

Методы автоматизированной оценки антибиотикочувствительности микроорганизмов по изображениям чашек Петри

А. А. Артамонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

fhnneh@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются методы автоматизированной оценки антибиотикочувствительности микроорганизмов на основе анализа изображений чашек Петри, полученных при тестировании методом дискодиффузии. Предлагается программный конвейер обработки изображений, включающий выделение ключевых объектов и определение зон роста и ингибирования. Использование методов компьютерного зрения позволяет снизить субъективность экспертной оценки и повысить воспроизводимость лабораторных измерений.

Ключевые слова: антибиотикочувствительность; чашка Петри; метод дискодиффузии; компьютерное зрение; обработка изображений; автоматизация анализа; зоны ингибирования; микробиологическая диагностика

I. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

A. Актуальность и постановка задачи

Определение чувствительности микроорганизмов к антибиотикам остаётся одной из центральных задач клинической микробиологии. В практической работе широко используется метод дискодиффузии, при котором на поверхность чашки Петри с бактериальной культурой помещаются бумажные диски, содержащие различные антибиотики. После инкубации вокруг части дисков формируются зоны ингибирования — области, в которых рост микроорганизмов подавляется.

Размер этих зон служит основным диагностическим показателем при оценке чувствительности бактерий к конкретным препаратам. В традиционной практике их измерение и интерпретация выполняются специалистом вручную. Несмотря на простоту и распространённость метода, такой подход в определённой степени зависит от человеческого фактора.

Ручная обработка результатов может сопровождаться субъективностью при определении границ зон, различиями в интерпретации между специалистами, а также увеличением времени анализа при большом количестве образцов. В связи с этим автоматизация обработки изображений чашек Петри представляется обоснованной. Использование методов компьютерного зрения позволяет формализовать процедуру анализа и перейти от визуальной оценки к воспроизводимым количественным характеристикам.

B. Исходные данные

Для получения исходных данных была разработана специализированная установка, обеспечивающая фотосъёмку чашек Петри в контролируемых условиях. Ключевым элементом системы является камера машинного зрения Daheng, позволяющая получать детализированные и стабильные изображения. Благодаря этому на снимках отчётливо различимы как границы зон ингибирования, так и маркировка на бумажных дисках.

Конструкция установки предусматривает фиксированное положение камеры относительно объекта съёмки. Это обеспечивает постоянство масштаба и исключает случайные изменения ракурса. Дополнительно применяется стабильная система освещения, снижающая влияние теней и бликов на поверхности агара.

Внутренняя компоновка включает камеру, источники света и рабочую область для размещения чашки Петри. Такое расположение элементов способствует равномерному освещению и уменьшает количество визуальных артефактов на изображениях.



Рис. 1. Внешний вид установки

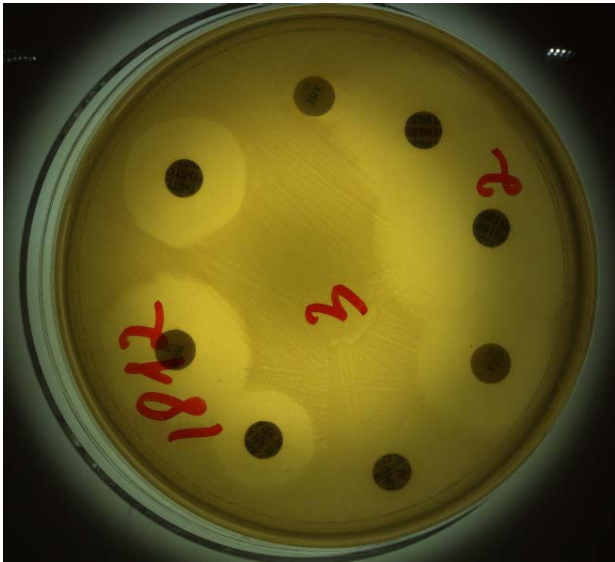


Рис. 2. Полученное изображение с установки

С. Цель работы

Целью работы является разработка программного решения для автоматизированной оценки антибиотикочувствительности по изображениям чашек Петри, получаемых с использованием описанной установки. Основное внимание уделяется созданию программного обеспечения, способного извлекать из изображений количественно значимые признаки.

Разрабатываемая система должна выполнять автоматический анализ изображений и выделять ключевые объекты, необходимые для интерпретации результатов дискодиффузионного теста. К таким объектам относятся бумажные диски с антибиотиками, зоны ингибирования роста и их пространственное взаимное расположение.

В рамках работы предполагается использование методов компьютерного зрения и глубокого обучения для решения задач детекции дисков, распознавания их типа и сегментации областей подавления роста. На основе полученных результатов система должна вычислять количественные параметры, в частности геометрические характеристики зон ингибирования, и формировать структурированные данные для последующего анализа.

Ожидается, что разработанное программное средство позволит автоматически обрабатывать изображения, полученные с экспериментальной установки, и получать объективные показатели антибиотикочувствительности. Такой подход может снизить влияние человеческого фактора, ускорить анализ и повысить воспроизводимость результатов.

II. ДЕТЕКЦИЯ ДИСКОВ

А. Подготовка данных

Первым этапом автоматизированного анализа является обнаружение бумажных дисков на поверхности чашки Петри, поскольку именно их координаты позволяют связать зоны ингибирования с конкретными антибиотиками.

Для обучения модели был сформирован датасет из 300 изображений, полученных с экспериментальной

установки. Все изображения приведены к разрешению 640×640 пикселей и разделены на обучающую и валидационную выборки в соотношении 80% и 20%.

Разметка выполнялась с использованием ограничивающих прямоугольников (bounding boxes) для каждого диска. Все объекты относились к одному классу — disk, что является стандартным подходом для задач локализации.

В. Архитектура и обучение модели

В качестве основной модели использована архитектура YOLOv11n, обеспечивающая разумный баланс между точностью, скоростью и числом параметров. Это особенно важно, поскольку пропуск даже одного диска может повлиять на корректность последующего анализа.

Обучение проводилось с использованием предобученных весов и стандартных аугментаций, включая повороты, отражения и изменение цветовых характеристик. Это повышает устойчивость модели к вариациям условий съёмки. В качестве метрик использовались mAP@0.5, Recall и Precision, дополнительно рассчитывался F1-score.

На тестовой выборке модель продемонстрировала высокие значения точности и полноты обнаружения: **Precision — 0.994, Recall — 0.994, mAP@0.5 — 0.994, mAP@0.5:0.95 — 0.786**. Высокая полнота особенно важна, поскольку снижает вероятность пропуска объектов. Ошибки в основном связаны с дисками, расположенными у краёв чашки, а также с частично размытыми изображениями.

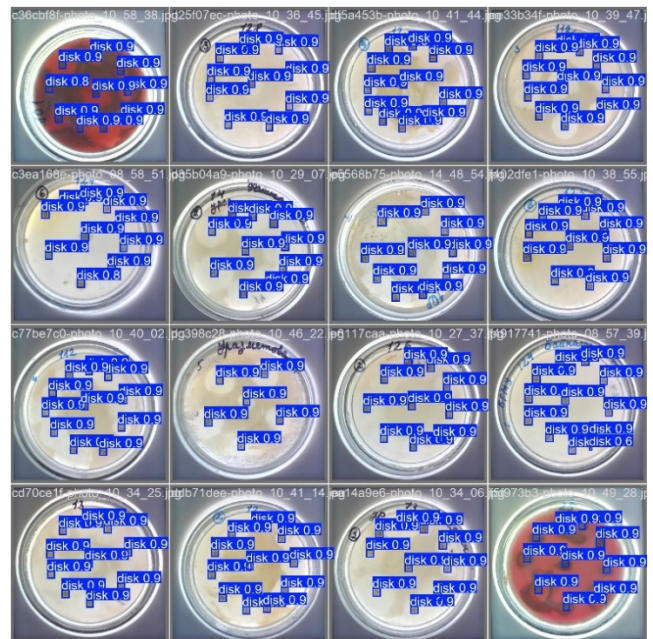


Рис. 3. Результаты детекции на валидационных изображениях

III. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСКОВ

А. Подготовка данных

После локализации дисков следующим этапом является определение типа антибиотика. Для каждого из 25 классов из исходных изображений автоматически извлекались фрагменты, содержащие диски (в среднем около 50 изображений на класс). В результате был сформирован датасет объёмом 1250 изображений,

разделённый на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80% и 20%.

Для повышения устойчивости к изменениям условий съёмки применялись аугментации, включая повороты, размытие и вариации яркости, контраста и насыщенности. Это позволяет модели сосредоточиться на локальной маркировке дисков, снижая влияние фона.

В. Архитектура и обучение модели

Для классификации использовалась архитектура ResNet18 с модифицированным полносвязным слоем, рассчитанным на 25 классов. Входные изображения нормализовались и приводились к размеру 224×224 пикселя, после чего подвергались аугментациям.

Модель показала высокую эффективность на тестовой выборке: **Accuracy — 0.998, Precision — 0.994, Recall — 0.995, F1-score — 0.994**. Эти результаты свидетельствуют о стабильном качестве распознавания по всем классам. Ошибки, как правило, возникают при наличии размытых или слабо различимых дисков.

IV. СЕГМЕНТАЦИЯ ЗОН ИНГИБИРОВАНИЯ

А. Подготовка данных

Следующий этап связан с выделением зон ингибирования роста микроорганизмов. В отличие от детекции, здесь требуется определить точные границы областей, поэтому задача формулируется как семантическая сегментация.

Для обучения использовался набор из 100 изображений с бинарными масками, в которых каждому пикселю соответствует один из двух классов: фон или зона ингибирования. Данные были разделены на обучающую и валидационную выборки (80% и 20%), а изображения приведены к разрешению 1024×1024 пикселя. Такой формат позволяет корректно оценивать геометрию зон.

Для повышения устойчивости модели также применялись стандартные аугментации, включая геометрические преобразования и изменения цветовых характеристик.

В. Архитектура и обучение модели

В качестве модели использовалась архитектура SegFormer с конфигурацией MIT-B3, позволяющая учитывать как глобальный контекст изображения, так и локальные особенности границ. Это представляется важным для биологических изображений, где границы зон часто выражены нечетко.

Обучение проводилось с применением стандартных методов оптимизации и контроля переобучения. Основными метриками качества выступали mIoU и Dice coefficient, отражающие степень совпадения предсказанной и эталонной масок.

На валидационной выборке были получены значения **mIoU — 0.658** и **Dice — 0.755**, что можно считать достаточным для последующего количественного анализа зон ингибирования. Таким образом, сегментация позволяет не только визуализировать области подавления роста, но и извлекать измеримые характеристики.

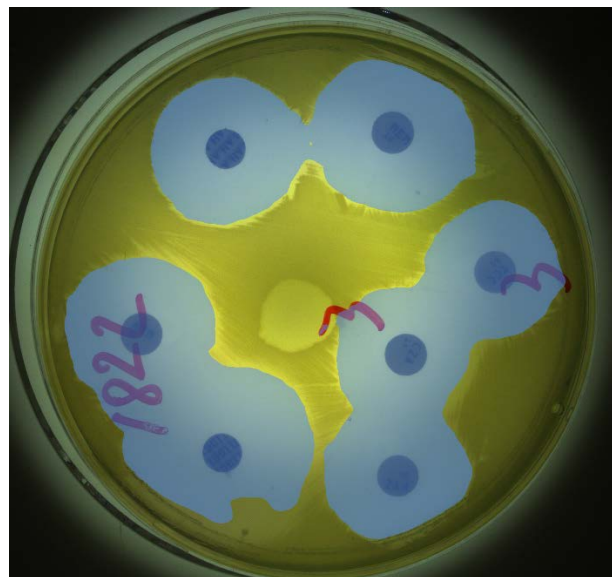


Рис. 4. Результат сегментации на валидационном изображении

V. ПАЙПЛАЙН

А. Подготовка данных

Разработанная система представляет собой последовательный конвейер обработки изображений, объединяющий этапы детекции дисков, классификации антибиотиков и сегментации зон ингибирования. На вход подаётся изображение чашки Петри, а результатом работы является структурированный набор данных, включающий координаты дисков, тип антибиотика и параметры соответствующих зон.

Обработка начинается с обнаружения дисков. Для каждого найденного объекта выделяется локальный фрагмент изображения, который затем передаётся в классификатор. Одновременно на исходном изображении выполняется сегментация зон ингибирования.

На этапе постобработки результаты объединяются: каждой зоне сопоставляется соответствующий диск на основе их пространственного расположения, после чего вычисляются геометрические характеристики, такие как площадь и эквивалентный диаметр.

Для взаимодействия с системой реализован веб-интерфейс, обеспечивающий визуализацию результатов. Пользователь может просматривать обнаруженные диски, распознанные типы антибиотиков и выделенные зоны. При необходимости предусмотрена ручная корректировка параметров, например радиуса зоны или класса антибиотика. В результате автоматизируются операции, традиционно выполняемые вручную, включая измерение и фиксацию результатов, что способствует повышению скорости и стандартизации анализа.

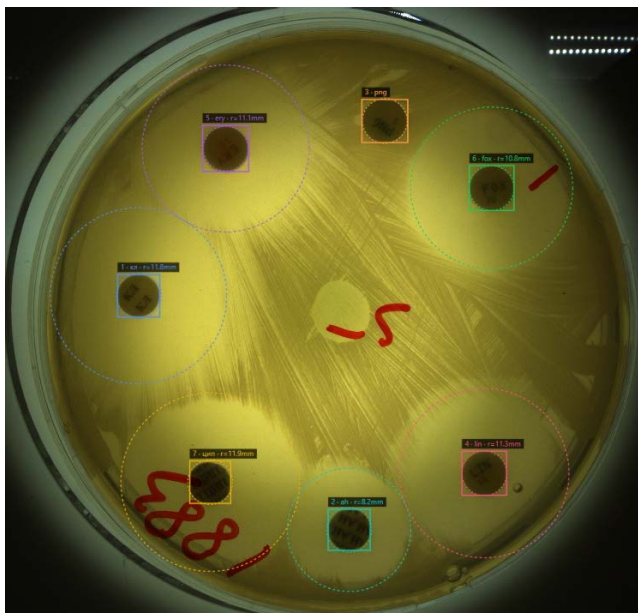


Рис. 5. Результат сегментации на валидационном изображении

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к анализу изображений чашек Петри объединяет детекцию дисков, классификацию антибиотиков и сегментацию зон ингибирования в единую систему. Такая интеграция позволяет автоматизировать процесс оценки антибиотикочувствительности, ранее выполнявшийся вручную, и обеспечить более стабильные и воспроизводимые результаты.

Сформированные системой структурированные данные могут использоваться для количественного анализа, подготовки отчётов и интеграции в лабораторные информационные системы. Наличие веб-интерфейса позволяет при необходимости контролировать и корректировать результаты, что повышает надёжность работы системы.

В дальнейшем развитие работы может быть связано с повышением точности моделей, расширением функциональности и внедрением дополнительных методов анализа. Это, по-видимому, позволит приблизиться к созданию полнофункциональной автоматизированной системы для обработки результатов дискодиффузионных тестов в лабораторной практике.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает признательность директору компании ООО «Предиктор» Галямову Айрату Фаритовичу за предоставленную возможность выполнения данной работы и оказанную помощь при проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горохов О.Е., Казачук М.А., Лазухин И.С., Машечкин И.В., Панкратьева Л.Л., Попов И.С. Интеллектуальные технологии сегментации и классификации микробиологических фотоизображений // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2023. № 4. С. 21–32. DOI: 10.55959/MSU/0137-0782-15-2023-47-4-21-32.
- [2] Машечкин И.В., Попов И.С., Казачук М.А., Трапезников М.Ю. Исследование и разработка методов определения бактериальной резистентности к антибиотикам на основе анализа микробиологических фотоизображений // Ломоносовские чтения-2022: научная конференция, факультет ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова: тезисы докладов. М.: МАКС Пресс, 2022. С. 31–32.
- [3] Hombach M., Jetter M., Blöchliger N., Kolesnik-Goldmann N., Böttger E.C. Fully automated disc diffusion for rapid antibiotic susceptibility test results: a proof-of-principle study // Journal of Antimicrobial Chemotherapy. 2017. Vol. 72, no. 6. P. 1659–1668. DOI: 10.1093/jac/dkx026.
- [4] Zhang J., Li C., Rahaman M. M., Yao Y., Ma P., Zhang J., Zhao X., Jiang T., Grzegorzec M. A Comprehensive Review of Image Analysis Methods for Microorganism Counting: From Classical Image Processing to Deep Learning Approaches [Электронный ресурс]. 2021. — URL: <https://arxiv.org/abs/2103.13625> (дата обращения: 22.03.2026).
- [5] Gullu E., Bora S., Beynek B. Exploiting Image Processing and Artificial Intelligence Techniques for the Determination of Antimicrobial Susceptibility // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 9. Art. 3950. DOI: 10.3390/app14093950.