

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-339-342

АНАЛИЗ ЗЕМЕЛЬНОГО ПОКРОВА ТЕРРИТОРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОСИСТЕМНОЙ ФУНКЦИИ ОПЫЛЕНИЯ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**LAND-COVER ANALYSIS FOR POLLINATION ECOSYSTEM SERVICE ASSESSMENT: METHODOLOGICAL ASPECTS****Анпилогова Д.Д.**

Anpilogova D.D.

e-mail: d.anpilogova@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются методические аспекты создания карты земельного покрова для оценки экосистемной функции опыления энтомофильных сельскохозяйственных культур на агроландшафтном уровне. Картографирование земельного покрова основано на классификации спутниковых снимков высокого разрешения с обучением в соответствии с заранее определенным списком типов земельного покрова, различающихся с точки зрения доступности мест для гнездования диких пчел и наличия кормовых растений в пределах радиуса фуражировочных полетов рабочих особей. Показано, что применение объектно-ориентированного подхода к классификации изображений позволяет добиться необходимой точности в выделении в отдельные классы таких трудноразличимых типов земельного покрова, как поля с активно вегетирующей растительностью и залежные земли на луговой стадии постагрогенной сукцессии.

Abstract. The article considers the methodological aspects of creating a LULC map for the assessment of pollination ecosystem service in agricultural landscapes. LULC mapping is based on the classification of high-resolution satellite images according to a predetermined list of LULC classes different in terms of the availability of the nest sites and the floral resources for the wild bees. It is demonstrated that the application of the object-oriented classification techniques can be efficient in context of identifying of such spectrally similar LULC classes as vegetating crops and abandoned agricultural lands covered by herbaceous vegetation.

Ключевые слова: агроландшафт, дистанционное зондирование, карта земельного покрова, опыление, экосистемные функции.

Keywords: agricultural landscape, remote sensing, land cover map, pollination, ecosystem services.

Антропогенная нагрузка на природные комплексы приводит к снижению их устойчивости, разрушению межкомпонентных связей и изменению хода экологических процессов, прямо или опосредованно влияющих на благосостояние общества. Потенциальные и уже зафиксированные экономические потери, обусловленные деградацией природных экосистем, стали предпосылкой для активного развития концепции экосистемных услуг (ЭУ), наблюдаемого в последние десятилетия в зарубежной и отечественной науке. ЭУ можно определить как материальные ресурсы и нематериальные блага, которые общество получает от функционирования природных экосистем [2]. Традиционно они подразделяются на три категории – обеспечивающие, регулирующие и культурные [6].

Изучение всего многообразия отношений человека с окружающей средой через призму концепции ЭУ особенно актуально для староосвоенных территорий, природные ландшафты которых значительно трансформированы сельскохозяйственной деятельностью. Превращение природных территорий в агроландшафты оказывает огромное влияние на все категории ЭУ, поскольку при создании пахотных и кормовых угодий задействуются обширные площади, а на естественные границы природных комплексов накладывается сеть искусственных [1]. Агроландшафты создаются в первую очередь для получения обеспечивающих услуг, однако эффективное функционирование агроландшафтных систем невозможно без устойчивых механизмов формирования и поддержания благоприятных условий среды – регулирующих услуг. В категории регулирующих ЭУ выделяется группа услуг по регулированию численности живых организмов, имеющих важное экономическое значение [6]. К этой группе относится услуга опыления сельскохозяйственных культур насекомыми из природных экосистем.

Экологический процесс перекрестного опыления цветковых растений насекомыми имеет огромное значение как для воспроизводства популяций растений в природных экосистемах, так и для сельского хозяйства: от него зависит урожай и качество получаемых плодов и семян многих масличных, зернобобовых, кормовых, овощных, плодовых и других культур [2]. Это определяет необходимость оценки обеспеченности опылением сельскохозяйственных угодий, занятых энтомофильными культурами. Кроме того, в связи с наблюдаемыми тенденциями забрасывания пахотных земель и последующего возвращения их в оборот особую актуальность приобретает оценка зависимости численности диких опылителей от трансформации пространственной структуры агроландшафта [9].

Экосистемные услуги различаются по своим пространственным характеристикам – они могут быть глобальными, локальными, точечными или зависеть от направления естественных потоков [5]. Однако независимо от пространственного масштаба услуги в основе ее оценки лежит информация о пространственной структуре исследуемой территории – составляющие территорию типы земельного покрова и соотношения между ними [4]. Эта информация должна быть отражена в карте земельного покрова, которая для каждой исследуемой ЭУ, в том числе и для ЭУ обеспеченности сельхозугодий опылением, будет иметь свою специфику. К настоящему моменту разработано несколько концептуаль-

ных моделей оценки обеспеченности энтомофильных культур опылением, и все они в той или иной степени опираются на информацию о пространственной структуре исследуемой территории и характеристики составляющих ее экосистем. Одной из наиболее известных и активно разрабатываемых моделей, описывающих процессы формирования и пространственного распределения ЭУ опыления в агроландшафтах, является модель Лонсдорфа [7]. Предложенная в ней методика лежит в основе нескольких популярных инструментов оценки состояния ЭУ, в том числе программы InVEST Crop Pollination [8].

В соответствии с моделью Лонсдорфа программа InVEST Crop Pollination позволяет оценить обилие наиболее эффективной группы насекомых опылителей, обитающих в природных биотопах, – диких пчел (надсемейство *Apoidea*). Расчет и картографирование индекса обилия опылителей и обеспеченности опылением полей, засеянных энтомофильными культурами, производится по параметрам, характеризующим два ключевых фактора, определяющих устойчивость популяций диких пчел в ландшафте, – доступность мест, пригодных для гнездования, и наличие кормовой базы в пределах радиуса фуражировочных полетов рабочих особей. Исходными данными для оценки и картографирования обилия опылителей в среде InVEST являются таблица гильдий (Guild Table), отражающая основные особенности обитающих на территории исследования экологических групп пчел, и биофизическая таблица (Biophysical Table), в которой содержатся значимые с точки зрения кормовых и гнездовых ресурсов характеристики типов земельного покрова, составляющих агроландшафт. Третьим обязательным исходным материалом для оценки ЭУ опыления в программе InVEST Crop Pollination является растровая карта земельного покрова. На основании полученных данных о наличии мест для гнездования и кормовых ресурсов в пределах дальности полета пчел программа вычисляет для каждого пикселя и визуализирует на карте индекс обилия опылителей, который позволяет оценить обеспеченность опылением полей, на которых выращиваются энтомофильные культуры [8].

Карта земельного покрова для оценки ЭУ опыления имеет свои особенности. Во-первых, выделенные типы покрова должны различаться с точки зрения доступности субстрата гнездования различных групп диких пчел и/или наличия кормовых растений, цветущих в периоды активности насекомых. Поэтому фитоценозы, отличающиеся друг от друга по характеру растительного покрова и сезонной динамике цветения, необходимо выделять в разные типы земельного покрова. Во-вторых, карта должна быть крупномасштабной, чтобы отражать небольшие по площади местообитания, пригодные для гнездования и фуражировки: небольшие лесные участки, полосы с цветущей рудеральной растительностью вдоль полей и дорог и др. Радиус фуражировочных полетов диких пчел ограничен и не превышает 500 м., поэтому без учета небольших природных экосистем модель может дать недостоверный результат [7].

Готовые картографические материалы, отвечающие приведенным выше требованиям, как правило недоступны, поэтому создание карты земельного покрова становится одним из необходимых компонентов оценки ЭУ опыления в среде InVEST. Первым этапом подготовки карты является формирование перечня типов земельного покрова на основе визуальной интерпретации космических снимков высокого или сверхвысокого разрешения, рекогносцировочных исследований выбранного агроландшафта и геоботанических исследований представленных на территории фитоценозов. Выделенные типы земельного покрова фиксируются в биофизической таблице.

В данной работе в качестве модельной территории для создания карты земельного покрова был взят агроландшафт, расположенный в Веневском районе Тульской области. Ниже приведен фрагмент биофизической таблицы, описывающей три представленных здесь типа земельного покрова территории: лиственный лес (лесные массивы или лесополосы, древесной образован мелколиственными породами), луг (травянистые фитоценозы, в том числе образовавшиеся на необрабатываемых пахотных угодьях) и пашня. Индексам доступности субстратов для гнездования и цветущих растений присвоены значения в диапазоне от 0 до 1. После финализации списка типов земельного покрова производится картографирование изучаемой территории на основе дистанционного зондирования космических снимков, сделанных в течение теплого сезона. Точность проведенной классификации зависит от пространственного разрешения исходных изображений, количества и репрезентативности эталонных участков и применяемых методов классификации.

Таблица. Биофизическая таблица (фрагмент)

№	Тип покрова	Субстрат гнездования			Цветущие растения	
		Почва	Древесина	Готовые полости	Весна	Лето
1	Лес	0,7	1	0,7	0,7	0,3
2	Луг	1	0	1	1	1
3	Пашня	0,1	0	0	0	0,5

Для выбора оптимального для создания карты земельного покрова подхода к анализу и классификации спутниковых данных был проанализирован фрагмент четырехканального снимка сверхвысокого разрешения WorldView-2 от 21.08.2021. Сначала изображение было подвергнуто попиксельной

классификации с обучением, состоящей в анализе спектральных характеристик каждого пикселя и отнесения его к одному из заранее определенных типов земельного покрова (классов).

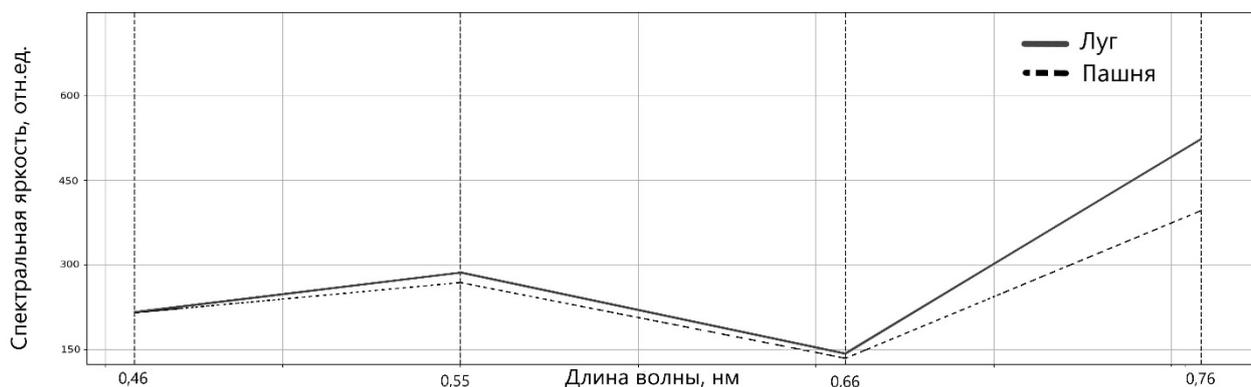


Рис. 1. Кривые средней спектральной яркости природных луговых сообществ и полей с вегетирующими культурами (построены с помощью SCP ver. 7).

Анализ данных дистанционного зондирования проводился с помощью модуля Semi-Automatic Classification Plugin ver. 7 (SCP) для QGIS. Для всех представленных на модельной территории классов были сформированы обучающие выборки. Очевидным недостатком использования методики попиксельного анализа для снимка сверхвысокого разрешения стало большое количество мелких объектов внутри однородных типов земельного покрова, из чего следует, что при постобработке результатов классификации потребуются дополнительная фильтрация шумов. Кроме того, в ходе верификации результатов дешифрирования выяснилось, что данный метод не позволяет разграничить два класса объектов, сильно отличающихся с точки зрения важных для оценки опыления параметров. Речь идет о лугах (в т. ч. залежах на луговой стадии постагрогенной сукцессии) и полях с активно вегетирующими сельхозкультурами. Причиной послужило сходство спектральных характеристик пикселей, принадлежащих к этим классам (рис. 1). Кроме того, луговые сообщества отличаются значительным внутриклассовым разбросом показателей спектральной яркости, что снижает точность попиксельного алгоритма классификации.

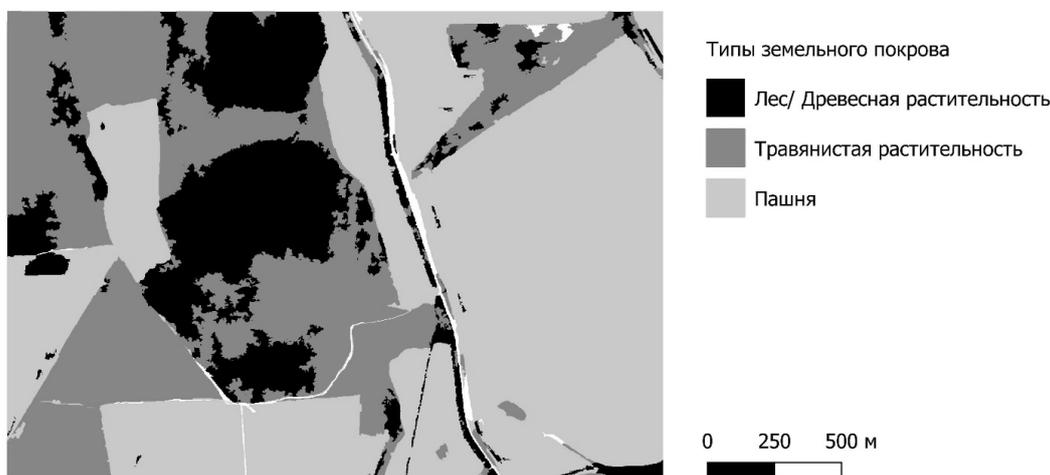


Рис. 2. Фрагмент карты земельного покрова территории (Тульская обл., Веневский р-н)

Более эффективным подходом к классификации космических снимков высокого разрешения является методика объектно-ориентированной классификации. В рамках данного метода пиксели, составляющие снимок, рассматриваются не независимо друг от друга, а в качестве составных частей объектов. Процедура объектно-ориентированной классификации изображений состоит из двух этапов: сегментации изображения и классификации сегментов на основе их спектральных, пространственных и текстурных характеристик [3]. Анализ данных дистанционного зондирования данным методом проводился с помощью модуля Orfeo Toolbox 8.1.1 в QGIS. При планировании классификации так же, как и при использовании попиксельного алгоритма, было установлено общее число классов и расположение эталонных для каждого класса участков (векторный слой). Для проведения сегментации был выбран алгоритм MeanShift. Полученный результат классификации (рис. 2) позволяет сделать вывод о том, что применение объектно-ориентированного подхода лучше соответствует поставленным в ра-

боте задачам: необрабатываемые поля, заросшие рудеральной и луговой растительностью, отнесены к классу «Луг», а используемые сельхозугодья (недавно распаханнные и покрытые вегетирующей растительностью) объединены в класс «Пашня».

Таким образом, наиболее эффективным методом создания карты земельного покрова для оценки экосистемной услуги опыления культурных растений в агроландшафте является контролируемая классификация космических снимков высокого/сверхвысокого разрешения. Метод объектно-ориентированной классификации позволяет более точно выделить различные с точки зрения важных для опыления параметров типы земельного покрова. Дальнейшее выделение среди пахотных угодий полей, занятых энтомофильными культурами, проводится в процессе постклассификационной обработки с привлечением дополнительных материалов.

Благодарности. *Используемые в работе материалы космической съемки получены при поддержке Центра коллективного пользования «Геопортал», МГУ имени М. В. Ломоносова.*

Литература

1. Николаев, В. А. Природно-антропогенные ландшафты (сельскохозяйственные и лесохозяйственные): Учебное пособие / В. А. Николаев, И. В. Копыл, В. В. Сысуев. – Москва: Географический факультет МГУ, 2008. – 160 с.
2. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Том 1. Услуги наземных экосистем / Ред.-сост.: Е. Н. Букварёва, Д. Г. Замолотчиков. – Москва: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. – 148 с.
3. Blaschke, T. Object based image analysis for remote sensing // ISPRS Int. J. of Photogrammetry and Remote Sensing. 2010, 65 (1). – pp. 2–16.
4. Burkhard, B., Kroll, F., Müller, F., Windhorst, W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services – a concept for land-cover based assessments // Landscape Online. – № 15. – 2009. – pp. 1–22.
5. Costanza, R. Ecosystem Services: Multiple Classification Systems Are Needed // Biological Conservation. – 2008. – pp. 350–352.
6. Haines-Young, R., Potschin, M. B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. – 2017. – 53 p. URL: <https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2018/01/Guidance-V51-01012018.pdf> (дата обращения: 31.03.2023)
7. Lonsdorf, E., Kremen, C., Ricketts, T., Winfree, R., Williams, N., Greenleaf, S. Modelling pollination services across agricultural landscapes // Annals of Botany, 1:12. 2009.
8. Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J. InVEST 3.9.2. User's Guide. – The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. – 2020.
9. Zulian, G., Maes, J., Paracchini, M. L. Linking land cover data and crop yields for mapping and assessment of pollination services in Europe // Land 2013, 2. – pp. 472–492.