

СТАТЬИ

УДК 911.9

DOI 10.17513/use.38212

**ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМНОЙ УСЛУГИ ОПЫЛЕНИЯ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ
СТРУКТУРЫ АГРОЛАНДШАФТОВ****Анпилогова Д.Д.***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
Москва, e-mail: d.anpilogova@mail.ru*

Перекрестное опыление насекомыми является важнейшим элементом агротехники многих плодовых, масличных и овощных культур. Наиболее эффективными насекомыми-опылителями, многократно посещающими цветки и способными к переносу большого объема пыльцевого груза, считаются пчелы (надсемейство *Apoidea*, секция *Anthophila*). В условиях недостаточного для насыщенного опыления количества домашних медоносных пчел (*Apis mellifera*) и их низкой эффективности в опылении ряда культур особую важность приобретает опыление энтомофильных сельхозкультур дикими пчелами. В настоящей работе изложены результаты крупномасштабной оценки состояния экосистемной услуги опыления сельхозгодной агроландшафта с высокой долей залежных земель при разных сценариях землепользования. Территория исследования расположена в Веневском районе Тульской области. Оценка базируется на моделировании распределения относительного индекса обилия опылителей по характеристикам земельного покрова в программной среде InVEST Crop Pollination. Сопоставление относительного обилия опылителей на разных типах земельного покрова показало, что источниками пчел-опылителей в агроландшафте выступают естественные экосистемы, в первую очередь лесные массивы и залежи на разной стадии постагрогенной сукцессии. Анализ зависимости обеспеченности опылением полей с энтомофильным компонентом в схемах севооборота от пространственной структуры агроландшафта при разных сценариях использования залежных земель показал, что при вводе в оборот неиспользуемых сельхозгодных участков сохранения небольших участков залежей в качестве энтомологических микрозаказников способствует значительному улучшению состояния экосистемной услуги опыления на исследуемой территории.

Ключевые слова: агроландшафт, залежные земли, земельный покров, опыление культурных растений, фауна пчел, экосистемные услуги

**ASSESSMENT OF POLLINATION ECOSYSTEM SERVICE
FOR OPTIMIZING THE SPATIAL STRUCTURE
OF THE AGRICULTURAL LANDSCAPE****Anpilogova D.D.***Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: d.anpilogova@mail.ru*

Insect pollination is critical for the production of many fruit and seed crops. Bees (superfamily *Apoidea*, group *Anthophila*) are considered as dominant plant pollinators, demonstrating high flower visitation rates and pollen loads. Since the number of domestic honeybees' colonies (*Apis mellifera*) is often insufficient for saturated pollination and efficiency of honeybees in pollination of some of crops is relatively low, wild bees are gaining the importance as crop pollinators. This paper presents a landscape-level assessment of the pollination ecosystem service provision of the farmland in a landscape with a high proportion of abandoned lands. The case study area is located in the Venev District, Tula Region, Russia. To assess the pollination ecosystem service provision, the InVEST Crop Pollination software was used. This index-based model quantifies and maps scores for relative pollinator abundance across the landscape. Comparison of the relative pollinator abundance on different land-cover types revealed the main habitats of wild bees in the study area – they are natural ecosystems, i.e. forests and abandoned lands at different stages of secondary succession. According to the analysis of the relationship between the landscape spatial structure under different land-use scenarios and the capacity of the landscape to provide the farmland with pollination ecosystem service, preservation of small fallow areas as entomological micro-reserves leads to a significant improvement of the pollination ecosystem service under the scenario of mass cultivation of abandoned agricultural lands.

Keywords: agricultural landscape, abandoned agricultural lands, land-cover, crop pollination, bee fauna, ecosystem services

Экологический процесс биотического перекрестного опыления цветковых растений имеет огромное значение как для воспроизводства популяций естественно произрастающих растений, так и для сельского хозяйства, где эффективный перенос пыльцы выступает обязательным элементом агротехники многих овощных, плодовых, технических и кормовых культур [1].

Важность опыления как жизнеобеспечивающей функции отмечалась еще в первых работах по проблематике экосистемных услуг (далее по тексту – ЭУ), однако основной массив исследований опыления как ЭУ стал формироваться с начала 2000-х гг., что связано с ростом мирового спроса на культуры, урожайность и качество семян которых зависят от перекрестного опыления,

и сокращением популяций диких опылителей [2]. Согласно исследованиям, наиболее эффективными насекомыми-опылителями являются пчелы (надсемейство *Apoidea*, секция *Anthophila*), поскольку регулярное посещение цветков является типичным элементом их поведения, а размер тела и характер опушения позволяют переносить большой объем пыльцевого груза [3, 4]. Ведущая роль в опылении сельхозкультур принадлежит домашним медоносным пчелам (*Apis mellifera*), однако количество их семей зачастую недостаточно для насыщенного опыления возделываемых культур, и, кроме того, медоносная пчела показывает низкую эффективность в опылении ряда растений [5]. Доказано также, что сочетание опылительной деятельности медоносных и диких пчел способствует повышению урожайности даже тех культур, на которых медоносная пчела работает вполне эффективно [6]. Приблизительно 9,5% мировой сельскохозяйственной продукции приходится на культуры, опыляемые дикими пчелами [7]. На территории России представлено 7 семейств пчел [8].

Исследования, направленные на включение оценок ЭУ в процесс управления агроландшафтами, приобретают в настоящее время особенную актуальность [2, 9]. В контексте опыления сельхозкультур управление должно быть нацелено на сохранение численности, видового и функционального разнообразия диких насекомых,

выступающих эффективными опылителями энтомофильных растений, возделываемых в конкретной местности. На обеспеченность сельхозугодий определенной территории опылителями влияет не только применяемая агротехника (технология распашки, применение инсектицидов и гербицидов и др.), но и структура земельного покрова агроландшафта: соотношение площадей и взаимное расположение разных типов угодий [10]. Целью настоящего исследования является оценка ЭУ опыления в агроландшафте с высокой долей неиспользуемых сельхозугодий при изменениях структуры земельного покрова, связанных с внедрением различных сценариев использования залежных земель.

Материалы и методы исследования

В качестве модельной территории для оценки ЭУ опыления на крупномасштабном уровне выбран агроландшафт площадью 42 км², расположенный в северо-западной части Веневского района Тульской области, в подзоне широколиственных лесов (рис. 1). Выбор территории исследования обоснован ее однородностью по почвенным условиям (оподзоленные черноземы), сравнительно высоким разнообразием классов земельного покрова и типов сельхозугодий (в том числе полевые севообороты с рапсом и многолетние травы с бобовым компонентом) и очень высокой долей залежей на ранней стадии постагрогенной сукцессии.

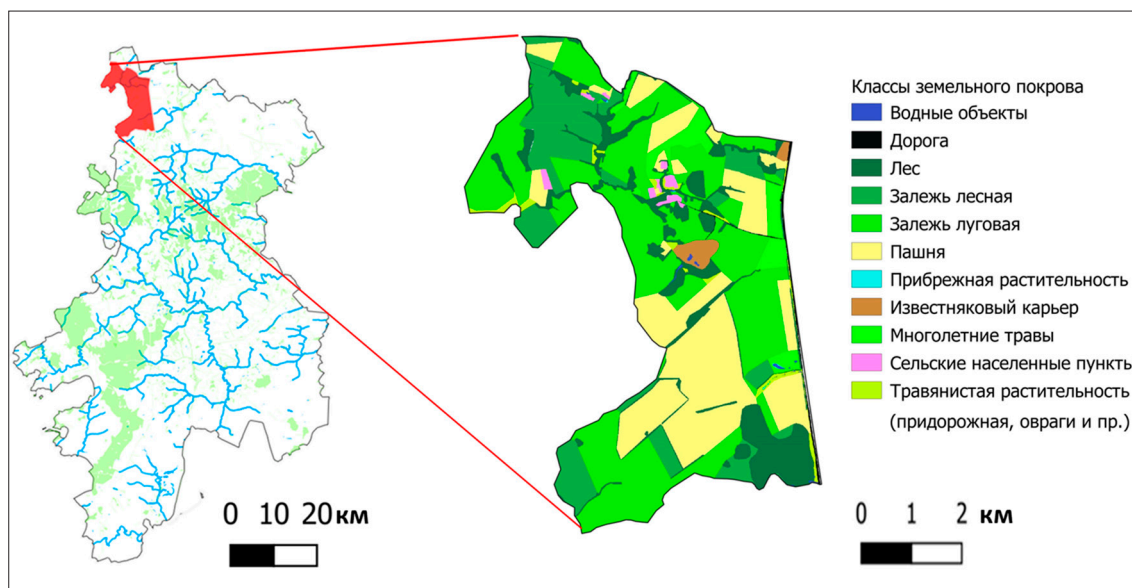


Рис. 1. Расположение модельной территории на карте Веневского района и карта земельного покрова

Оценка предоставленного объема ЭУ опыления в границах модельной территории проводилась в программной среде InVEST Crop Pollination. Данная программа позволяет рассчитать и визуализировать на карте относительный индекс обилия опылителей (далее по тексту – ИОО) по методике, предложенной в работе [11]. Данная модель (называемая моделью Лонсдорфа) является формализацией концептуальной схемы, описывающей процессы распределения опылительной деятельности в ландшафте и влияние изменений в сельскохозяйственном землепользовании на ЭУ

$$PA(x, s, j) = \left(\frac{RA(l(x), j) fa(s, j)}{FR(x, s)} \right) \frac{\sum_{x' \in X} PS(x', s) \exp\left(-\frac{D(x, x')}{\alpha_s}\right)}{\exp\left(-\frac{D(x, x')}{\alpha_s}\right)}, \quad (*)$$

где RA – индекс относительного обилия цветочных ресурсов для класса земельного покрова l в сезон j ; PS – индекс источников опылителей, вычисляемый по данным биофизической таблицы и таблицы гильдий; FR – индекс кормовых ресурсов для вида (гильдии) s ; fa – показатель фуражировочной активности вида s в сезон j ; $D(x, x')$ – расстояние между пикселями x и x' ; α – средняя дальность полета вида s (м).

Карта земельного покрова модельной территории (рис. 1) создана на основе классификации космического снимка WorldView-2 (от 21.08.2021) с пространственным разрешением 2 м с постобработкой. Флористический состав фитоценозов разных классов земельного покрова определялся в ходе полевых геоботанических исследований (2021–2023 гг.) по стандартным геоботаническим методикам. В границах объекта исследования выделено 11 классов земельного покрова, различающихся по категориям земель и важным для оценки опыления параметрам. Наибольшую долю в структуре земель имеют залежи на луговой стадии постагрогенной сукцессии (42,6%), на которых сформированы разнотравно-вейниковые ассоциации, образующие в течение вегетационного периода нектарно-пыльцевой конвейер. Доля пашни (полевых севооборотов с энтомофильным компонентом) составляет 20,7%. Мелколиственные лесные массивы и полезащитные лесополосы в совокупности занимают 12,7% площади. В то же время залежи, открытые мелколиственной древесной расти-

опыления [12]. В основе модели лежит предпосылка о том, что для устойчивого существования популяций диких пчел в ландшафте необходимы два базовых ресурса – субстрат гнездования и кормовые растения в пределах дальности фуражировочных полетов от гнезда [11]. В качестве входных данных в программу InVEST требуется карта земельного покрова и оценка параметров доступности обоих типов ресурсов для каждого класса земельного покрова, представленная в виде в виде двух таблиц – биофизической таблицы и таблицы гильдий [13]. ИОО (PA) рассчитывается по формуле

тельностью, по площади превышают леса: их доля достигает 16,7%.

В табл. 1 представлена таблица гильдий, отражающая значимые для опыления сельскохозяйственных культур характеристики представленных на территории экологических групп диких пчел (гильдий): субстрат гнездования, период лёта по месяцам вегетационного периода, средняя дальность фуражировочных полетов и относительное обилие в сообществе. В основу проведенного для целей настоящей работы анализа апидофауны был положен аннотированный список видов ООПТ «Урочище Излучина», расположенной на территории Веневского района [14]. В анализ включено 99 видов диких гнездостроящих пчел из 6 семейств (*Colletidae*, *Andrenidae*, *Halictidae*, *Melittidae*, *Megachilidae*, *Apidae*). Первичным критерием для выделения гильдий выступал субстрат гнездования – почва, готовые полости, открытые места или мертвая древесина (перечень субстратов по [8]). Проведенный анализ позволил разделить обитающие на территории виды на 7 гильдий: шмели (*Bombus*); одиночные пчелы, гнездящиеся в мертвой древесине (*Wood-nesting*); одиночные пчелы, гнездящиеся в готовых полостях (*Cavity-nesting*); одиночные роющие пчелы весенне-раннелетней фенологической группы (*Ground-solitary1*); одиночные роющие пчелы летней группы (*Ground-solitary2*); одиночные бивольтинные виды с растянутым периодом лёта (*Ground-solitary3*); роющие пчелы с растянутым периодом лёта, ведущие примитивно-эусоциальный или субсоциальный образ жизни.

Таблица 1

Таблица гильдий

| Гильдия | Субстрат гнездования | | | | Активность по месяцам | | | | | Дальность полета, м | Обилие |
|------------------|----------------------|-----------|-------------|-------|-----------------------|------|------|------|------|---------------------|--------|
| | Готовые полости | Древесина | Откр. места | Почва | V | VI | VII | VIII | IX | | |
| Bombus | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 500 | 0,2 |
| Wood-nesting | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,05 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,05 | 300 | 0,1 |
| Cavity-nesting | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | 0,35 | 0,35 | 0,2 | 0,05 | 200 | 0,14 |
| Ground-solitary1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,33 | 0,34 | 0,33 | 0 | 0 | 250 | 0,14 |
| Ground-solitary2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,35 | 0,35 | 0,3 | 0 | 100 | 0,14 |
| Ground-solitary3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0 | 370 | 0,1 |
| Ground-social | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 400 | 0,18 |

Таблица 2

Биофизическая таблица

| Класс земельного покрова | Субстрат гнездования (доступность) | | | | Цветущие растения по месяцам (проективное покрытие) | | | | |
|--------------------------|------------------------------------|-----------|-------------|-------|---|------|------|------|------|
| | Готовые полости | Древесина | Откр. места | Почва | V | VI | VII | VIII | IX |
| Залежь луговая | 0,4 | 0 | 0,9 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 0,6 | 0,4 |
| Залежь лесная | 0,35 | 0 | 0,9 | 0,3 | 0,5 | 0,45 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| Древесная растит. | 0,3 | 1 | 0,9 | 0,2 | 0,5 | 0,45 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| Луг | 0,4 | 0 | 0,9 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 0,6 | 0,4 |
| Вода | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Прибрежная растит. | 0,4 | 1 | 0,9 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,75 | 0,6 | 0,4 |
| Пашня | 0,01 | 0 | 0,2 | 0,05 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,05 |
| Многолетние травы | 0,05 | 0 | 0,7 | 0,2 | 0,05 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,1 |
| Населенные пункты | 0,3 | 0,4 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,2 | 0,1 |
| Известн. карьеры | 0 | 0 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| Дороги | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Значения параметров, приведенных в таблице гильдий, оценивались на основе литературных сведений об экологических особенностях составляющих гильдии видов в географически близких к Тульской области регионах.

Биофизическая таблица 2 отражает параметры классов земельного покрова, значимые с точки зрения опыления. Доступность субстратов гнездования и значения проективного покрытия цветущих энтомофильных растений установлены глазомерно в ходе полевых выездов в Веневский район (летний период 2021–2023 гг.).

Результаты исследования и их обсуждение

Подготовленные входные данные были загружены в среду InVEST Crop Pollination для расчета ИОО и визуализации его распределения на карте модельной территории. Обеспеченность ландшафта опылением в июле во время массового цветения ярового рапса отражена на рис. 2. Значения индекса варьируют от 0 на полностью непригодных для пчел классах земельного покрова (асфальтированные дороги, вода) до 0,308 на залежах.

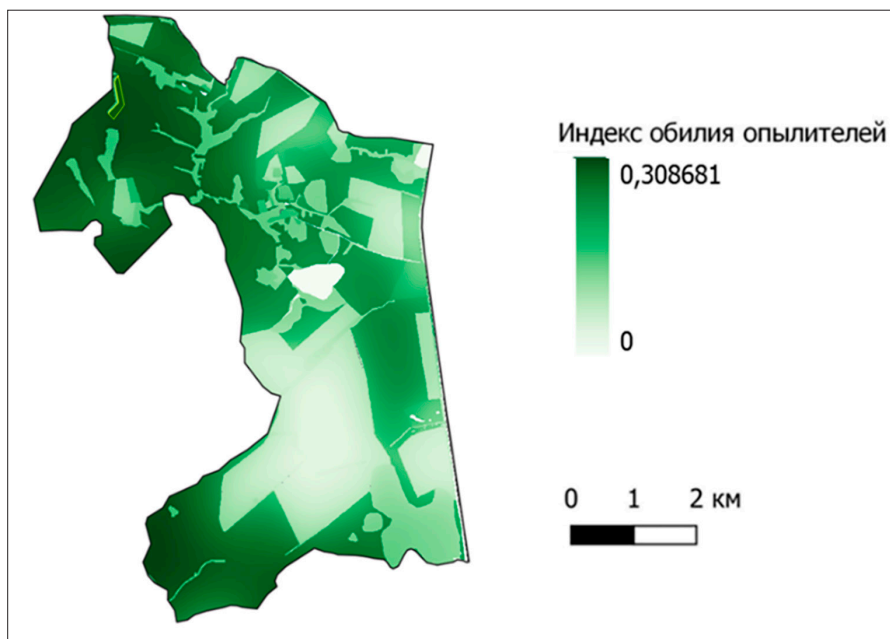


Рис. 2. Карта распределения ИОО на модельной территории

По карте визуально различима разница между пахотными землями и естественными экосистемами соизмеримых с ними площадей. Средние пиксельные значения ИОО по каждому классу земельного покрова отражают ценность каждого из них в качестве местообитания пчел-опылителей. Особый интерес в контексте данного исследования представляет ИОО на обрабатываемых пахотных землях: в границах модельной территории его значения находятся в диапазоне 0,002–0,266, снижаясь от краев полей к центру. Исходя из этих показателей, пахотные угодья значительно уступают по обилию опылителей залежным и другим естественным экосистемам, а их обеспеченность опылением в первую очередь зависит от сопредельных естественных экосистем.

Оценка обеспеченности сельхозугодий опылением требуется не только для сопоставления ИОО разных видов угодий и выявления источников опылителей в агроландшафте, но и для сравнения различных сценариев развития территории. В региональной программе по развитию сельского хозяйства Тульской области большое внимание уделяется работе по вовлечению в оборот неиспользуемых сельхозземель [15]. Как показано выше, залежные земли имеют значительную ценность для поддержки опылителей в ландшафте, поэтому особый интерес представляет состояние ЭУ опыления в случае введения в оборот

всех заброшенных угодий. На рис. 3, b, приведена карта земельного покрова, соответствующая этому сценарию: доля пахотных земель в пространственной структуре землепользования при реализации данного сценария возрастает с 20,7 до 78,9%. Введение залежей в оборот значительно увеличивает пахотные площади исследуемого агроландшафта, однако ликвидация источников кормовых и гнездовых ресурсов на залежах приводит к снижению обеспеченности сельхозугодий опылением.

Отмечено, что одним из эффективных инструментов охраны диких опылителей является сохранение небольшой доли залежных земель в качестве энтомологических микрозаказников [5]. На рис. 3, c, представлен возможный сценарий пространственного расположения микрозаказников на модельной территории. Целесообразно сохранить такие участки залежей, которые в случае распашки (сценарий – рис. 3, b) демонстрировали бы значения ИОО близкие к 0. Оценка сценария 3c в программе InVEST показывает, что при незначительном сокращении площади используемой пашни создание микрозаказников приводит к росту основных показателей распределения ИОО, в том числе минимального значения индекса, которое приближается к соответствующему показателю при текущем сценарии землепользования с высокой долей заброшенных угодий (табл. 3).

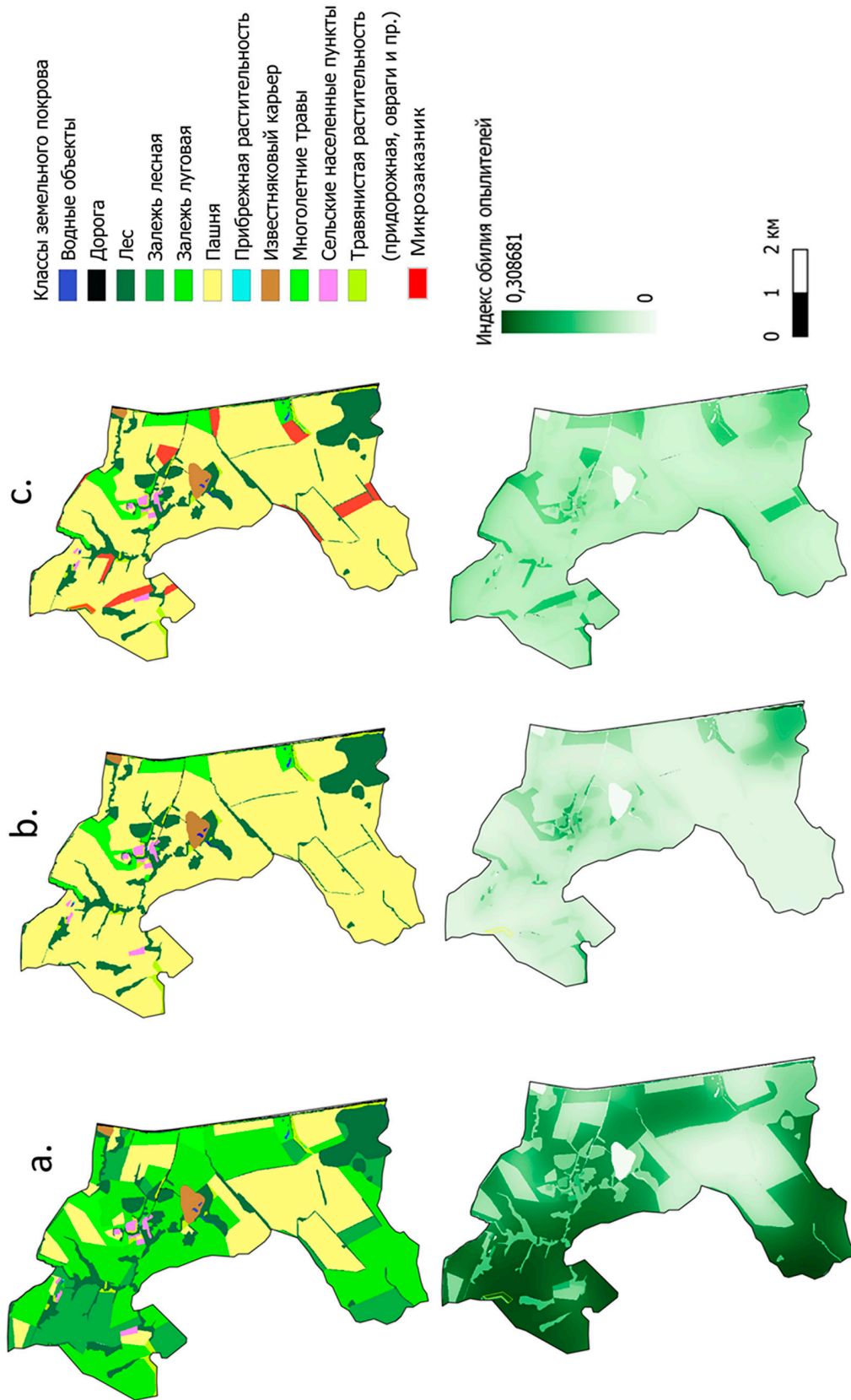


Рис. 3. Карта земельного покрова (сверху) и распределения ИОО (снизу): а) текущая структура землепользования (на 2021 г.); б) введение в оборот всех залежей; в) создание микрозаказников

Статистические показатели ИОО
при различных сценариях использования залежных земель

| Сценарий землепользования | Текущая ситуация | 100 % введение залежей в оборот | Создание микро-заказников |
|------------------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Доля пашни (%) | 20,7 | 78,8 | 74,7 |
| ИОО – max | 0,266 | 0,115 | 0,184 |
| ИОО – mean | 0,073 | 0,026 | 0,050 |
| ИОО – min | 0,024 | 0 | 0,019 |
| ИОО – st.dev | 0,027 | 0,008 | 0,016 |

Заключение

Приведенная в настоящей работе оценка ЭУ опыления в среде InVEST позволяет выявлять ценность разных типов угодий с точки зрения поддержания устойчивых популяций диких пчел-опылителей и сравнивать различные сценарии сельскохозяйственного землепользования, в частности использования уже сформированных экосистем залежей, для улучшения состояния ЭУ опыления культурных растений. Результаты оценки демонстрируют высокую ценность залежных земель на луговой и лесной стадиях сукцессии и перспективность превращения небольшой доли залежей в энтомологические микрозаказники при вводе в оборот необрабатываемых земель.

Данный подход к оценке ЭУ опыления может быть использован при внутрихозяйственном землеустройстве, направленном на организацию рационального использования земель сельхозназначения и, в частности, на повышение обеспеченности возделываемых энтомофильных культур перекрестным опылением.

Список литературы

1. Baylis K., Lichtenberg E.M., Lichtenberg E. Economics of Pollination // *Annual Review of Resource Economics*. 2021. Vol. 13. P. 335–354. DOI: 10.1146/annurev-resource-101420-110406.
2. Bartholomé O., Lavorel S. Disentangling the diversity of definitions for the pollination ecosystem service and associated estimation methods // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 107. 48 p. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105576.
3. Наумкин В.П., Мазалов В.И. Насекомые – опылители агроценозов энтомофильных культур // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2016. № 3 (19). С. 114–118.
4. Willmer P.G., Cunnold H., Ballantyne G. Insights from measuring pollen deposition: quantifying the pre-eminence of bees as flower visitors and effective pollinators // *Arthropod-*

Plant Interactions. 2017. Vol. 11. P. 411–425. DOI: 10.1007/s11829-017-9528-2.

5. Ченикалова Е.В. Охрана и повышение эффективности природных опылителей в хозяйствах Ставропольского края // *Известия ОГАУ*. 2019. № 5 (79). С. 105–108.

6. Garibaldi L.A., Steffan-Dewenter I., Winfree R. [et al.]. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honeybee abundance // *Science*. 2013. Vol. 339 (6127). P. 1608–1611. DOI: 10.1126/science.1230200.

7. Gallai N., Salles J.-M., Settele J., Vaissière B.E. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline // *Ecological Economics*. 2009. № 68 (3). P. 810–821. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.06.014.

8. Радченко В.Г., Песенко Ю.А. Биология пчел (Hymenoptera, Apoidea). СПб.: Наука, 1994. 351 с.

9. Holt A.R., Alix A., Thompson A., Maltby L. Food production, ecosystem services and biodiversity: We can't have it all everywhere // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 573. P. 1422–1429. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.139.

10. Nicholson C., Koh I., Richardson L., Beauchemin A., Ricketts T. Farm and landscape factors interact to affect the supply of pollination services // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017. Vol. 250. P. 113–122. DOI: 10.1016/j.agee.2017.08.030.

11. Lonsdorf E., Kremen C., Ricketts T., Winfree R., Williams N., Greenleaf S. Modelling pollination services across agricultural landscapes // *Annals of botany*. 2009. Vol. 103 (9). P. 1589–1600. DOI: 10.1093/aob/mcp069.

12. Kremen C., Williams N.M., Aizen M.A. [et al.]. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change // *Ecology Letters*. 2007. Vol. 10 (4). P. 299–314. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2007.01018.x.

13. Sharp R., Douglass J., Wolny S. [et al.]. InVEST 3.9.2. User's Guide. The Natural Capital Project, Standford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund: Standford, CA, USA, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.32693.78567.

14. Левченко Т.В., Ким А.Ю., Лакомов А.Ф. Пчелы (Hymenoptera: ariformes) памятника природы «Урочище излучина» Тульской области // *Вестник Тульского государственного университета*. 2021. С. 319–326.

15. Региональный доклад о состоянии и использовании земель Тульской области в 2020 году. Тула: Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Тульской области, 2021. 126 с.