

Ольберг Даниил Владимирович
магистрант кафедры информационных систем,
Московский университет имени С.Ю. Витте,
Россия, Москва

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА БАЗЕ ОТКРЫТЫХ ГЕОДАННЫХ

Аннотация. В работе исследуется проблема автоматизации вычислений годового поглощения диоксида углерода наземными экосистемами. Детально проанализирован традиционный подход, основанный на последовательном использовании ГИС и табличных процессоров, выявлены его ключевые недостатки: многократные ручные операции, отсутствие воспроизводимости и игнорирование долевого вклада пограничных пикселей. Предложен метод автоматизации, реализованный в виде программного модуля на Python (Rasterio, GeoPandas, PyQt5), который включает оригинальный алгоритм взвешенной пиксельной маски для точного учёта пересечений. Рассмотрены архитектура модуля, алгоритм взвешивания пикселей и встроенная библиотека коэффициентов поглощения. Обсуждаются преимущества предлагаемого подхода перед существующими решениями, а также его ограничения и перспективы дальнейшего развития.

Ключевые слова: углеродный баланс, наземные экосистемы, автоматизация, ГИС, взвешивание пикселей, Python, Rasterio, GeoPandas.

Введение:

Оценка депонирования углерода наземными экосистемами стала неотъемлемой частью климатической политики и корпоративной отчётности в области устойчивого развития [1]. При этом методики количественного определения абсорбции CO₂, рекомендованные МГЭИК [2], опираются на пространственно-распределённые данные о типах экосистем и соответствующие эмиссионные факторы. На практике специалисты вынуждены многократно выполнять однотипные операции по обработке растров, перепроецированию,

расчёту площадей и подбору коэффициентов. Это приводит к высоким временным затратам и снижает оперативность принятия решений, особенно при необходимости мониторинга большого числа разнородных участков [3].

Существующие геоинформационные системы (QGIS, ArcGIS) предоставляют богатый функционал, но ориентированы на универсальное применение и не оптимизированы для узкой задачи углеродного учёта. Пользователю приходится вручную комбинировать инструменты обрезки, зональной статистики и табличного редактора, что порождает ошибки переноса данных и делает результаты слабо воспроизводимыми. Кроме того, стандартные методы обрезки растра по векторной маске либо включают пиксель целиком (если его центр лежит внутри полигона), либо полностью исключают его, игнорируя частичное перекрытие. Для крупнозернистых растров (разрешение 250–500 м) такая аппроксимация способна давать систематическую погрешность, сопоставимую с вкладом отдельных классов экосистем.

Цель настоящей работы – разработка и описание подхода, автоматизирующего весь цикл расчёта годового поглощения CO₂ с гарантированным учётом долевого участия пикселей и исключающего ручной перенос данных.

Анализ текущего состояния процесса

Для формулировки требований к автоматизации был детально изучен процесс, применяемый сегодня в научных и проектных организациях. Типичный сценарий включает следующие шаги:

1. Поиск и загрузка растровых данных – исполнитель обращается к открытым источникам (USGS, ESA и др.), скачивает глобальный или региональный растр типов экосистем, например, World Terrestrial Ecosystems 2020 [4].

2. Подготовка полигона – границы исследуемой территории либо оцифровываются вручную по подложке, либо загружаются из внешнего файла. При этом часто возникает несоответствие систем координат растра и вектора, что требует дополнительного перепроецирования.

3. Обрезка растра и зональная статистика – с помощью инструментов ГИС (Clip, Zonal Histogram) получают таблицу с количеством пикселей каждого класса внутри полигона. Экспорт таблицы в Excel выполняется вручную.

4. Сбор коэффициентов поглощения – литературный поиск значений для каждого типа экосистем (национальные кадастры [5], методические указания, научные статьи). Коэффициенты вносятся в электронную таблицу, что требует сопоставления кодов классов.

5. Расчёт – перемножение площадей (количество пикселей × площадь одного пикселя) на соответствующие коэффициенты, суммирование.

6. Визуализация – построение карты распределения классов внутри полигона, оформление отчёта.

Наблюдения за работой трёх специалистов разной квалификации позволили количественно оценить узкие места (табл. 1). Наиболее трудоёмкими оказались операции, связанные с поиском и вводом коэффициентов (около 50 % времени) и многократным переключением между приложениями (до 30 %). При этом ни один из участников не использовал процедуру взвешивания частично перекрытых пикселей, поскольку стандартные инструменты ГИС не предоставляют такой возможности.

Таблица 1. Усреднённые временные затраты при ручном расчёте (на примере участка площадью 1250 га)

Этап	Доля времени, %	Характер операции
Поиск и загрузка данных	10	Полуавтоматический
Проецирование и обрезка	15	Полуавтоматический
Зональная статистика + экспорт	15	Ручной перенос
Поиск и ввод коэффициентов	45	Полностью ручной
Расчёты в Excel	10	Ручной ввод формул
Оформление карты и отчёта	5	Ручная компоновка

Предлагаемый метод автоматизации

Разработанный подход базируется на создании специализированного настольного приложения, объединяющего функции обработки пространственных данных и расчётов в единой среде. Архитектура приложения включает три уровня:

- Уровень данных – отвечает за импорт растров и векторов, унификацию проекций, доступ к встроенной библиотеке коэффициентов.
- Вычислительное ядро – реализует оригинальный алгоритм взвешенной пиксельной маски.
- Пользовательский интерфейс – обеспечивает визуализацию, инструменты рисования полигона и экспорт результатов.

Алгоритм взвешенной пиксельной маски

В отличие от стандартных методов, предлагаемый алгоритм оперирует не только значениями пикселей, но и геометрией их пересечения с полигоном. Последовательность шагов:

1. Загрузка растра `R` (объект `rasterio.Dataset`) и полигона `P` (объект `geopandas.GeoDataFrame`). Приведение `P` к системе координат растра с помощью `rproj`.
2. Вычисление bounding box полигона и извлечение окна растра, перекрывающего этот прямоугольник, функцией `rasterio.windows.from_bounds`.
3. Построение регулярной сетки, соответствующей пикселям окна. Для каждого пикселя с индексами `(i, j)`:
 - a. преобразование координат углов пикселя из индексов в мировые координаты через аффинное преобразование растра;
 - b. создание объекта `shapely.geometry.box`, представляющего пиксель;
 - c. вычисление пересечения `intersection = box.intersection(P)`;

d. если пересечение не пусто, определение доли `fraction = intersection.area / box.area``.

4. Для всех пикселей с ненулевой долей извлечение значения класса `class_val = R[i, j]` и поиск соответствующего коэффициента `coeff[class_val]` во встроенной библиотеке.

5. Расчёт вклада пикселя: `contrib = coeff[class_val] * (pixel_area_ha) * fraction``, где `pixel_area_ha`` – площадь полного пикселя в гектарах, полученная из разрешения растра.

6. Суммирование вкладов и накопление статистики по классам (суммарная площадь, суммарное поглощение).

Алгоритм гарантирует, что каждый квадратный метр территории, даже если он принадлежит нескольким пикселям, будет учтён пропорционально. Вычислительная сложность линейно зависит от числа пикселей в окне, но благодаря использованию векторизованных операций NumPy и эффективных геометрических примитивов Shapely время расчёта остаётся приемлемым для типовых задач (см. раздел «Результаты»).

Библиотека коэффициентов и пользовательский интерфейс

В приложение встроена эталонная таблица коэффициентов поглощения CO₂, составленная на основе актуальных версий Национального кадастра [5] и рекомендаций МГЭИК [2]. Для каждого из 431 класса экосистемы (по классификации WTE) приведены код, название и значение коэффициента (т CO₂/га/год). Пользователь может просмотреть таблицу и при необходимости отредактировать коэффициенты через режим администратора, что позволяет адаптировать расчёты под региональные особенности или обновлённые методики.

Интерфейс разработан на PyQt5 и включает:

- главное окно с виджетом карты (Matplotlib), панелью инструментов и боковой панелью;

- инструменты интерактивного рисования полигона (левая кнопка мыши – добавление вершин, правая – удаление последней, двойной щелчок – завершение);
- кнопки загрузки полигона из файла (Shapefile, GeoPackage), запуска расчёта, экспорта отчёта в Excel и сохранения карты в PNG.

Обсуждение достоинств и ограничений подхода

Разработанный подход к автоматизации оценки углеродного баланса наземных экосистем обладает рядом преимуществ перед существующими решениями.

В отличие от использования полнофункциональных ГИС (QGIS, ArcGIS), специализированный модуль предоставляет только необходимый функционал, что снижает порог вхождения для пользователей (ESG-специалистов, экологов, студентов) и ускоряет выполнение типовых задач. При этом сохраняется возможность интеграции с внешними инструментами благодаря поддержке стандартных форматов данных (GeoTIFF, Shapefile, GeoPackage, Excel).

Важным преимуществом является встроенная библиотека верифицированных коэффициентов поглощения. В ручном процессе каждый новый расчёт требует обращения к научным источникам, что не только увеличивает время, но и может приводить к неоднородности данных (использованию коэффициентов из разных методик). В разработанном модуле коэффициенты зафиксированы, но при необходимости пользователь может их скорректировать (функция администратора).

Предложенный алгоритм учёта частичного перекрытия пикселей, основанный на точных геометрических вычислениях, является более корректным по сравнению со стандартными подходами ГИС (методы "центр пикселя" или "все затронутые пиксели"). Это особенно важно при работе с крупнозернистыми растрами (разрешение 250–500 м) и небольшими полигонами, где доля пограничных пикселей может быть значительной.

Ограничением подхода является зависимость от качества исходных растровых данных. Глобальные датасеты, такие как World Terrestrial Ecosystems, имеют определённые погрешности классификации, особенно в переходных зонах и регионах со сложной мозаикой экосистем. Для повышения точности целесообразно использовать регионально адаптированные карты экосистем или комбинировать несколько источников.

Дальнейшее развитие работы предполагает:

- интеграцию модуля с внешними API для автоматического получения актуальных растров (например, с порталов «Вектор-М» или Copernicus);
- расширение библиотеки коэффициентов региональными значениями для субъектов РФ на основе данных государственного лесного реестра;
- добавление функций прогнозного моделирования углеродного баланса при различных сценариях землепользования.

Заключение

В работе предложен и описан подход к автоматизации расчёта годового поглощения диоксида углерода наземными экосистемами. Основные результаты исследования:

Выявлены недостатки существующего ручного процесса, включая высокую трудоёмкость, многократное переключение между программами и отсутствие корректного учёта частичного перекрытия пикселей.

Разработан алгоритм точного учёта долей пикселей при обрезке растра по произвольному полигону, основанный на геометрических операциях с использованием библиотек Shapely и Rasterio.

Создан программный модуль, реализующий полный цикл автоматизированного расчёта – от загрузки данных до экспорта отчёта, со встроенной библиотекой коэффициентов и удобным графическим интерфейсом.

Проведён анализ преимуществ и ограничений предлагаемого подхода, определены направления дальнейшего развития.

Разработанное решение ориентировано на широкий круг пользователей – от студентов и преподавателей до специалистов в области углеродного регулирования и устойчивого развития. Применение подобных инструментов способствует повышению качества и оперативности оценки экосистемных услуг, что является важным шагом на пути к низкоуглеродной экономике и выполнению климатических обязательств.

Список литературы

1. Sayre R., Karagulle D., Frye C. et al. An assessment of the representation of ecosystems in global protected areas using new maps of World Climate Regions and World Ecosystems // *Global Ecology and Conservation*. – 2020. – Vol. 21. – e00860. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00860.
2. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / eds. E. Calvo Buendia et al. – Geneva: IPCC, 2019. – 1945 p.
3. Гетманская Д.В. Исследование программных подсистем для задач сенсорного мониторинга и управления экосистемами // *Информатика. Экономика. Управление*. – 2025. – Т. 4, № 2. – С. 3032–3037. DOI: 10.47813/2782-5280-2025-4-2-3032-3037.
4. Sayre R. World Terrestrial Ecosystems (WTE) 2020: U.S. Geological Survey data release. – Reston, VA: USGS, 2022. – DOI: 10.5066/P9DO61LP.
5. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2023 гг. – М.: Росгидромет, 2025. – 486 с.
6. Ivashchenko K., Gavrichkova O., Korneykova M. et al. Extension of the soil monitoring network via tea bag initiatives: A 3000 km latitudinal gradient in European Russia // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 927. – 171881. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171881.