадии постагрогенной сукцессии. Перечень классов земельного покрова, составленный на основе маршрутных исследований автора (2021–2023 гг.), использован в качестве основы для объектно-ориентированной классификации спутникового снимка WorldView-2 при построении итоговой карты земельного покрова.

Выделено 11 классов земельного покрова, дифференцированных по параметрам доступности субстратов гнездования и кормовых ресурсов. Среди выделенных классов представлены залежи на луговой и мелколиственной стадии сукцессии и травянистые экосистемы, расположенные за пределами сельхозугодий и населенных пунктов (напр., придорожная растительность).

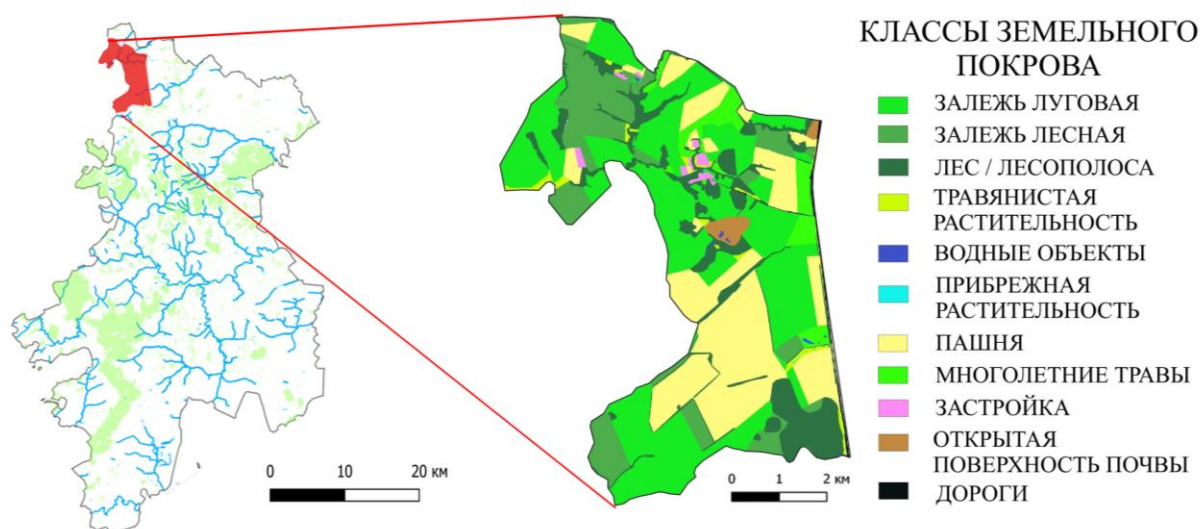


Рисунок 1 – Расположение (слева) и земельный покров модельной территории (справа)

Параметризация таблицы земельного покрова выполнялась по данным маршрутных исследований (2021–2023 гг.) и геоботанических описаний естественных фитоценозов (июль 2022–2023 гг., 18 описаний) на модельной территории (табл. 2).

Таблица 2 – Таблица земельного покрова модельной территории

Класс земельного покрова	Доступность субстратов гнездования				Доступность цветущей энтомофильной растительности				
	Готовые полости	Мертвая древесина	Открытые места	Почва	май	июнь	июль	август	сентябрь
1. Залежь луговая	0,40	0	0,90	0,20	0,45	0,60	0,60	0,40	0,20
2. Залежь лесная	0,35	0	0,90	0,30	0,30	0,45	0,45	0,35	0,15
3. Лес/ лесополоса	0,30	1	0,90	0,20	0,35	0,35	0,35	0,15	0,05
4. Травянистая растительность	0,40	0	0,90	0,20	0,45	0,60	0,60	0,35	0,15
5. Водные объекты	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. Прибрежная растительность	0,40	1	0,90	0,30	0,50	0,40	0,40	0,20	0,10
7. Пашня	0,01	0	0,20	0,05	0,20	0,30	0,30	0,30	0,05
8. Многолетние травы	0,05	0	0,70	0,20	0,05	0,45	0,60	0,50	0,10
9. Застройка	0,30	0,20	0,70	0,30	0,40	0,40	0,40	0,15	0,05
10. Открытая поверхность почвы	0	0	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0
11. Дороги	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Индекс источников опылителей, рассчитанный по гильдиям, характеризует пригодность каждого класса земельного покрова модельной территории как местообитания для пчёл-опылителей (рис. 2). Анализ распределения индекса

показывает, что наиболее ценным источником опыления выступают участки, покрытые естественной травянистой растительностью, представленные на модельной территории преимущественно залежами на луговой стадии сукцессии. Это объясняется разнообразием доступных субстратов гнездования и наличием нектарно-пыльцевого конвейера в течение всего вегетационного периода. Пахотные угодья выступают реципиентами ЭУ опыления, что связано с ограниченностью субстратов гнездования и ограниченным периодом цветения энтомофильных культур.

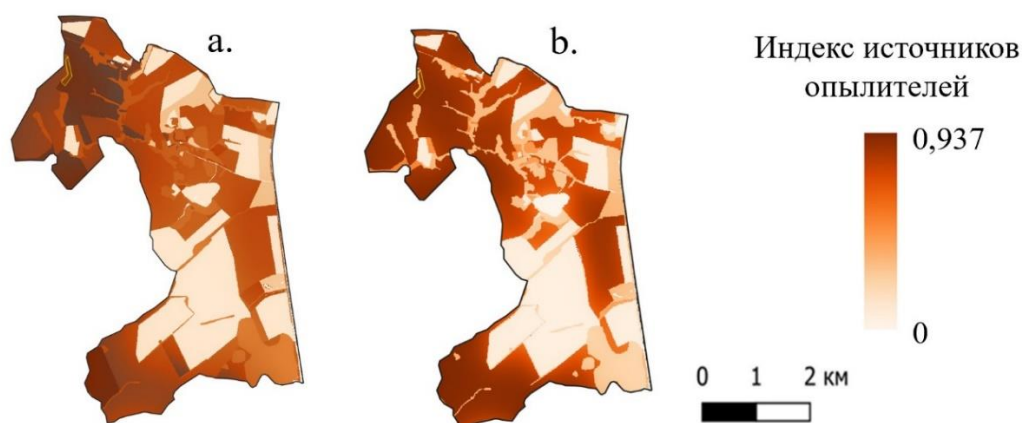


Рисунок 2 – Индекс источников опылителей для гильдий: **a.** шмели (*Bombus*); **b.** роющие пчёлы (*Ground-social*) (рассчитано InVEST Crop Pollination)

Значения **индекса обилия опылителей (ИОО)** отражают распределение потенциала опыления на территории (рис. 3). Его значения варьируют от 0 на непригодных для пчёл классах покрова до 0,309 на луговых залежах. Анализ карты позволяет четко дифференцировать пахотные угодья и естественные экосистемы. В контексте исследования интерес представляет ИОО на обрабатываемых пахотных землях: в границах модельной территории его значения находятся в диапазоне 0,033–0,124, снижаясь от краев полей к центру. Пахотные угодья значительно уступают по обилию опылителей залежным и другим естественным экосистемам, а их обеспеченность опылением в первую очередь зависит от сопредельных естественных экосистем.

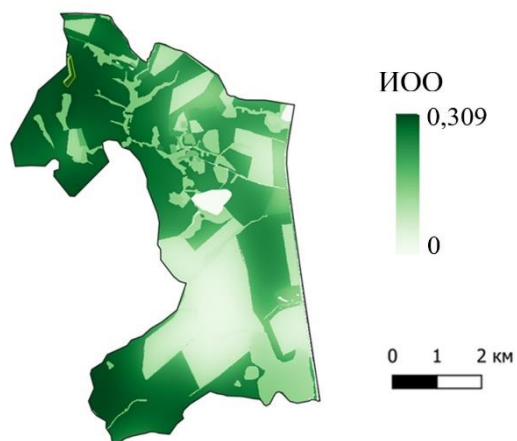


Рисунок 3 – Распределение ИОО (июль)

Моделирование показало, что залежные земли служат ключевыми источниками опыления для прилегающих пахотных угодий. При этом региональная программа развития АПК рассматривает их как резерв для расширения сельхозплощадей с целевым показателем вовлечения 90% неиспользуемых земель в оборот (Региональный доклад..., 2024). В этой связи проведена оценка последствий

полной распашки залежей для ЭУ опыления. При реализации данного сценария (рис. 4b) доля пахотных земель в структуре угодий вырастет с 21% до 79%.

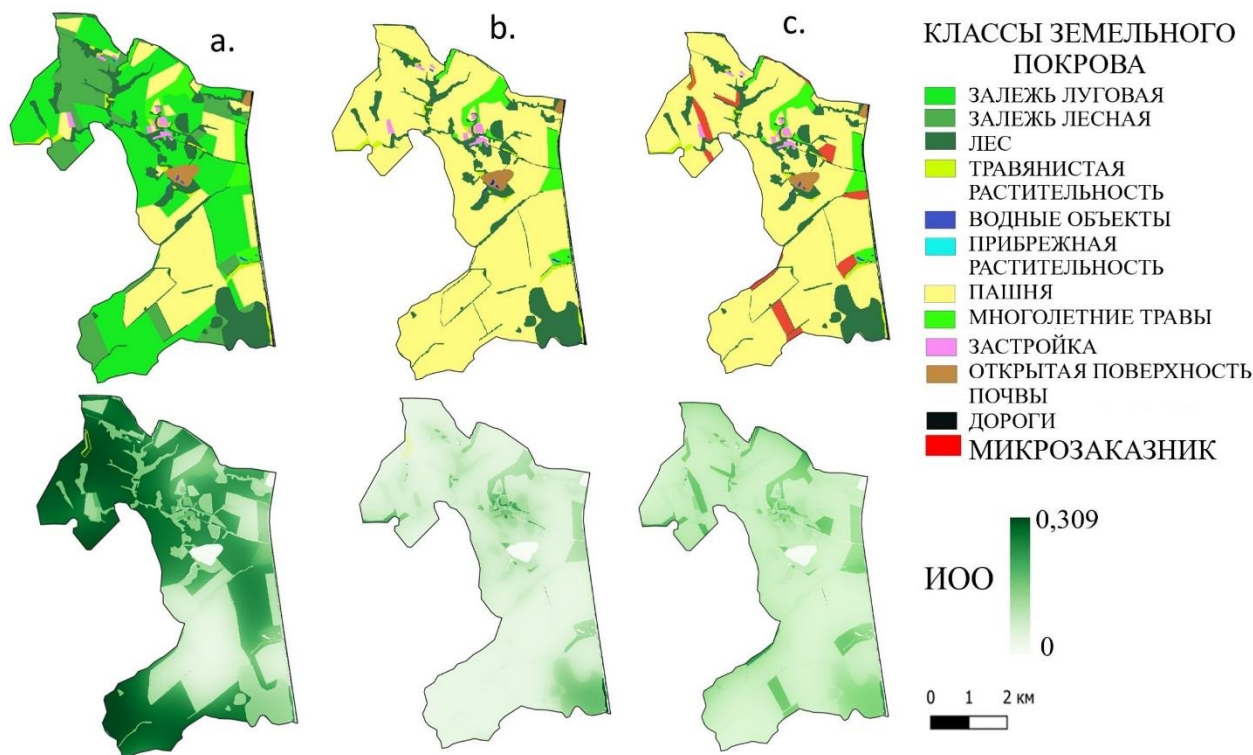


Рисунок 4 – Земельный покров (сверху) и распределение ИОО (снизу) **а.** текущая структура землепользования (на 2023 г.); **б.** введение в оборот всех залежей; **с.** создание микрозаказников

Анализ распределения ИОО показывает, что ликвидация ценных местообитаний опылителей приводит к снижению обеспеченности сельхозугодий опылением (рис. 4b). Распределение ИОО на пашне смещается в сторону низких значений: среднее значение ИОО падает с 0,074 до 0,021. При этом стандартное отклонение при сценарии 4b сокращается с 0,026 до 0,008, что отражает уменьшение вариабельности значений ИОО на пашне.

Крупномасштабный анализ по методике Лонсдорфа позволяет тестировать различные инструменты управления землепользованием с точки зрения влияния на потенциал опыления полей. В условиях модельного агроландшафта целесообразно рассмотреть сценарий, предусматривающий сохранение участков залежей в качестве энтомологических микрозаказников. Отбор таких участков предлагается проводить среди залежей, распашка которых (сценарий на рис. 4b) демонстрировала бы минимальные значения ИОО (сценарий на рис. 4c). Анализ сценария на рисунке 4c показывает: при незначительном сокращении площади используемой пашни (на 5%) создание микрозаказников способствует росту основных показателей ИОО. Минимальное значение индекса приближается к уровню, характерному для текущего сценария с высокой долей заброшенных угодий (табл. 3).

Таблица 3 – Статистические показатели ИОО при разных сценариях

Сценарий землепользования	Текущая ситуация	Возвращение всех залежей в оборот	Создание микрозаказников
Доля пашни (%)	20,7	78,8	74,7
ИОО – максимальное значение	0,124	0,074	0,081
ИОО – среднее значение	0,074	0,021	0,048
ИОО – минимальное значение	0,033	0,009	0,023
ИОО – стандартное отклонение (σ)	0,026	0,008	0,016

ГЛАВА 6. Оценка экосистемной услуги опыления на муниципальном уровне

Локальный масштаб формирования ЭУ опыления, обусловленный ограниченной дальностью полета диких пчёл от гнезда, ставит потенциал опыления полей в зависимость от структуры земельного покрова на локальном уровне. Однако для управления сельскохозяйственным землепользованием на муниципальном уровне актуальным является вопрос о существовании связи между обеспеченностью угодий опылением и пространственными характеристиками более крупных территориальных единиц.

Карта земельного покрова Венёвского района (рис. 5) создана на основе фрагмента глобальной карты землепользования ESRI Land Cover с постобработкой. На карте представлены 6 обобщенных классов покрова (в скобках приведена доля в общей площади района): пашня (42,5%), лес (лесополоса) (30,4%), травянистая растительность (20,8%), застройка (3,4%), водные объекты (0,6%), асфальтированные дороги (0,3%).

Источниками данных для параметризации таблицы земельного покрова послужили результаты полевых исследований автора (7 маршрутных выездов, 58 геоботанических описаний). Поскольку используемые классы носят обобщенный характер и зачастую объединяют несколько типов фитоценозов, каждому классу присвоены усредненные значения.

Для оценки связи структуры землепользования Венёвского района с потенциалом опыления проанализировано изменение среднего ИОО на полях в 2023 г. относительно 2017 г. (самые ранние доступные данные). За период 2017–2023 гг.

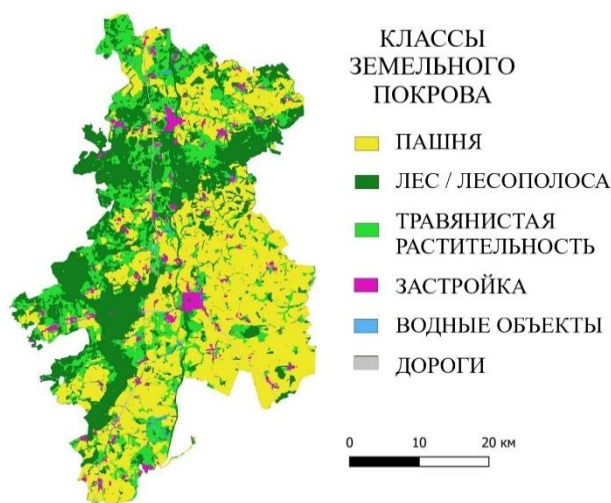


Рисунок 5 – Земельный покров Венёвского района (2023 г.)

среднее значение индекса сократилось на 17% (с 0,041 до 0,034). Эти изменения сопровождались сдвигами в структуре земельного покрова: доля пашни выросла с 38,6% до 46,7%, а доля травянистых экосистем сократилась более чем в 1,7 раза, что свидетельствует о вовлечении в оборот ранее неиспользуемых сельхозугодий.

Моделирование ИОО в Венёвском районе (рис. 6а) выявило неравномерность распределения потенциала опыления на полях (рис. 6б): наименее обеспеченные участки приурочены к юго-восточной части, характеризующейся высокой степенью распаханности. Для проверки гипотезы о существовании статистически значимых территориальных неоднородностей пространственные данные ИОО подвергнуты кластерному анализу (метод k-средних), позволяющему зонировать территорию по принципу максимального внутрикластерного сходства обеспеченности пашни опылением. С учётом наличия двух физико-географических районов анализ выполнен с заранее заданным числом кластеров, равным двум.

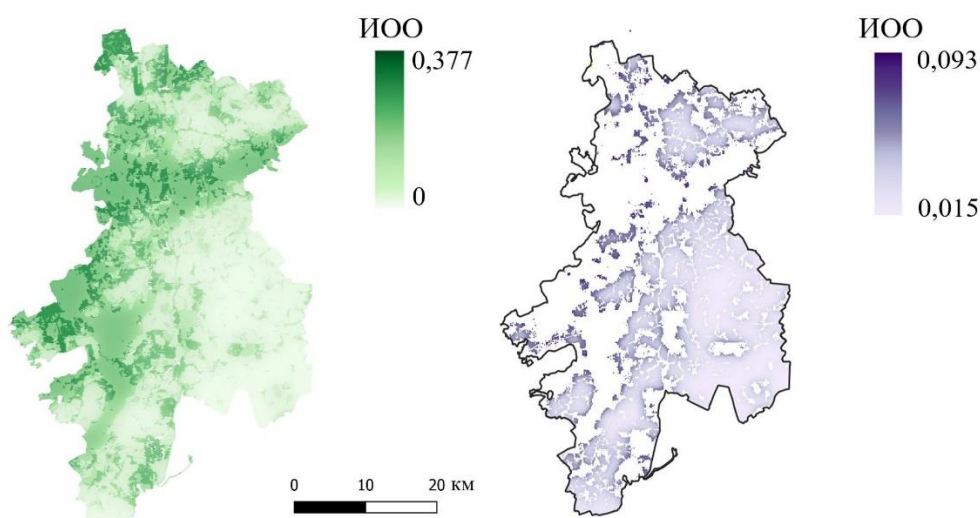


Рисунок 6 – Распределение ИОО на территории Венёвского района (слева) и на сельхозугодьях (справа) (июль 2023 г.)

По результатам кластеризации (рис. 7), Кластер 1 занимает 64% площади района и охватывает территорию, принадлежащую лесной зоне, а также территорию лесостепной части района с широколиственными массивами. Кластер 2 локализован в лесостепной зоне на оподзоленных черноземах и характеризуется большей распаханностью. Средний ИОО в пределах пахотных угодий Кластера 1, составляющий 0,048, превышает соответствующий показатель Кластера 2, равный 0,025. Статистически значимые различия распределений ИОО между кластерами указывают на более высокую обеспеченность опылением полей Кластера 1 относительно Кластера 2.

Анализ пространственной структуры кластеров с помощью ландшафтных метрик FRAGSTATS позволил выявить взаимосвязь между ИОО на пашне и долей естественных древесных и травянистых экосистем в площади кластера. В Кластере 1 площади пахотных, лесных и травянистых угодий сопоставимы (33,3%, 37,7% и 24,7% соответственно), тогда как в Кластере 2 доминируют пахотные земли (79,1%), а доли лугов и лесов не превышают 9% каждая. При этом в Кластере 2 лесные и луговые участки характеризуются меньшей площадью и высокой степенью фрагментации, в то время как пахотные угодья отличаются крупными размерами и высокой связностью.

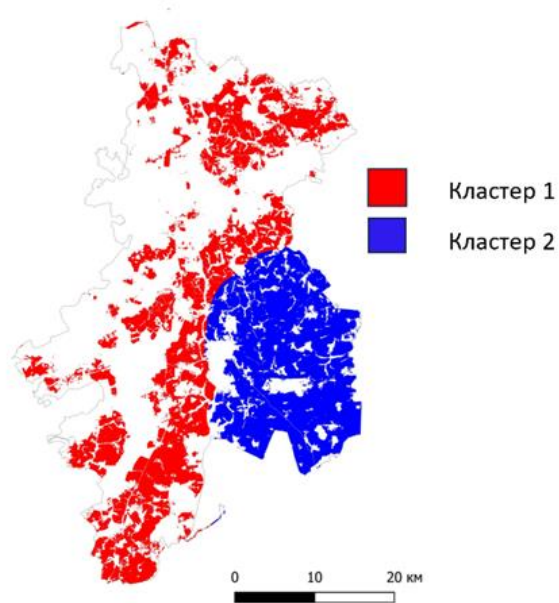


Рисунок 7 – Кластеризация ИОО на пашне

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное диссертационное исследование направлено на оценку зависимости ЭУ опыления энтомофильных культур от структуры земельного покрова для обоснования подходов к управлению землепользованием на различных пространственных уровнях. Для достижения поставленной цели в работе адаптирована и применена методика пространственного моделирования на основе модели Лонсдорфа, позволяющая выявить ключевые источники ЭУ опыления, оценить обеспеченность пашни опылителями и протестировать различные сценарии развития территории. Для преодоления основного ограничения методики – дефицита входных данных по параметрам земельного покрова и фауне пчёл – предложен подход к выделению и параметризации классов земельного покрова и гильдий пчёл на основе авторских полевых исследований и анализа литературных данных, что позволило повысить точность моделирования.

Исследование закономерностей распределения ЭУ опыления на территории Венёвского района позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Моделирование на разных пространственных уровнях позволило установить наиболее ценные в качестве местообитаний диких пчёл классы земельного покрова – естественные травянистые экосистемы, что обусловлено доступностью субстратов гнездования разных экологических групп пчёл и обилием цветущих кормовых растений в течение вегетационного сезона. На модельной территории крупномасштабного исследования основными источниками опылителей выступают

залежи на луговой и мелколиственной стадиях постагрогенной сукцессии, благодаря мозаичности напочвенного покрова и высокому проективному покрытию цветущего разнотравья.

2. Сельхозугодья с энтомофильными культурами выступают реципиентами экосистемной услуги опыления вследствие дефицита субстратов гнездования (распашка, удаление растительных остатков) и ограниченного периода массового цветения возделываемых культур. Наибольшие значения ИОО характерны для полей, граничащих с естественными экосистемами, при этом внутри массива индекс снижается от края к центру из-за ограниченности радиуса фуражировочных полётов диких пчёл.

3. Сценарное моделирование распределения относительного обилия опылителей на крупномасштабном уровне показало, что полное вовлечение всех залежных земель в сельхозоборот ведет к резкому падению среднего значения ИОО на пашне (в 3,5 раза). В то же время сохранение части залежей (5% от площади пашни) в качестве энтомологических микрозаказников позволяет существенно повысить потенциал опыления сельхозугодий.

4. Моделирование экосистемной услуги опыления на муниципальном уровне подтвердило закономерности, выявленные при крупномасштабном анализе, и позволило установить взаимосвязь между трансформацией структуры землепользования и потенциалом опыления энтомофильных культур. Сравнительный анализ данных за 2017 и 2023 гг. показал: вовлечение залежей в оборот, сократившее долю травянистых экосистем в 1,7 раза, привело к снижению среднего ИОО на пашне на 17%.

5. Кластеризация пахотных угодий Венёвского района позволила выделить две зоны, статистически значимо различающиеся по уровню обеспеченности пашни ЭУ опыления. Анализ композиционных и конфигурационных ландшафтных метрик показал, что выявленные различия связаны с особенностями пространственной структуры землепользования: более высокие значения ИОО характерны для кластера с большей долей естественной травянистой и древесной растительности и высокой фрагментацией пахотных угодий.

Разработанный в диссертации методический подход и полученные результаты обладают широкой практической применимостью. В управлении сельскохозяйственным землепользованием предложенный инструментарий может использоваться на уровне отдельных хозяйств для оптимизации размещения энтомофильных культур, обоснования создания элементов экологического каркаса и выбора участков под микрозаказники. На муниципальном уровне подход позволяет дифференцировать агроэкологическую политику, определяя приоритетные зоны растениеводства и территории для компенсационных мер поддержки опыления. В системе территориального планирования применение данного подхода дает возможность оценивать экологические последствия решений о вовлечении залежных земель в оборот.

Полученные результаты открывают перспективы дальнейшего развития исследования, связанные с дополнительным функционалом InVEST Crop Pollination. Во-первых, программа InVEST позволяет сопоставить рассчитанный потенциал опыления с необходимым объемом ЭУ применительно к конкретным сценариям размещения энтомофильных культур, а также интегрировать в анализ данные о размещенных пасаках, что повышает полноту оценки. Во-вторых, при наличии эмпирических данных о степени зависимости культур от насекомоопыления модель дает возможность перейти от относительных индексов к расчету вклада диких опылителей в урожайность в стоимостном выражении и, соответственно, к монетарной оценке экономического эффекта от управленческих мер, связанных с изменением структуры земельного покрова. Реализация этих направлений позволит обосновать включение ЭУ опыления в систему эколого-экономического учета и механизмы принятия решений в области сельскохозяйственного землепользования.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность научному руководителю – доценту, кандидату географических наук А.А. Пакиной – за постоянное внимание и всестороннюю поддержку при выполнении исследования и подготовке публикаций. Благодарю Центр коллективного пользования «Геопортал» МГУ имени М.В. Ломоносова за предоставление материалов дистанционного зондирования, старшего ГИС-аналитика Natural Capital Project (Стэнфордский университет*) С. Уолни – за консультации по работе с программным обеспечением InVEST, кандидата биологических наук Т.В. Левченко (Государственный Дарвиновский музей) – за консультации по биоэкологическим особенностям диких пчёл, доктора биологических наук Е.И. Голубеву и кандидата географических наук Г.Д. Мухина за рецензирование предварительного варианта работы и ценные замечания.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

- 1. Анпилогова Д. Д., Пакина А. А.** Влияние пространственной структуры агроландшафта на экосистемную услугу опыления // Проблемы региональной экологии. – 2025. – № 5 – С. 69–74. EDN: BHVOZV. Импакт-фактор 0,34 (РИНЦ); 0,476 п.л., вклад автора 70%.
- 2. Анпилогова Д. Д.** Оценка экосистемной услуги опыления для оптимизации размещения энтомофильных культур в агроландшафте // Естественные и технические науки. – 2025. – Т. 206, № 7 – С. 94–98. EDN: KDUEVT. Импакт-фактор 0,072 (РИНЦ); 0,325 п.л.
- 3. Anpilogova D., Pakina A.** Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia // One Ecosystem. – 2022. – Vol. 7. – Article No. e77969. DOI: 10.3897/oneeco.7.e77969. Импакт-фактор 0,787 (SJR); 1,226 п.л.; вклад автора – 70%.

* Деятельность организации признана нежелательной на территории РФ

Прочие публикации

4. **Анпилогова Д. Д.** Оценка экосистемной услуги опыления для оптимизации территориальной структуры агроландшафтов // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 2. – С. 8–14. EDN: CISTER. Импакт-фактор 0,444 (РИНЦ); 0,511 п.л
5. **Анпилогова Д. Д.** Оценка экосистемной услуги опыления в агроландшафте (на примере Вeneвского района Тульской области) // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2024. – Т. 9. – № 1 (35). – С. 5–13. EDN: VHONEI. Импакт-фактор 0,325 (РИНЦ); 0,712 п.л.
6. **Анпилогова Д. Д., Пакина А. А.** Экономическая оценка обеспеченности полей опылением при организации энтомологического микрозаказника: методические аспекты // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды [Электронный ресурс]: сборник материалов всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Г. А. Воронова, Н. Ф. Реймерса и Ф. Р. Штильмарка (25–27 апреля 2024 г., г. Пермь) / под ред. С. А. Бузмакова; Пермский государственный национальный исследовательский университет – Пермь: ПГНИУ, 2024. – 615 с. – С. 18–22. EDN: UIOQWB. 0,383 п.л., вклад автора – 70%.
7. **Анпилогова Д. Д.** Анализ земельного покрова территории для оценки экосистемной функции опыления: методические аспекты // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: материалы XIV Международной ландшафтной конференции. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2023. – Т. 1. – С. 339–342. EDN: ENEQKI. 0,384 п.л.
8. **Анпилогова Д. Д.** Анализ фауны пчёл для оценки экосистемной услуги опыления в агроландшафте // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды [Электронный ресурс]: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка (г. Пермь, ПГНИУ, 20–21 апреля 2023 года) / под ред. С.А. Бузмакова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2023. – 691 с. – С. 17–21. EDN: QISRKX. 0,403 п.л.
9. **Пакина А. А., Анпилогова Д. Д.** Значение экосистемной функции опыления в контексте эффективности землепользования // Трешниковские чтения – 2023. Современная географическая картина мира и технологии географического образования. – Ульяновск: УлГПУ им. И. Н. Ульянова, 2023. – С. 42–44. EDN: VBJPOQ. 0,342 п.л., вклад автора – 15%.
10. **Анпилогова Д. Д.** Оценка регулирующих экосистемных услуг залежных земель для управления землепользованием // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды [Электронный ресурс]: сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н. Ф. Реймерса и Ф. Р. Штильмарка (21-22 апреля 2022 г.) / под ред. С. А. Бузмакова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2022. – 605 с. – С. 16–21. EDN: LNXBYS. 0,367 п.л.
11. **Анпилогова Д. Д.** Методологические аспекты оценки экологических функций залежных земель // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды [Электронный ресурс]: сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н. Ф. Реймерса и Ф. Р. Штильмарка (22-23 апреля 2021 г.) / под ред. С. А. Бузмакова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2021. – 461 с. – С. 354–357. EDN: QYIKEF. 0,404 п.л.