

緊急時の被ばく線量評価における人工知能を用いた染色体
線量評価法の導入に関する実効性検証等事業
調査報告書

令和5年3月

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

概要

事業名

緊急時の被ばく線量評価における人工知能を用いた染色体線量評価法の導入に関する実効性検証等事業

事業受託者

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

実施期間

令和4年12月7日から令和5年3月31日まで

目的

令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム（基本モデル）の開発」事業における研究成果を原子力災害医療体制に実装するために必要な課題の抽出と検証を行う。

成果・課題

- 日本国内で標準的に採用されている48時間コルセミド処理法による染色体標本画像に対してAI染色体異常判定アルゴリズムを適用したところ、判定補助に有用な程度の性能で染色体異常の検知を可能とすることができた。
⇒ 今後、AIの性能や安定性向上、さらに線量評価システムとして機能強化するためには、多様なサンプルデータによる学習を行うことが必要。
- 各地の高度被ばく医療センターにおいて本法を利用可能とするために必要な体制整備に係る事項として、AI使用の簡便化、データ伝送方法、情報共有や災害時のセキュリティの確保について具体的な方法を検討し課題を抽出することができた。
⇒ 原子力災害対策に実装し実効性を確保するためには、得られた成果と課題解決方法を着実に実施する必要がある。

以上

目次

1. 事業目的	1
2. 事業内容	
2.1 AI 染色体線量評価を原子力災害医療体制へ実装するための 染色体異常検知性能の汎用化・高度精度化の実施及びその評	2
2.2 AI 染色体線量評価をソフトウェアとするための設計方針の検討	13
2.3 染色体画像共有方法の調査・検討	19
2.4 AI 染色体線量評価の多重化の調査・検討	23
2.5 高度被ばく医療支援センターへの導入の検討及び調整	24
3. まとめ	29
4. 参考文献	30
5. 補足資料	31

1. 事業目的

原子力災害医療体制における高度被ばく医療支援センター等の指定要件では、染色体線量評価手法の実施体制の構築が求められている。

量子科学技術研究開発機構（以下、量研）は、令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム（基本モデル）の開発」事業 [1] にて、AI技術のひとつである深層学習法を基盤とした染色体画像自動判定モデルの開発を行った。ここでは量研で作成される染色体画像を用いて深層学習を行い、基本モデル（アルゴリズム）を設置した。これにより、トリージのための染色体線量評価の画像判定が1検体につき約1分未満で可能となることを示した。

本事業では、これまで得られた知見を基に全国の高度被ばく医療支援センター等において、AI染色体線量評価法を使用するために必要な染色体異常検知アルゴリズムの改良を行い、さらに原子力災害医療体制へ組み込むために想定される課題について調査・検証を行う。

2. 事業内容

2.1. AI 染色体線量評価を原子力災害医療体制へ実装するための染色体異常検知性能の汎用化・高度精度化の実施及びその評価

2.1.1. 目的

AI による染色体画像自動判定は、令和 3 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業で示したように高速であり、かつ再現性 100%であるため、染色体判定の標準化・迅速化を実現し、原子力災害等における線量評価を大きく支援することが期待されている。将来的に各高度被ばく医療センターをはじめとする様々な機関で作成される多様な染色体標本由来画像に対応させるためには、基本モデルの汎用化が必須となる。

そこで本委託事業では、量研の基本モデルを足がかりにし、各高度被ばく医療センターで作成される染色体画像への適用性を調査し、現有モデルの対応能力を調査し、汎用化のための方法・方向性を検討することとした。

2.1.2. 材料と方法

AI 染色体線量評価のヒト末梢血リンパ球培養法として、国際標準化機構の手順書 ISO 19238 [2] では 48 時間培養を規定しているが、分裂中期染色体像を得るために行うコルセミド処理の条件（濃度・時間）についての規定はなく、線量評価担当機関によって異なる。本事業では、日本国内で標準的に採用されている 48 時間コルセミド処理法による染色体標本画像を作成し、2.5 時間コルセミド処理法による染色体標本を用いて学習した量研の基本モデルの汎用性を評価した。本法に使用した主な実験設備機器は表 2-1-1 の通りである。

表 2-1-1. 主な設備機器

品目	用途
安全キャビネット型クリーンベンチ	ヒト血液検体の無菌操作
炭酸ガスインキュベーター	リンパ球培養
細胞計数装置	リンパ球培養
ルーチン顕微鏡	リンパ球培養
微量分光光度計	リンパ球培養、FIHS プローブ操作
冷却遠心機	リンパ球分離・固定
オートクレーブ	無菌操作、廃棄物処理
局所排気装置	リンパ球固定、標本作製(メタノール)
冷蔵庫	試薬保管
冷凍庫(-30℃)	試薬保管
冷凍庫(-80℃)	検体保存

1) 試験用染色体画像データ作成

1-1) 標本作製

インフォームドコンセントが得られた健常人成人男性 1 名より末梢血 3 mL を採取し、⁶⁰Co-ガンマ線照射 (2.0 Gy、線量率 0.75Gy/min) を行った後、リンパ球を分離し、コルセミドを含む完全培地で 37°C にて細胞培養を開始した。48 時間後、細胞を回収し、低張液処理、メタノール/酢酸固定を行い、風乾法により標本作製を行った。

1-2) FISH 画像データ作成

動原体周辺配列を含む Cy3 標識ペプチド核酸 (PNA) プローブを用い、蛍光 in situ ハイブリダイゼーション (FISH) を行った。DAPI 染色液で対比染色封入し、Zeiss 社製メタファーで自動画像撮影し、602 枚の TIF 画像を作成した。

2) 量研基本モデルのアルゴリズムによる染色体画像自動判定および線量推定

602 枚の画像から無作為に 280 枚を選び、現有の量研基本モデルで自動画像判定した。

さらにこれを 70 枚を 1 組として 4 組に分け、現有の量研基本モデルによって作成された現有の検量線を用い、4 組それぞれについて自動画像判定し、線量推定を行った。

(注: ISO 19238 [2] の規定にもとづき、目視判定による線量評価におけるトリアージ判定は採用細胞数 50 個で行う。判定から除外する細胞があり得るため、最終的に 50 細胞以上を線量評価用データとして採用できるよう 70 個とした。4 組用意することで 4 回試験した。)

3) 正解データ作成 (専門家による判定修正)

2) の画像 280 枚の自動判定結果 (染色体の画像上の位置および判定した分類名の情報をもつ xml ファイル) について、熟練観察者による目視確認を行い、染色体検出および分類の誤りがあった場合、修正し、正解データとし、AI 自動判定の性能を評価した。

【評価指標】

(1) MAE

染色体の検出性能を評価するために、専門家が目視で計数した染色体数と、自動検出できた染色体数の平均絶対誤差 (Mean Absolute Error, MAE) を計算した。染色体の検出性能が高いほど、平均絶対誤差は小さな値をとる。

$$\text{平均絶対誤差} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\text{自動検出できた染色体数} - \text{実際の染色体数}|$$

(2) Recall と Precision

n はサンプル数。染色体の分類性能を評価するために、Recall と Precision を計算した。

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Positives}}$$

Recall の値は真陽性の数が多いほど高い値をとり、偽陰性が増えると値は下がる。例えば、dicentric 染色体が normal 染色体として判断されるケース（偽陰性）が少ないと、Recall の値は高くなる。Precision の値は真陽性の数が多いほど高い値をとり、偽陽性が増えると値は下がる。例えば、normal 染色体が dicentric 染色体として判断されるケース（偽陽性）が少ないと、Precision の値は高くなる。

4) 追加学習

1-4) で作成した正解データのうち、無作為に選んだ 140 枚を教師データとして現有 AI モデルに追加学習させ、残り 140 枚を追加学習済みモデルで自動判定させ、追加学習の効果を検討する。

これらの方法を実施するにあたり、効率性や適切なデータ管理を目的として関連する機器で構成するローカルネットワークを作成した(図 2-1-1)。

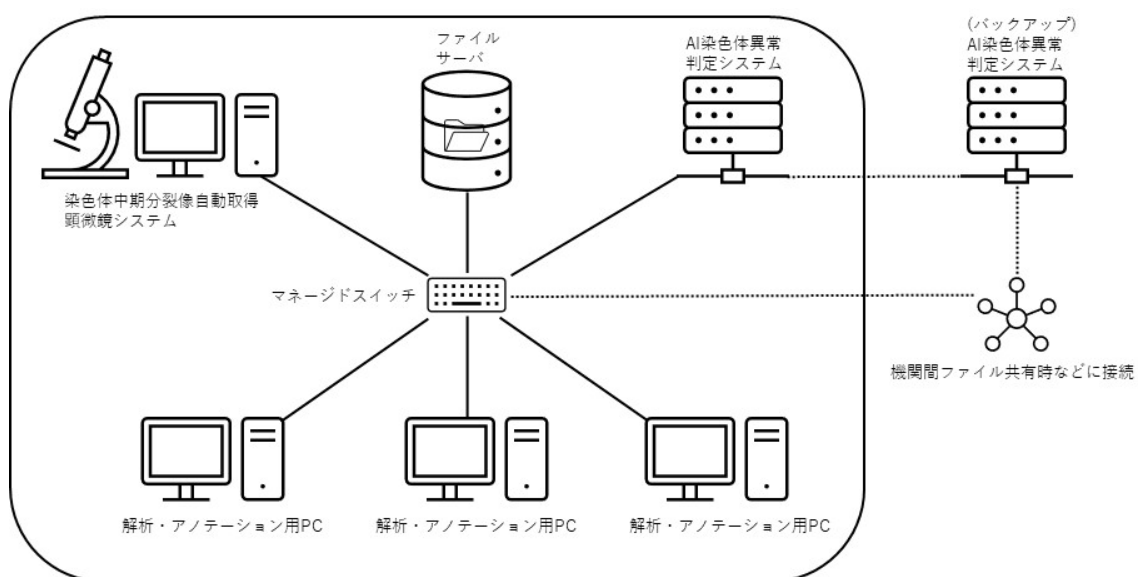


図 2-1-1. 染色体画像データ取り扱い機器構成(枠内がローカルネットワーク)

【参考資料】 使用した現有の基本モデルの性能（2.5 時間コルセミド処理標本を使用した場合）

現有の基本モデルの 2.5 時間コルセミド法による染色体画像に対する染色体の検出および分類に関する性能評価を示しておく。

染色体の検出

染色体検出について、Ground truth との平均絶対誤差は 0.452 である（図 2-1-2 および図 2-1-3）。大まかに言えば、1 個のメタフェーズ（正常の場合 46 本の染色体をもつ）に対して、検出を逃す染色体数は 1 個未満（0.5 個）であることを意味し、検出力は良好である。

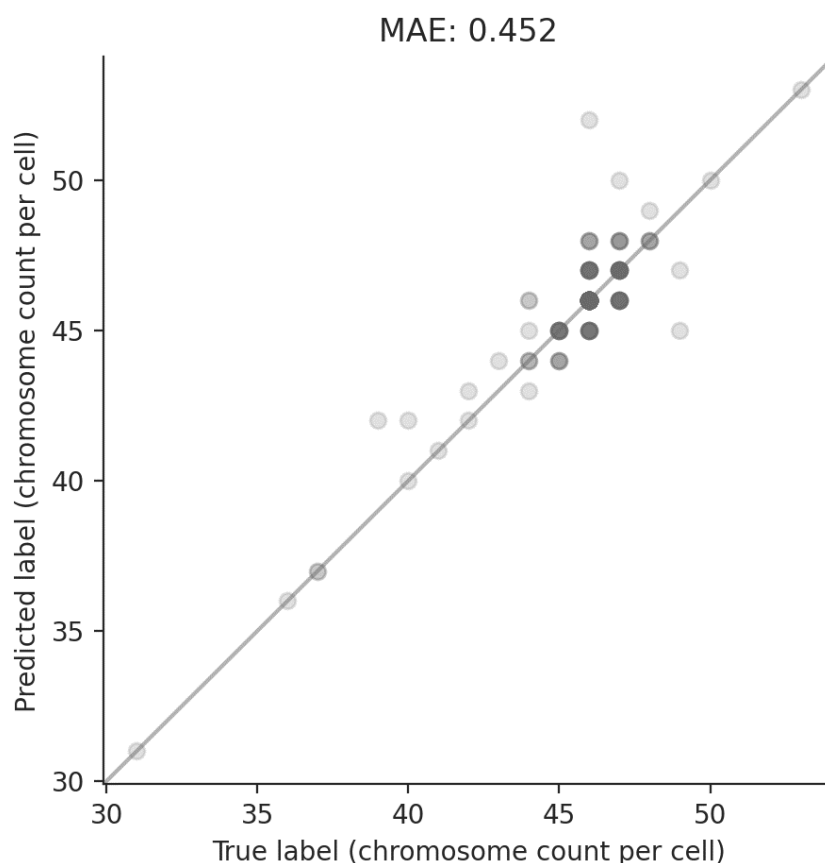


図 2-1-2. 2.5 時間コルセミド法による画像に対する検出された染色体数と実際の染色体数の差の分布を示す散布図。横軸：目視カウントによる染色体数正答、縦軸：AI モデルにより検出された染色体数

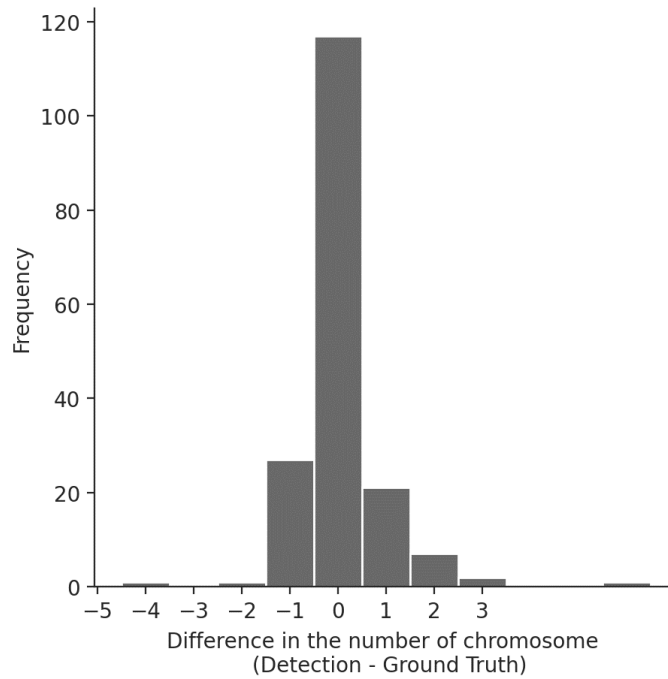


図 2-1-3 2.5 時間コルセミド法による画像に対する検出された染色体数と実際の染色体数の差の分布を示すヒストグラム

(自動検出された染色体数 - 目視カウントによる染色体数)。

染色体の分類性能

各種染色体異常の分類（判別）能を表に示す。現有 AI モデルは、一般的な染色体検査技師（82.2±5.9%）と同程度の判定正答率を示している（77.9%）[1]。

表 2-1-2. 現有 AI モデルによる染色体分類性能

Label	Precision	Recall
normal	0.9909	0.9940
dicentric	0.7792	0.7792
acentric fragment	0.8978	0.8978
others	0.6250	0.2632

2.1.3. 結果

現有の AI モデルを用いて、48 時間コルセミド処理法による染色体標本由来画像の自動判定の性能を検討した。

(1) 染色体の検出

現有モデルを用いて、48 時間コルセミド処理法による画像データに対し染色体の検出および分類を行い、目視による Ground truth と比較してモデルの性能を評価した。まず、染色体検出について、Ground truth との平均絶対誤差は 1.163 であった (図 2-1-4 および図 2-1-5)。これは 2.5 時間コルセミド処理の画像データを用いた時の値 0.452 に比べ低く、ここで作成された AI モデルが実験条件などの差に影響されて性能低下していることを示唆している。AI モデルによる染色体の検出結果は専門家が目視で作成した Ground truth にくらべ少ない傾向にあり、染色体の検出漏れが多いことを示す (図 2-1-5)。

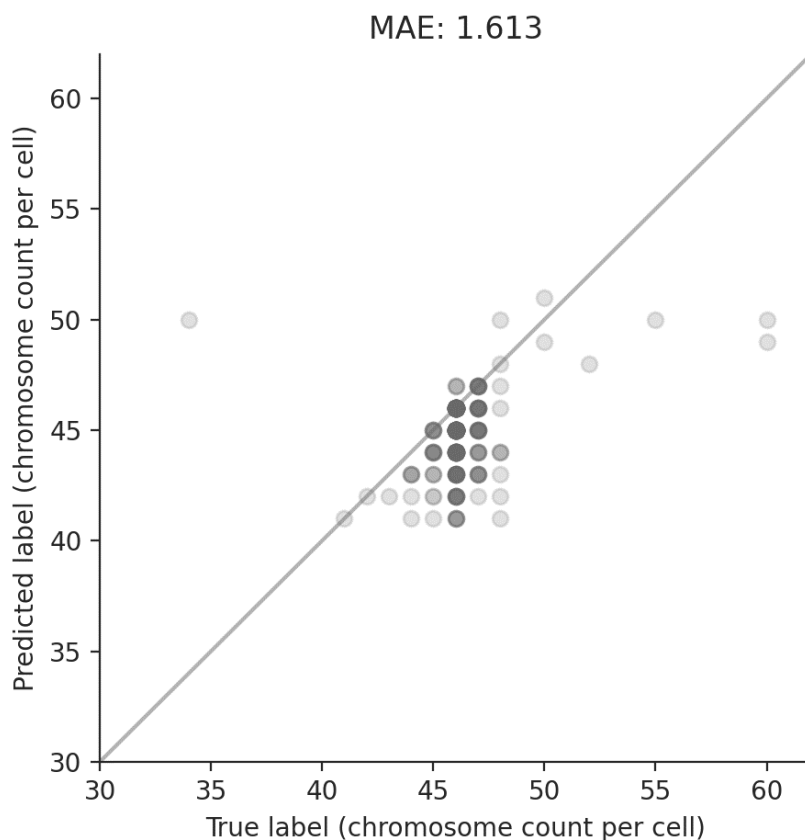


図 2-1-4. 検出された染色体数と実際の染色体数の差の分布を示す散布図。横軸：目視カウントによる染色体数正答、縦軸：AI モデルにより検出された染色体数

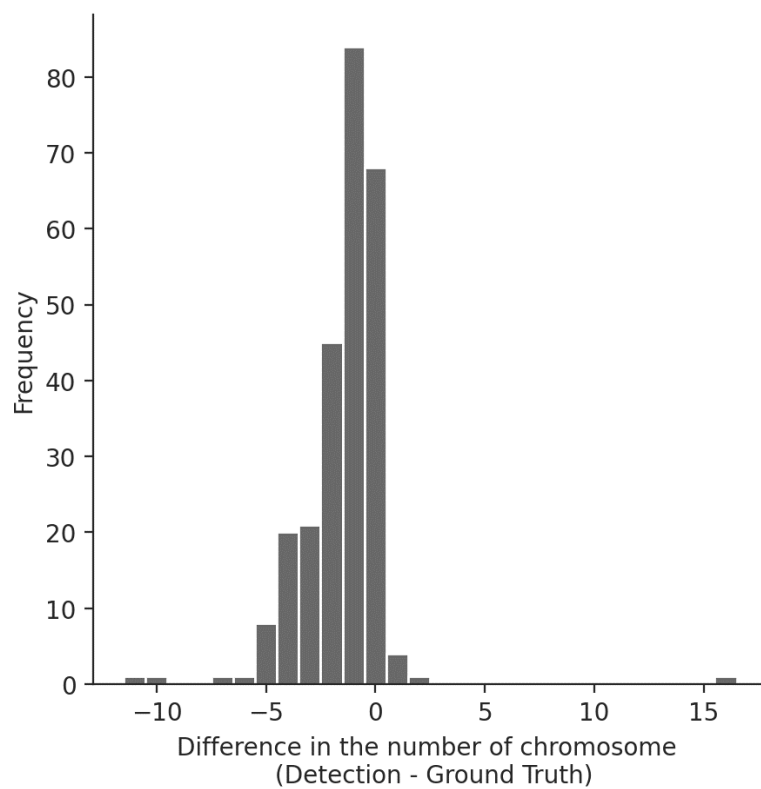


図 2-1-5. 検出された染色体数と実際の染色体数の差の分布を示すヒストグラム
(自動検出された染色体数-目視カウントによる染色体数)。

(2) 染色体の分類

染色体の自動分類結果の評価を行った。評価に用いたデータセット（48 時間コルセミド処理法）のアノテーション付きのデータに含まれる 75 個の dicentric 染色体のうち 36 個を正確に判定し（図 2-1-6）、Recall は 55.3%、Precision は 78.2%であった（表 2-1-3）。Precision はデータセット 1 のスコアと同等だが、Recall においては 2.5 時間コルセミド処理の場合に比べて性能低下が大きかった。これは MAE にも反映されており、本来は dicentric 染色体だが AI は染色体の検出自体が行えていないという場合が多いことに起因する。また、acentric fragment については、テストセットに含まれる 117 個の acentric fragment のうち、85 個を正確に判定し（図 2-1-6）、Recall 72.6%とデータセット 1 のときと比べれば低いものの良好な結果だったが、normal の染色体 139 個を acentric fragment だと誤認識しているという誤検出事例が多くみられ、Precision は 37.6%と低いものとなった。



図 2-1-6. Ground truth とモデルによる推論結果 (Predicted label) を示す混同行列 (ラベルが割り当てられていなかった際には、「nothing」に分類している)

表 2-1-3. モデルによる染色体分類性能

Label	Precision	Recall
normal	0.9936	0.9548
dicentric	0.7826	0.5538
acentric fragment	0.3761	0.7265
others	0.3333	0.1250

(3) トリアージ線量推定

現有の AI モデルを用いて染色体異常の検出とその異常染色体検出頻度を利用した照射放射線の線量推定を行った。線量評価のために、全 602 画像に対し AI による染色体の検出と分類の操作を行なったあと、検出された染色体数が 46 +5 の範囲にある画像を線量評価用に出した (446 画像)。そこから 70 枚の画像を 1 セットとして、4 セットを線量評価用のサンプルとし、線量評価を行なった。ここでは現有の (2.5 時間コルセミド法で作成した) 検量線データによる線量推定を行なった。

検量線作成により求めた係数と分散共分散行列、そして線量評価用サンプルにおける染色体異常発生頻度をもとにして、radir [3] を用いて線量評価を行った。dicentric に着目した場合、1 細胞あたりの dicentric 染色体の頻度は 0.1285~0.2 であり、これは 1.439~1.853Gy の推定線量に相当する (表 2-1-4)。前項の染色体の分類の評価でわかったように、dicentric に対しては検出漏れがおおく、recall が 55.3%であることから、現有の AI モデルの解析では実際の dicentric 異常の頻度よりも 40%ほど少なく染色体の異常頻度を見積もってしまう。そのため推定線量の値も実際の値より低い見積もりとなった。95%CI High (上限値) は 4 セットとも 2.0 Gy を超え、被ばく患者の見逃しは起こらない数値ではあるが、線量推定に用いた判定結果には誤りが含まれていることになる。

表 2-1-4. dicentric に着目した場合の線量推定結果

Dose (Gy)	Set	# dicentric	# cell	Frequency	Estimated dose	95% CI Low	95% CI High
2.0	1	9	70	0.1285	1.44	0.89	2.00
2.0	2	14	70	0.2000	1.85	1.31	2.40
2.0	3	11	70	0.1571	1.62	1.07	2.17
2.0	4	13	70	0.1857	1.78	1.23	2.33

注：実際の被ばく医療現場の診断では 95%CI High (上限値) を参考に用いる。

2.1.4. 考察

(1) 染色体の検出性能の向上

染色体の誤判定を調べたところ、91.2%で Y 染色体が関わっていることがわかった [補足資料]。Y 染色体はゲノムサイズの多様性がよく知られている (長腕のヘテロクロマチン領域、動原体周辺領域など)。これにより、FISH 画像では、検出される FISH シグナルの大きさに個人差が生じ [4]、対比染色された Y 染色体の全長にも個人差が生じる (Y 染色体は人によ

り染色体 D 群～G 群程度のサイズがみられる)。この点をふまえれば、染色体検出性能は、今後より多くの多様な教師画像を学習させることで可能になると考えられる。

現有 AI モデルにおいて、Y 染色体未検出の影響を検討する。

最新のヒトゲノムアセンブリー (GRCh38/hg38) [5]

[<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/grc/human>] に基づけば、ヒトゲノム全長に対して Y 染色体が占める割合は、配列決定されたヒトゲノム配列の中では 1.85%、まだ配列決定されていない Uncertain 配列を含む全配列では 2.7%程度と予測される (Uncertain 配列に Y 染色体が占める割合は 20.5%)。2.0 Gy における二動原体頻度は 0.31 程度 [6] である。以上により、Y 染色体未検出による、Y 染色体が関与した二動原体未検出は、トリアージ判定 (50 細胞を用いた線量評価) で 0.3～0.4 個、フルスコアリングによる線量評価 (100 個の二動原体が出るまで観察。約 330 細胞) で 1.9～2.7 個程度である。このことは、2.0 Gy トリアージ線量評価では最大で 0.03 Gy 未満減じる影響が生じさせ、誤差範囲内であると考えられる。

(2) 染色体の分類性能の向上

現有 AI モデルで 48 時間コルセミド処理法の画像を自動判定させた場合、二動原体の判定ミスが 2.5 時間コルセミド処理法の画像より多くみられた。数は少ないものの追加学習により向上の方向性がみられるので、今後、より多くの追加学習を行うことでアルゴリズムの性能向上が見込まれる。

2.2. AI 染色体線量評価をソフトウェアとするための設計方針の検討

2.2.1. 目的

2.1 において評価した AI 検知アルゴリズムは現状プログラムをキャラクターベースで実行する動作環境にあり、染色体線量評価の実施者が容易に使用できる形態になっていない。災害対応時に間違いなく操作するためのわかりやすい操作性や汎用性さらに保守性等も考慮に入れた上で、原子力災害医療における染色体線量評価担当者が適切に使用できるよう必要な機能及び仕様の検討を行った。

2.2.2. 方法

通常の染色体線量評価の経験やネットワークによる染色体画像共有が実現化されている状況を想定し、試作アプリケーションを作成した。試作するアプリケーションはウェブブラウザベースで実行可能な、プログラミングやコードのインストールを必要としないような、マウス操作のみで AI を利用できるシステムを目標とした。

Python プログラムを背後で動かし、表面上は既存のウェブブラウザからアクセスして使えるアプリケーションを作成するシステムである、streamlit を使用した。

PNA-FISH 画像から異常染色体を検出・分類する AI の開発を行うが、その運用に関しても検証を行う。医療従事者などが AI を使用する際に、そのプログラムを利用するには、通常、機器のセットアップやプログラムのインストール、データの読み込み、プログラムの設定、データの可視化や出力、また AI の再学習とメンテナンスなどといった諸々のプログラミングの操作が必要になり、AI 利用の障壁となる。今回はそれらの問題を解決し、頑健で簡易な AI の運用を行う方法を模索・検証することを目的の一つとし、その方法としてウェブブラウザベースで実行可能な、プログラミングやコードのインストールを必要としないような、マウス操作のみで AI を利用できるシステムを構築し、検証する。

方法としては、Python プログラムを背後で動かし、表面上は既存のウェブブラウザからアクセスして使えるアプリケーションを作成するシステムである、streamlit を使用し、作成した AI をマウス操作のみで使用できるようなアプリケーションとして実装した。streamlit でのウェブアプリケーションには以下の機能を実装し、マウス操作のみで AI モデルを使用し解析が可能になるようにした。これらの機能の検証用に染色体画像の一部をデモデータとして使用して、機能が動くことを検証した。

機能 1：クリック操作のみでの画像の読み込み

機能 2：AI アルゴリズムおよびそのパラメータの設定をマウス操作のみで行

えるようにする

機能3：AIによる画像解析結果（検出した染色体）の可視化

機能4：事前に作成された検量線と radir を利用しての線量推定

機能5：パスワード保護

なお、今回作成したこれらのアプリケーションは検証を目的としているためネットワーク外部などからのアクセスは行えず、PC を設置した場所での運用を想定している。また、解析に使用した計算環境は表 2-2.の通りである。

表 2-2. 解析に使用された計算環境

項目	詳細
CPU	Intel Core i9-10900K 10-Core 3.7GHz
Memory	DDR4 3000MHz 64GB
GPU	NVIDIA GEFORCE RTX 3090
OS	Ubuntu 20.04.3 LTS

2.2.3. 結果

作成したアプリケーションの使用法と結果は以下の通りであった。

2.2.3.1. 認証

本試験ではローカルのネットワークのみからのアクセスに限定したため、不正アクセスは生じないが、実環境での必要性に鑑み、作成したAIの不正アクセスを防ぐためにパスワード認証を設定した。また必要に応じさらにセキュリティの頑健なユーザ認証も実装可能とした(図 2-2-3-1)。

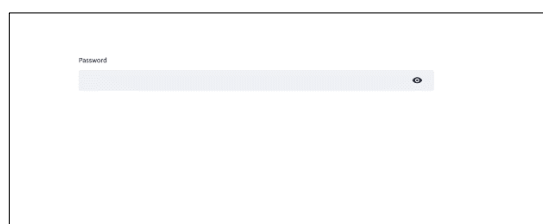


図 2-2-3-1. アプリケーションのパスワード認証画面

2.2.3.2. アプリケーションの操作

本アプリケーションは一般のウェブブラウザソフトウェアを経由して操作するため、プログラミング操作を必要とせず、規定のアドレスにアクセスする形で操作する。パスワード認証を行った後、図 2-2-3-2.のようなアプリケーションのメイン操作画面が表示される。

画面左のサイドバーでデータの入力や AI モデル仕様のパラメータなどを設定する。今回は
インプットデータを PC の任意の場所から選ぶモードと、デモデータを読み込むモードの 2
つを実装した。

AI アルゴリズムの選択では DINO のモデルと YOLOv5 のモデルのいずれかを選択する。
Confidence score threshold では、AI が認識した物体それぞれに付与された confidence score
を用いて検出物体のフィルタリングを閾値による行う。Show individual result では、入力し
た画像それぞれに対して検出結果を画像として表示するか否かを選択する。

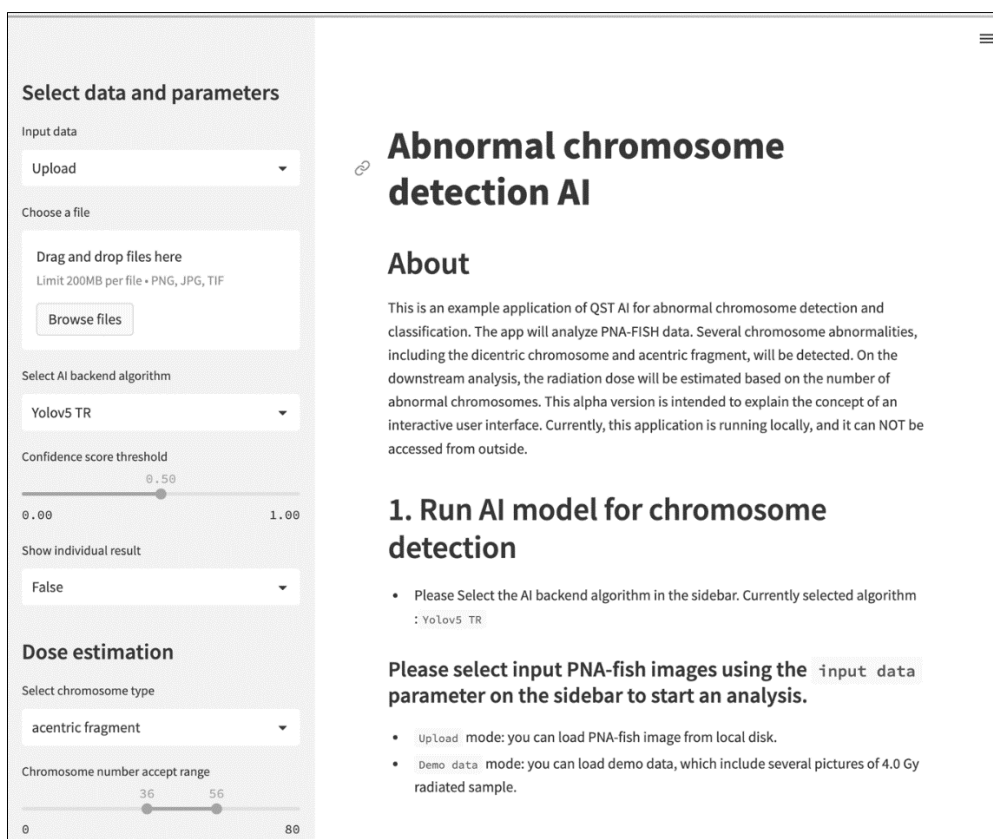


図 2-2-3-2. アプリケーションのメイン操作画面

2.2.3.3. アプリケーションの実行結果例

データ選択とパラメータ設定を行ったあとに自動的に出現する Load and Run AI model ボタンをクリックすることで染色体検出 AI が動作を開始する。図 2-2-3-3.にその結果の一例を示す。

入力した染色体画像、画像に検出した物体のバウンディングボックス、分類結果ラベル、その結果に対する AI の confidence score が画像として表示される。また、それぞれの物体に対しての位置情報、分類結果ラベル、confidence score を表として数値で画像右側に表示する。

Please select the AI backend algorithm in the sidebar. Currently selected algorithm: yolov5-16

Individual detection results

- AI results will be shown with the individual input image. This mode takes more time. If you want to run AI faster with many input data, please select `False` in the `Show individual result` parameter on the sidebar.

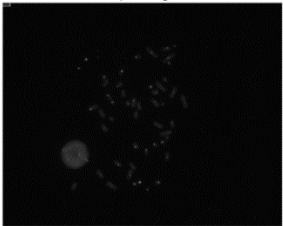
Load and Run AI model

Operation 22/22 done in 19.98 seconds. Please turn off `Show individual result` mode if you want to run ai for faster calculation.

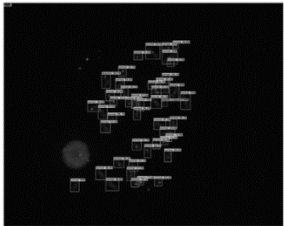
qst01_4.0gy_p0007.png

Normal: 44, Dicentric: 1, Acentric fragment: 1, Others: 0

Input image



Detected chromosome



	xmin	ymin	xmax	ymax
0	774	184	799	208
1	749	265	779	292
2	611	804	640	833
3	583	813	618	842
4	717	621	751	649
5	486	439	518	471
6	741	609	769	634
7	449	327	488	390
8	557	441	588	476
9	584	427	617	481

図 2-2-3-3. アプリケーションの染色体検出結果表示画面

次に、検出した染色体の種類ごとの個数およびヒストグラムを表示する（図 2-2-3-4.）。この数値を用いて事前に作成された検量線から線量推定を行うが、画像にノイズが多く含まれる場合や、1 画像中に複数の細胞が映り込んでしまった場合があり、その場合は検出された染色体数が基本の本数 46 を逸脱する。このような線量推定に向かない画像を除く操作を行う。画面左のサイドバーで線量推定に使用する画像としての染色体の本数の幅を決定する（図 2-2-3-2.）。

2. Show chromosome count

Chromosome count distribution

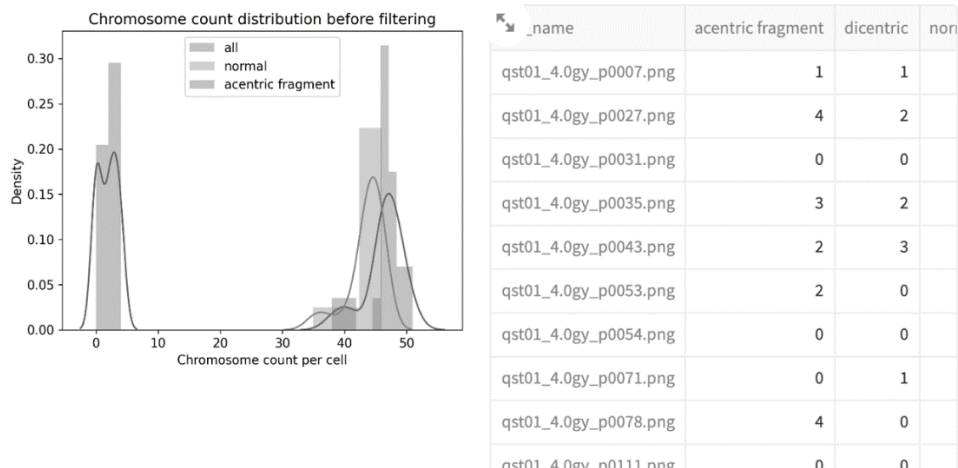


図 2-2-3-4. アプリケーションの検出染色体数情報画面

線量推定には dicentric または acentric fragment の頻度を利用するが、どちらを利用するのかをサイドバーで選択する (図 2-2-3-2.)。選択した染色体の種類に応じて、あらかじめ計算された検量線と、それを利用した線量推定の結果が 95%信用区間とともに表示される (図 2-2-3-4.)。

3. Dose estimation

- For the dose estimation, this app performs inverse-regression estimation with an R package, `radir`. The calibration curves are already calculated and saved in the app.
- Either `Acentric fragment` or `dicentric` can be used as the abnormal chromosome for the dose estimation. Please select in the sidebar.
- Dose estimation will be performed after filtering out pictures that have a too-small or too-large number of chromosomes. Please select the range using `Chromosome number accept range` parameter in the sidebar.

Dose estimation result: 4.026, 95%CI: [3.331, 4.729]

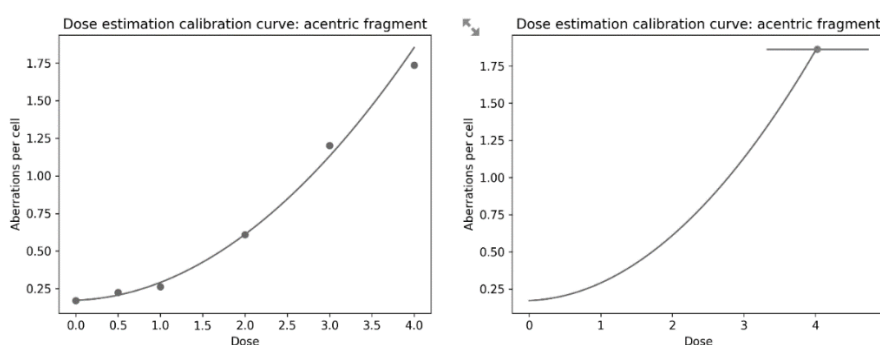


図 2-2-3-5. アプリケーションの線量推定情報画面

以上の通り、本検討においては Web アプリケーションベースの試作環境を作成し、AI 染色体線量評価の一連の流れについてマウス操作ベースにて可能な限り完結するシステムを試行した。その結果、2.2.1.にあげた目的をほぼ達成する操作性が確認できた。また、汎用性や保守性を考慮するとデスクトップアプリケーションよりも Web アプリケーションの方が有利であるとの感触を得た。

本アプリケーション試作に基づき、実際のアプリケーション作成における要件としては、今回実装した要件をすべて取込み、加えて 2.3.にて検証を行う画像共有方法との親和性やネットワークセキュリティの確保に関する要件を追加する必要がある。セキュリティに対応するアプリケーション要件はネットワークセキュリティの条件が前提となるため、今後の整備状況と必要十分な要件定義を並行して検討することが現実的である。

2.3. 染色体画像共有方法の調査・検討

2.3.1. 調査・検討の目的

原子力災害時の被ばく線量評価では、対象となる被験者の人数や地域の被災状況に応じて全国の高度被ばく医療支援センター等が連携することが想定される。これらの機関間で AI 染色体線量評価に用いる染色体画像の共有を行うにあたり、特に染色体画像データの取り扱いに関する特性を考慮しつつ、利便性、安定性、経済性等の多角的な観点を踏まえた最適な方法を検討し、顕微鏡による染色体像の撮影から画像データを共有する一連の流れについて検証を行った。なお、検証に際しては、高度被ばく医療支援センターである弘前大学および長崎大学の協力の下で実施し、両センターの専門家との意見交換を行うことで染色体画像共有方法に関する課題の抽出を行った。

2.3.2. 画像共有方法の調査

顕微鏡で撮影した染色体画像の共有では、利便性、個人情報管理、コストなどの観点から最適な方法を検討する必要がある。原子力災害時の線量評価に用いるデータの遠隔地への共有については、JCO 事故後の緊急被ばく医療のあり方を議論する過程において問題提起されており、2009 年には放射線医学総合研究所が「緊急被ばく線量評価情報共有・伝達システム」を開発し、高度被ばく医療支援センター連携会議線量評価部会の前身である放射線医学総合研究所染色体ネットワーク会議の専門家間のデータ共有を可能としていた。しかし、このシステムは漏洩や改ざんのセキュリティを担保するために操作や管理が煩雑であり、2011 年福島第一原発事故の際にも、放射線医学総合研究所内の情報共有にのみ使用され、染色体ネットワーク会議等外部との情報共有には用いられなかった。その後染色体ネットワーク会議および線量評価部会では染色体画像データ共有のインフラの整備が何度か問題提起されているが、利便性とセキュリティの確保および維持・管理コストをバランスする解決方法の合意までには至らず、現状の高度被ばく医療センター間での染色体画像データのやりとりは、画像データをパスワードロックしたポータブルハードディスクにコピーし、郵送もしくは手交することによって行われている。

そのような現状で AI 染色体線量評価体制の構築を検討するにあたり、解析が AI により効率化される状況においてその前提となるデータの共有が物理的な移動を伴う方法のままでは実効性を大きく毀損することとなることから、改めて染色体画像データの共有方法を検討することが必要となった。近年では社会情勢の変化なども要因となりセキュリティの担保されたデータ情報共有の一般化や多様化が進み、結果としてコストの減少が見込める状況である。そこで AI 染色体線量評価における画像データの伝送方法として実現性がある方法、サービスについて調査を行った。

表 2-3.画像共有方法の調査結果

方法	A	B	C	D
概要	染色体中期分裂像自動取得顕微鏡システムに付帯する機能。	量研機構が契約し業務に使用しているクラウドファイル共有サービス	データセンターサービス企業が提供する医療機関向け共有サービス	量研機構内にファイルサーバを設置し、自ら維持管理
利便性	顕微鏡の撮影から比較的シームレスに画像共有が可能。顕微鏡を研究など他目的にも使用している場合は、他機関と共有するべき線量評価用撮影画像とその他共有するべきでない画像の切り替えを作業者が確実に行う必要がある。	撮影者(機関)は染色体画像を顕微鏡システムソフトウェアから一般画像形式としてエクスポートする必要がある。画像ファイルの更新には数分程度のタイムラグが発生することがある。契約容量に制限があり被災者の規模などによる臨機応変なスケールアップが難しい。	撮影者(機関)は染色体画像を顕微鏡システムソフトウェアから一般画像形式としてエクスポートする必要がある。提供される医療情報システムにアップロードする必要がある。専用システム(インターフェース)の開発も可能。	撮影者(機関)は染色体画像を顕微鏡システムソフトウェアから一般画像形式としてエクスポートする必要がある。
セキュリティ	臨床検査機関等において一般臨床検査において世界的に使用実績のあるシステムであり、安定性が高い。一方で機関間通信インフラについてはユーザが留意し管理する必要がある。	量研機構に限らず省庁等の業務に使用されているサービスのためセキュリティ全般が担保されている。双方向データ共有を行う際にファイルの改ざんや誤削除の防止、履歴の記録など高度な設定が行えない。	ネットワークの維持管理などを委託することが可能。セキュリティが高くかつ利便性の高いネットワーク接続の提供、個人情報保護に関する法規制・ガイドラインなどについてのコンサルティングが可能。	サーバ、ネットワーク、ユーザ管理などを自ら行う必要がある、セキュリティ担保のハードルが高い。
コスト	初期導入費用は顕微鏡システムが前提のため比較的高額、顕微鏡としての維持コスト以外の負担は少ない。※全ての高度被ばく医療センターに配備済み。ただし共有機能に対応した現行バージョンのソフトウェアが配備されているのは現状2機関のみである。	追加費用負担なし。	初期導入コストは比較的安価に始めることが可能であるが、維持管理コストが恒常的に必要であり、委託するサービス内容により追加の費用も必要となる。カスタマイズしたシステムやユーザインターフェースを開発する場合は導入コストも必要となる。	初期導入費用としてサーバハードウェア・ソフトウェアの導入費が必要。維持管理については専門知識を有する人材が必要となる。

調査の候補としたのは、A) 各高度被ばく医療センターに配備されている染色体中期分裂像自動取得顕微鏡システムの最新バージョンに機能付加されている画像共有機能、B) 代表的なオフィススイートとして提供されているオンラインストレージサービス、C) 電子カルテ、遠隔地医療、地域医療連携などの使用を想定したサービス、D) 高度被ばく医療センター各機関の IT インフラおよび人材による自前のファイルサーバ構築、の4つの方法である。調査の方法としては、メーカー、ベンダー、専門家へのヒアリングとそれぞれから提供された資料に基づき行った。調査の結果を表 2-3. に示す。

2.3.3. 画像共有方法の検討

2.3.2.において調査を行った4つのうち方法 A は他と比較して、利便性が高いことが明らかであった。一方でネットワーク接続についてはある程度高度被ばく医療センターにて整備・管理しなければならず、導入費用がその他の方法と比較して高額であった。ただし方法 A のベースとなる染色体中期分裂像自動取得顕微鏡システムは各高度被ばく医療センターに導入済みで各センターが使い慣れていることから操作難易度が低く、さらに量研機構および長崎大学においては追加ライセンス費用なく画像共有機能の有効化が可能であることから、画像共有方法の検討として、方法 A を採用し、量研機構、長崎大学に加えて弘前大学にも共有システム実行可能な染色体中期分裂像自動取得顕微鏡システム制御ソフトウェアを導入し、3 機関にて試験を行うこととした。

量研機構および長崎大学においては既設顕微鏡システムの画像共有機能を有効化し、弘前大学においては共有機能を有効化した状態の顕微鏡制御ワークステーションを設置した。各機関とも顕微鏡システムを機関内イントラネットに接続し、他 2 機関との通信を行うためのファイアウォール設定を行い、各機関の顕微鏡にて染色体画像の撮影を行い、その結果の共有について確認を行った。

その結果、各機関間での通信経路の確保が確認された。また他機関の撮影結果を数分程度の時間差で自機関の顕微鏡システムにて表示、解析可能な状態にできることが確認された。顕微鏡システムで共有された染色体画像データはシステム固有のデータ形式として保存されるため、AI システムに流し込むためにはデータ共有先のオペレータが手動で TIFF 形式にエクスポートする必要がある。数検体であれば手動操作でもさほど煩雑ではなく問題にはならないが、多検体を取り扱う場合は操作の煩雑さに加えて取違などのリスクが上がるのが想定されるため、この過程の自動化も将来的に必要である。

また、通信のセキュリティについてはさらに改善の余地があることが明らかとなった。本検討においては、通信は暗号化された状態でインターネット回線での通信を用いたが、さらにセキュリティを向上させるために VPN などのインフラを用い

るべきである。染色体画像データ共有に参加する高度被ばく医療センターは大学および国立研究開発法人であることから学術情報ネットワークが提供する VPN サービスの活用が合理的であると考えられる。



図 2-3. 染色体画像データの共有(弘前大学にて撮影した画像を量研機構にて表示)。

2.4. AI 染色体線量評価の多重化の調査・検討

2.4.1. 目的

省力化はAI導入の意義の一つであり、保守・管理の手間を考慮しても開発したAIシステムをすべての高度被ばく医療センターに配備する必要は考えにくく、基幹センターなどに配備した一つのシステムをネットワークを利用して各センターが利用することが現実的である。一方で、コンピュータシステムは適切に管理を行ったとしても障害が発生する可能性があり、さらに、複合災害など広範囲での被災を伴う原子力災害を想定した状況においても安定的な運用を担保するためには、システムの地理的な冗長性を確保する必要がある。そのため2.2.の要件にもとづき作成するシステムの分散配置に備え、現在稼働中のAIアルゴリズム計算用ワークステーションのシステムを複製化し、量研機構のAIシステムが被災により不能になる想定で、遠隔地に配備した複製システムをバックアップシステムとして利用可能か、試験を行った。

2.4.2. 結果

現在稼働中のAIアルゴリズム計算用ワークステーションと同等性能のワークステーションを導入してAI実効環境の整備を行い、複製システムにおいてもAI染色体異常検知が可能であることを確認した。

複製システムに遠隔地を想定した端末からネットワーク接続し、リモート操作によりAI染色体異常検知が可能であることを確認した。

冗長化により現在稼働中のAIアルゴリズムについて、システム障害時にもAI染色体線量評価を実施可能となった。また、今後開発するアプリケーションをより安定的に運用することが可能となった。

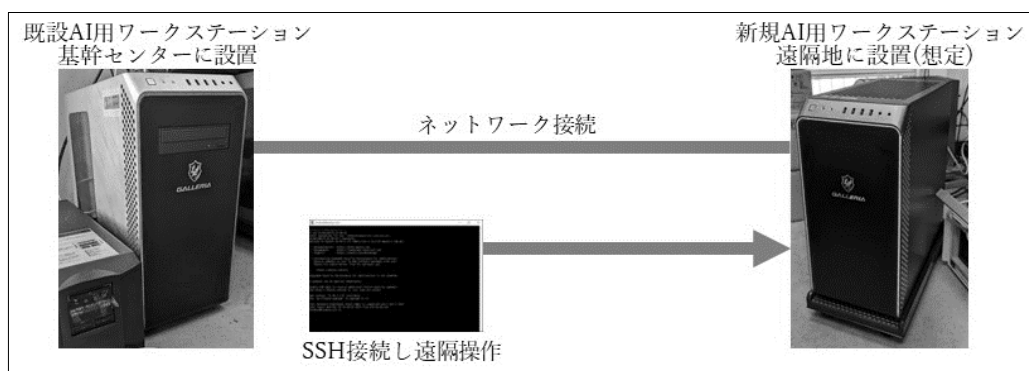


図 2-4. 試験の概要

2.5. 高度被ばく医療支援センターへの導入の検討及び調整

2.5.1. 目的

開発した AI 染色体線量評価アルゴリズムを原子力災害医療体制へ導入するためには、災害時においてどのように AI 染色体線量評価を行うかの計画について、関係者の合意の下で策定を進める必要がある。そこで 2.1～2.4 の検討に基づき、AI 染色体線量評価をシステム化し体制へ実装するための方法と解決すべき課題について検討を行った。

2.5.2. 方法

従来の染色体線量評価体制をもとに AI が導入された染色体線量評価体制案を AI 染色体線量評価フローとして受託者が作成し、各高度被ばく医療センター生物線量評価専門家および線量評価部会員からの意見聴取を行った。検討に際しては、従来の生物線量評価体制と同様に、生物線量評価の対象者(被検者)発生時には、まず発生地域の近傍の高度被ばく医療センターが対応にあたり必要に応じて他地域の各センターが支援すること、被験者の適用について、染色体線量評価の対象線量域である、被ばく症状を発症する程度の線量を被ばくをした可能性のある公衆や作業員であること、を前提とした。

想定した AI 染色体線量評価フローは以下の通りである(図 2-5)。被ばく疑いのある患者は被災場所から原子力災害拠点病院もしくは高度被ばく医療センターに受診することが想定される。①そこで生物線量評価が必要と判断されれば採血を行う。②採血された血液は当該高度被ばく医療センターにてリンパ球の分離、幼若化と培養、細胞の固定を行い、さらに固定された細胞から染色体標本の作成を行う。③染色体標本から分裂中期染色体像を自動的に検出しデジタル画像として撮影を行う顕微鏡システムにて必要な数の染色体像が取得され、顕微鏡システムの記憶装置に格納される。④撮影データは量研機構に設置された AI システムに転送され染色体異常の自動検知を行い、⑤必要に応じてその結果を専門家が確認し、①被検者の患者対応を行なっている発信元の高度被ばく医療センターもしくは拠点病院に返送する。データを返送された機関では染色体異常判定結果の確認を必要に応じて行い、検量線に基づき線量評価を行う。また、想定した各ステップにはそれぞれの機関ごとに検査処理能力があり、さらにその処理能力が複合災害などの被災により発揮できないことも考えられることから、その場合にはそれぞれのステップにおいて他の高度被ばく医療センターが役割を分担することも必要である。

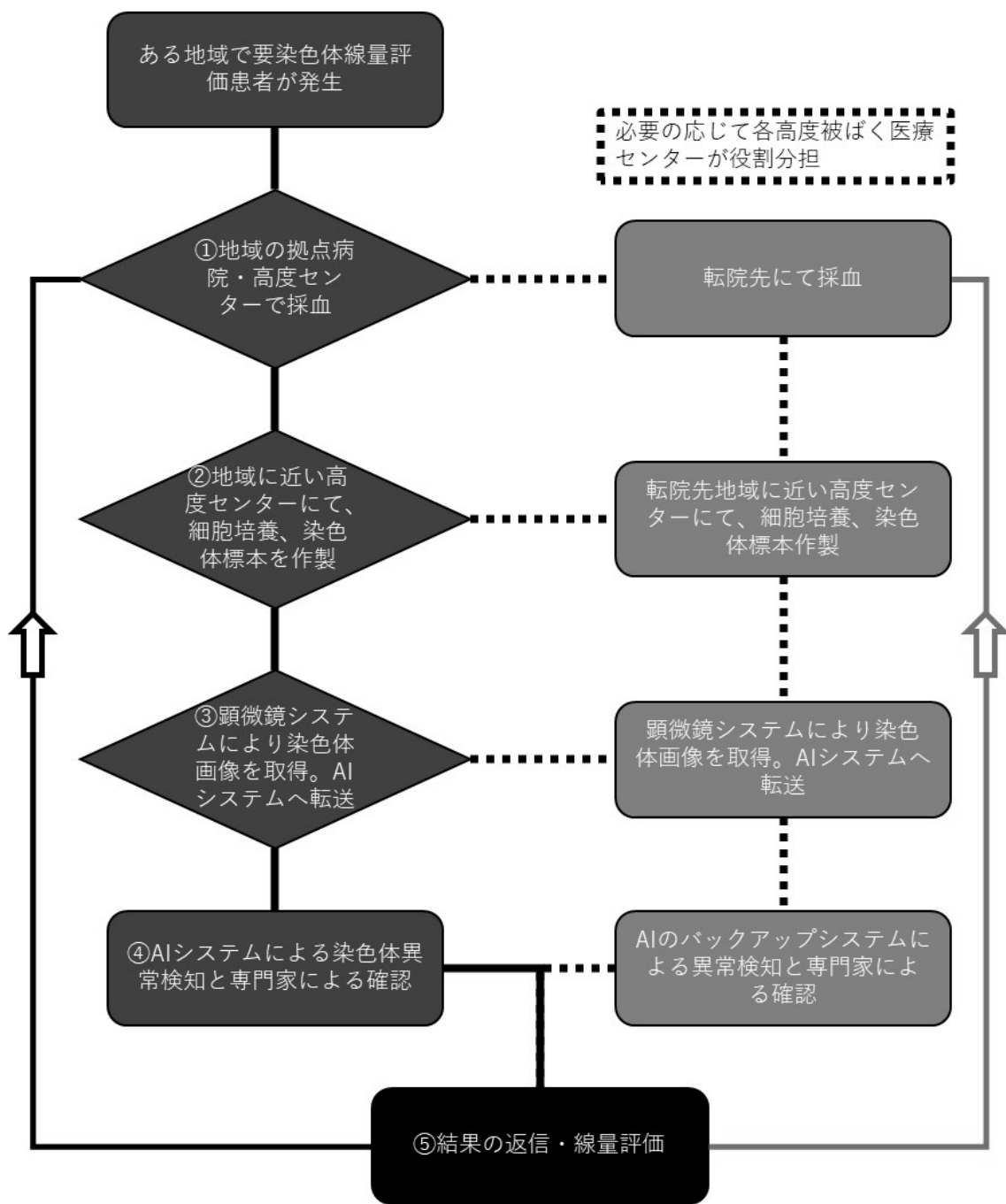


図 2-5. AI 染色体線量評価フロー案

2.5.3. 結果

この想定について、5つの高度被ばく医療センターの生物線量評価専門家および線量評価部会委員に対して説明し意見聴取を行った結果抽出された意見は表2-5の通りであった。

AI染色体線量評価フローについてはすべての方から同意を得ることができたため、今後の体制整備にあたってはこのフローをベースに計画を策定すべきと考えられる。一方で出された多くの意見は通常の染色体線量評価にも共通する現状認識や課題であり、顕微鏡システムの更新などはAI染色体線量評価の前提となることから必須であり的確な措置を継続的に行う必要がこれまでも増して重要であることが明らかとなった。

表2-5. 生物線量評価専門家および線量評価部会委員から得られた意見

フロー図中のステップ	意見	回答・意見に基づく課題の整理
①地域の拠点病院・高度センターでの採血	<p>特に東北・北海道地域にて冬季に災害が発生した場合、患者の転院や専門家の現地派遣、血液検体の輸送が困難な場合が想定されるため、対応を検討する必要あり。</p> <p>血液検体の輸送の取り扱いについて注意事項をまとめる必要あり。</p>	<p>血液の採血、保管および輸送方法については、詳細な方法のマニュアル化などを行う必要があり、R5年度以降に線量評価部会などの活動を通じて進めるべきである。マニュアルは染色体線量評価専門家のみならず派遣チームや原子力災害医療協力機関などでも理解できる内容とすることにより、専門家の介入なしに対応できるような内容を盛り込むべきである。</p>
②地域に近い高度センターにて、細胞培養、染色体標本作製	<p>標準的なプロトコルに即して細胞操作や標本作製を行っても得られる染色体像にラボごとの違いが現れる可能性があるため、単一のAIで解析を行う前提であれば標本作製までの技術の更なる均てん化が必要ではないか。</p>	<p>染色体標本作製までの工程に関する技術の均てん化にはマニュアルの作成に加えて、共同での演習等を実施するなどが効果的であると考える。R5年度以降において線量評価部会や染色体分科会を通して、各センター横断的な活動を提案したい。</p>

<p>③顕微鏡システムにより染色体画像を取得。AI システムへ転送</p>	<p>顕微鏡システムの購入から時間が経過しており、最新の画像共有システムに対応していないため、本事業にて試験を行った顕微鏡システムに付属する共有方法に参加できない。</p> <p>染色体画像は個人情報であり、その取扱いは厳格であるべきである。またインターネットによる画像データ共有を行うのであれば IT セキュリティについても各機関の情報担当部門にも確認しつつ、全ての高度被ばく医療センターが参加可能な方法を採用しなければならない。</p>	<p>顕微鏡システムをネットワークに接続し画像共有を行う場合には、制御・解析ソフトウェアについて OS のサポート期間終了などが原因となりセキュリティの確保が一定期間を過ぎると難しくなることから一定期間での更新が必要なことを関係者の共通理解とし、継続的な措置を行う必要がある。</p> <p>本事業 2-3 の検討により、染色体画像共有についてはデータを取り扱う組織が限定的であることから、多機関 VPN 接続を構築する方法が合理的と考えられ R5 年度からその構築を進めたい。</p>
<p>④AI システムによる染色体異常検知と専門家による確認</p>	<p>将来的には AI システムに各センター専門家がアクセスし操作できるようにした方が便利が高い。</p> <p>AI システムの性能向上のためには多様な教師画像を収集して学習させることが必要で、量研機構だけではなく各高度被ばく医療センター専門家が教師画像作成を行う状況を目指すべき。</p>	<p>本事業 2-2 においては Web アプリでの試行を行ったが、多機関 VPN 接続などセキュアな接続を前提として Web アプリ方式を採用することにより各センター専門家のアクセスが可能と考えられるため、ソフトウェアのテストと本格開発を進めるべきと考える。</p> <p>AI システムの強化学習についても Web アプリなどを活用して便利性の高いインターフェイスを作成することにより進めることができると考える。</p>
<p>⑤結果の返信・線量評価</p>	<p>各機関共通の AI が染色体異常判定を行うのであればその状況での共通検量線の作成を行うべき。高度被ばく医療センターのなかには検量線作成に必要な照射線源を有してい</p>	<p>上記 AI システムの強化学習と同様に、各高度被ばく医療センター専門家がサンプルを持ち寄ることにより共通検量線を作成することは可能である。量研機構が照射血液を準備し各高度被ばく医療センタ</p>

<p>ない機関もあるため、量研機構が中心となって照射済み血液を各機関に配布するなどの方法を検討すべき。</p>	<p>一に配布することも容易であると考えられることから R5 年度以降に取り組みを開始したい。</p>
---	---

3. まとめ

人工知能(AI)による染色体異常判定技術を、原子力災害医療における生物線量評価体制に導入するための調査および検討を行った。

その結果、量研機構がこれまでに開発している AI アルゴリズムは国内で標準的に用いられている染色体標本作製のための細胞培養法においてもある程度の確度をもって染色体異常の検出が可能であった。今後は全国の高度被ばく医療センターにて実際に作成した染色体標本画像データを用いた場合の AI 性能の評価の検証と、恒常的な AI の強化学習の継続によるさらなる判定性能の向上を目指すべきである。

この開発した AI アルゴリズムを活用するためのアプリケーション化や機関間データ共有方法、AI システムの機能維持のために必要な冗長化について検討を行ったところ、現実的な方法を整理することができた。本事業で整理した方法にもとづき体制整備を実施するためには現在の各高度被ばく医療センター状況で違いはあるものの各々必要に応じて機器等の整備が必要になる。

上記の調査及び検討をもとに、各高度被ばく医療センターと状況の共有を行い、今後の AI 染色体線量評価の実現に向けて方向性の共通認識を得ることができた。本事業の結果は生物線量評価の実効性向上に資するものであり、この結果を踏まえ、体制整備のための施策を引き続き推進することが重要である。

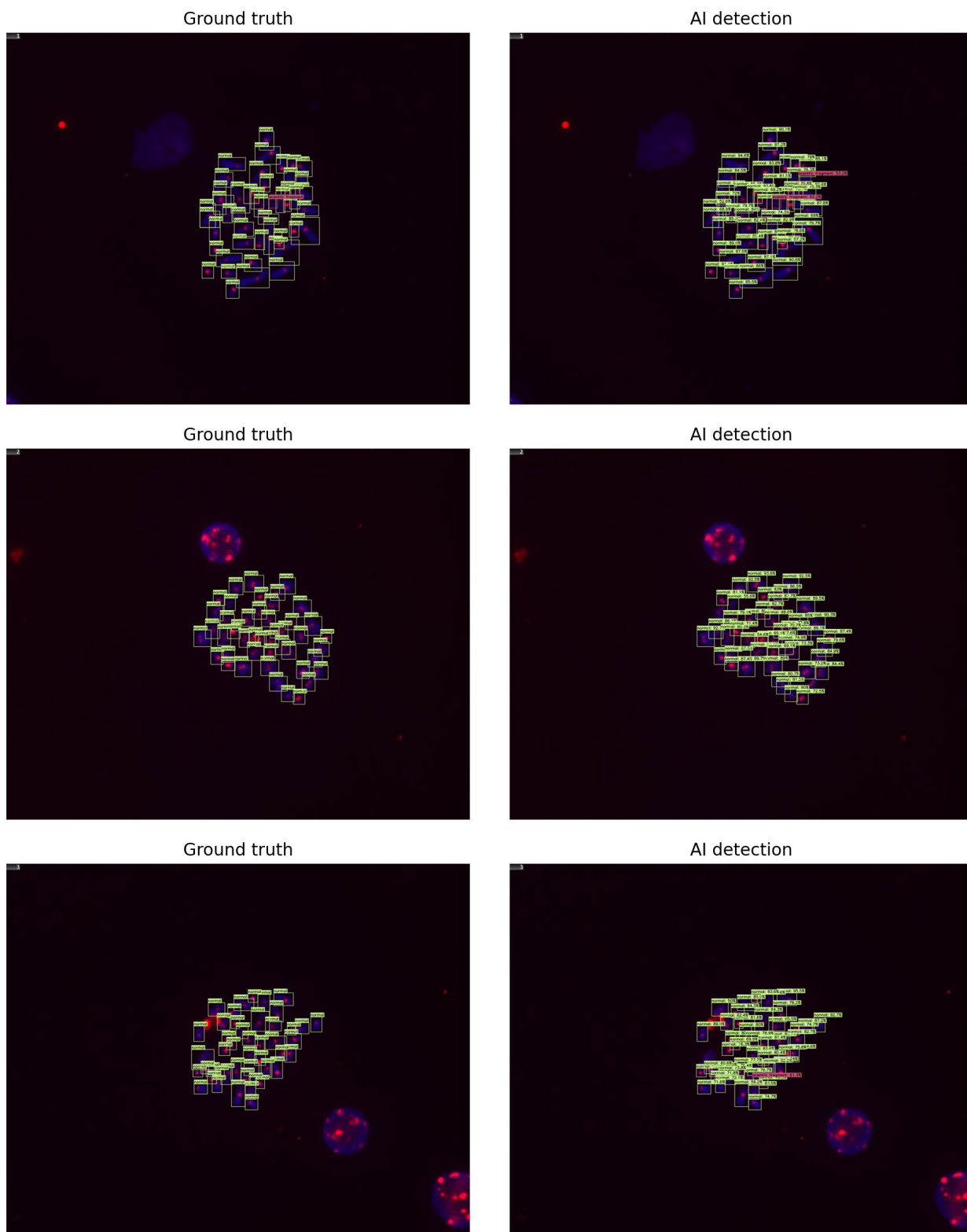
今後実施することが求められる施策

- 開発した AI アルゴリズムを簡便に実行するためのソフトウェア開発
 - 要件定義をもとに開発。完成後も改良・保守を継続する必要あり
- 顕微鏡画像取得システムの更新
 - 導入済みシステムも OS 更新程度のスパンで更新していく必要あり
- 人材開発及び教育
 - AI システム、画像共有システムやその周辺の最新技術等について高度被ばく医療センター人材等を教育する機会を設ける必要あり
- 染色体画像及び線量評価結果等の情報管理についての整理
 - 実施体制および AI アプリケーションの個人情報管理基準への適合性を検討
 - 他の線量情報(物理線量評価結果)、広域搬送時の患者情報の取り扱いなどの議論と合わせて検討すべき
- 各センター間の連携を強化する取り組み
 - 事故や患者の状態などの条件変化に対応した実施体制の検討、情報・技術の共有、それらを踏まえた上で検証のための演習訓練を実施すべき
 - 演習等結果のもとづくマニュアルの充実

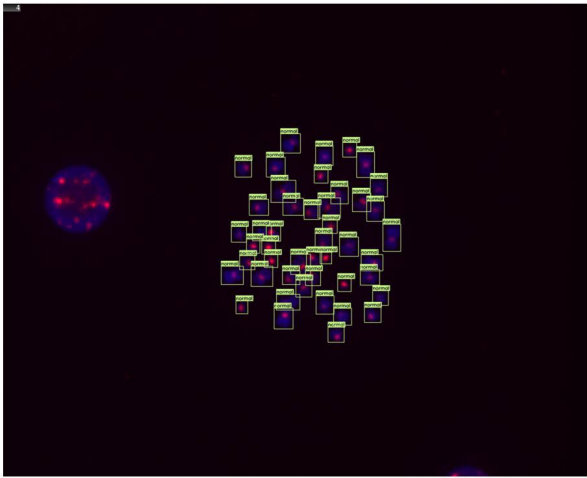
参考文献

- [1] 量研機構: 令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費「染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム(基本モデル)の開発」事業 年度末報告書(非公開版)
- [2] ISO 19238: Radiological Protection - Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics. Geneva: International Organization for Standardization (ISO) TC 85/SC 2; 2014.
- [3] Moriña D, Higuera M, Puig P, Ainsbury EA, Rothkamm K. Radir package: An R implementation for cytogenetic biodosimetry dose estimation. *Journal of Radiological Protection* 35: 557–569, 2015.
- [4] Suto Y, Hirai M, Akiyama M, Suzuki T, Sugiura N. Sensitive and Rapid Detection of Centromeric Alphoid DNA in Human Metaphase Chromosomes by PNA Fluorescence In Situ Hybridization and Its Application to Biological Radiation Dosimetry. *Cytologia* 77: 261-267, 2012.
- [5] GRCh38/hg38 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/grc/human>)
- [6] Suto Y, Hirai M, Akiyama M, Kobashi G, Itokawa M, Akashi M, Sugiura N. Biodosimetry of restoration workers for Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Health Physics* 105: 366-373, 2013.

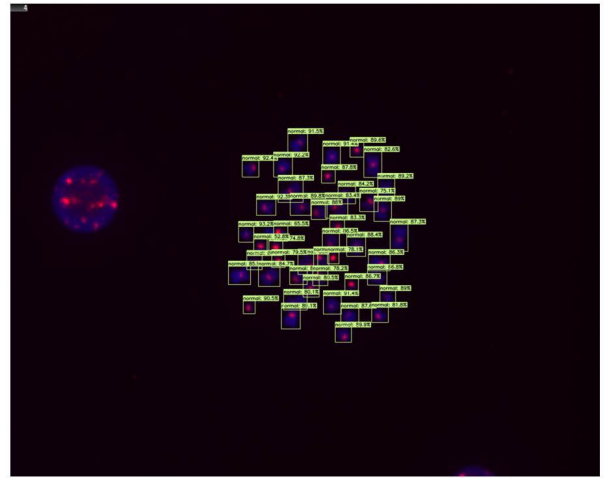
補足資料： 現有 AI モデルによる 48 時間コルセミド処理標本由来の画像の染色体検出・分類の結果（詳細個別事例）



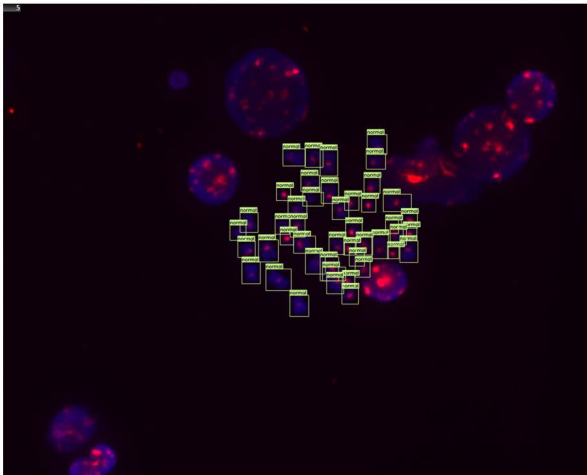
Ground truth



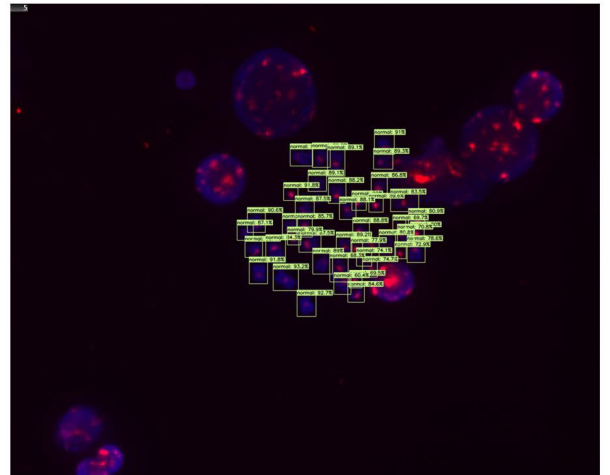
AI detection



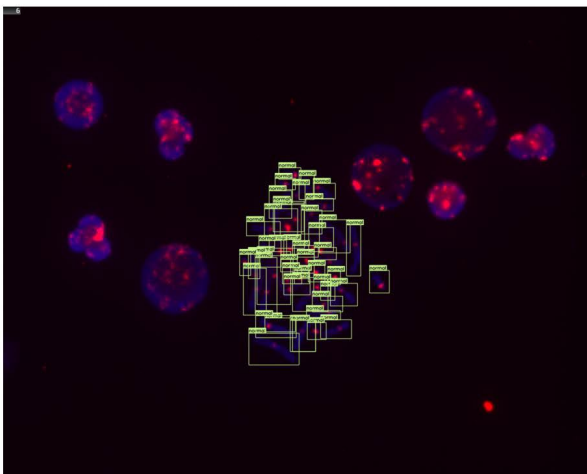
Ground truth



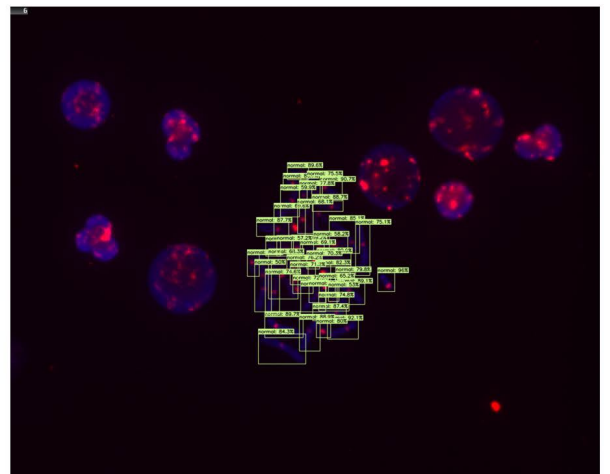
AI detection



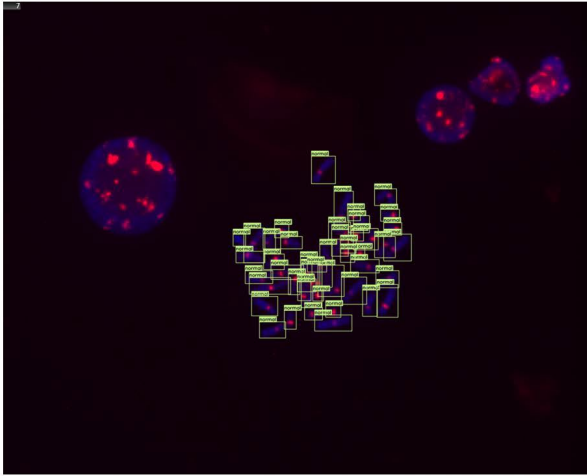
Ground truth



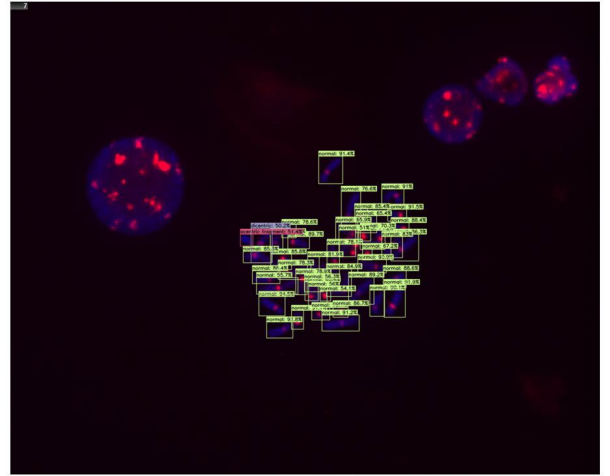
AI detection



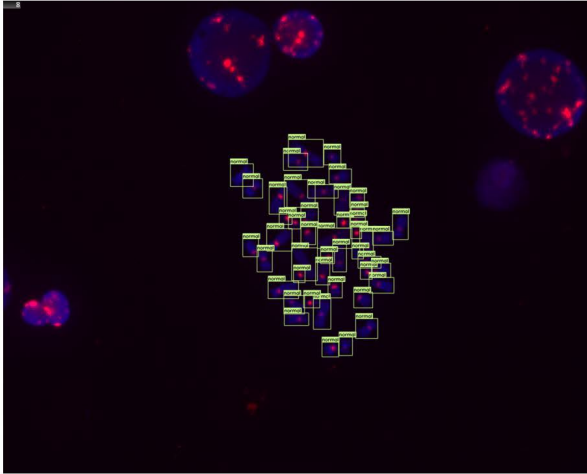
Ground truth



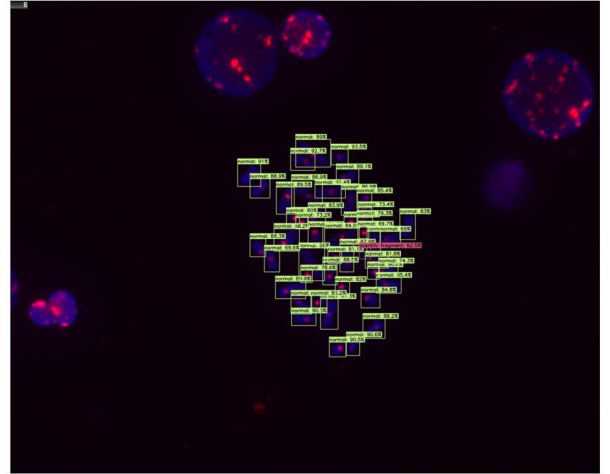
AI detection



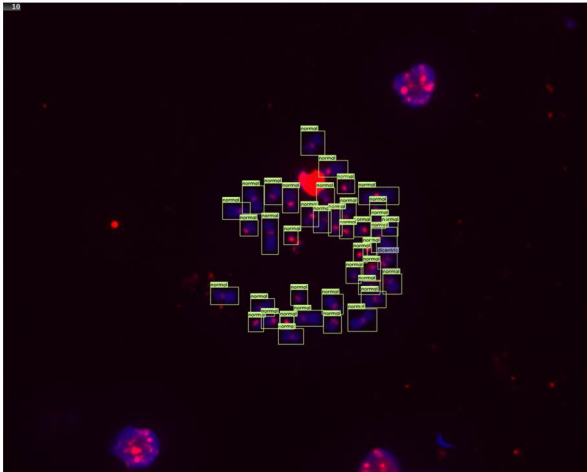
Ground truth



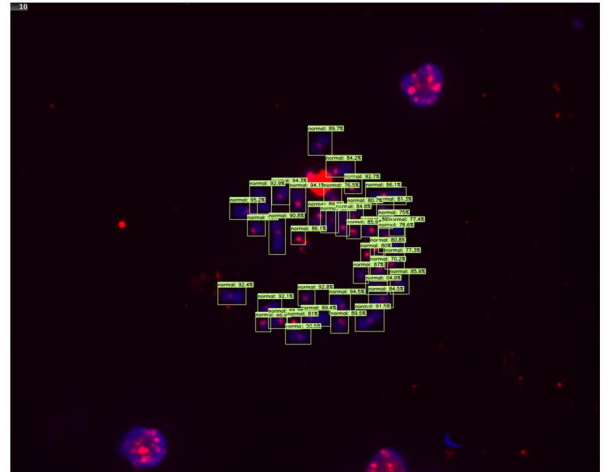
AI detection



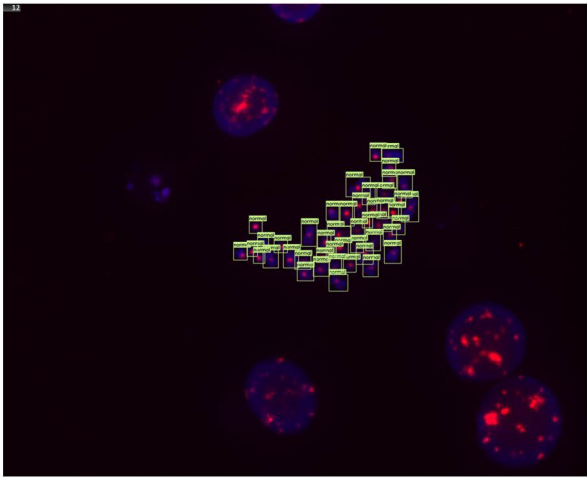
Ground truth



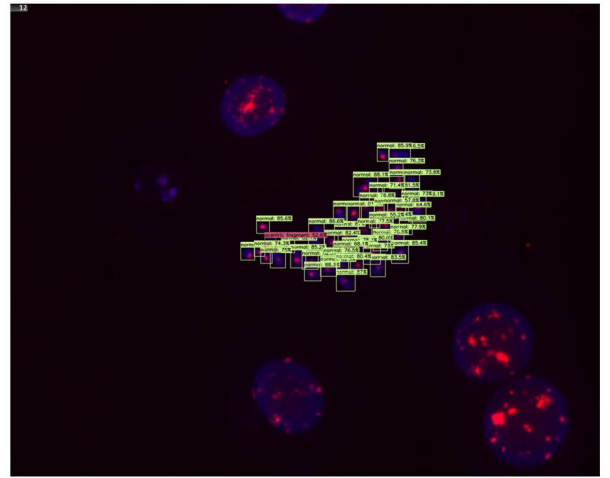
AI detection



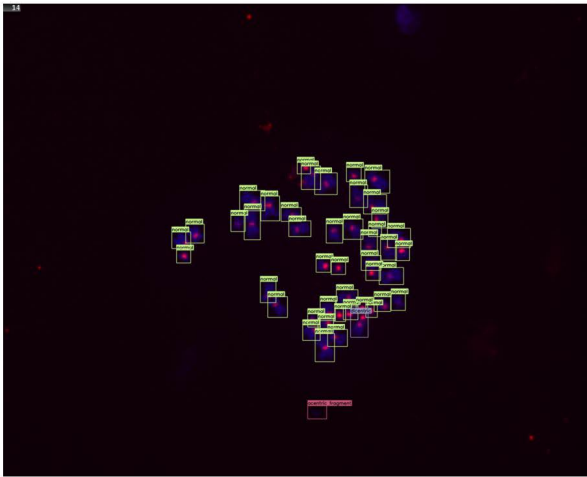
Ground truth



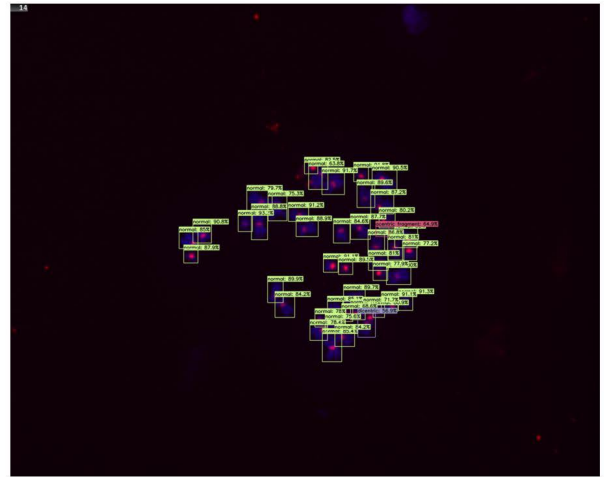
AI detection



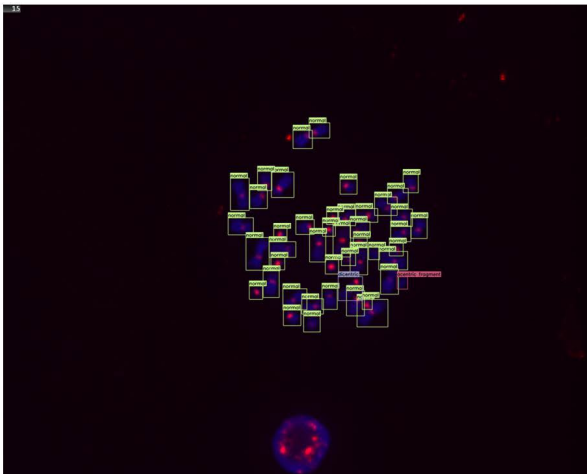
Ground truth



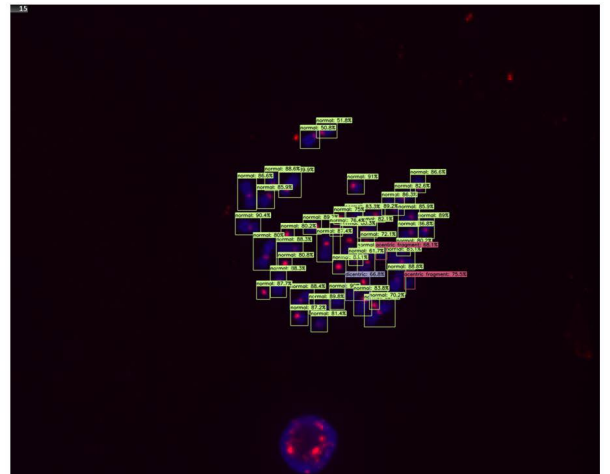
AI detection



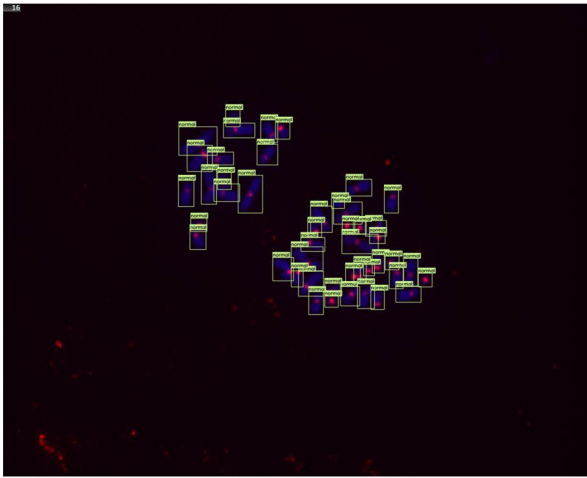
Ground truth



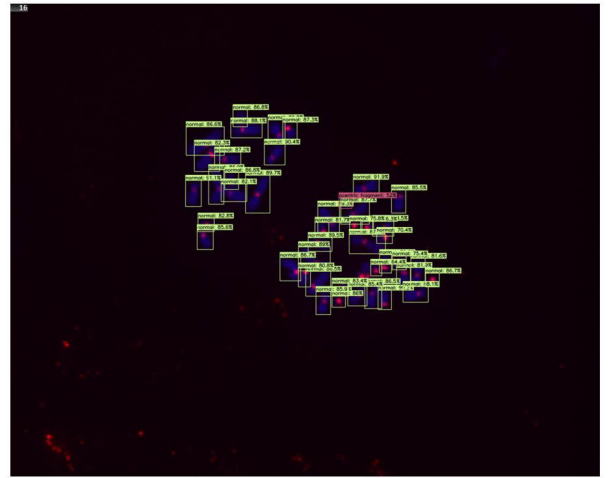
AI detection



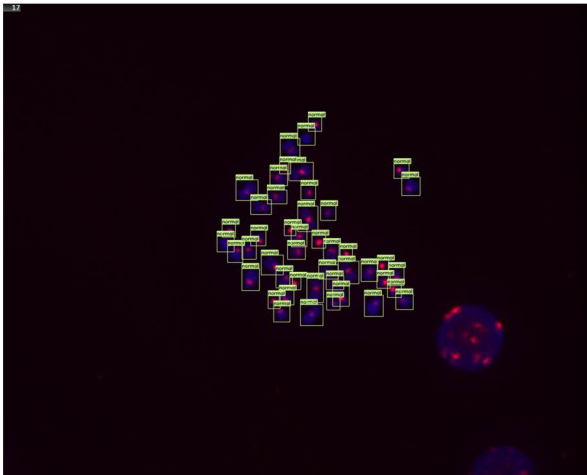
Ground truth



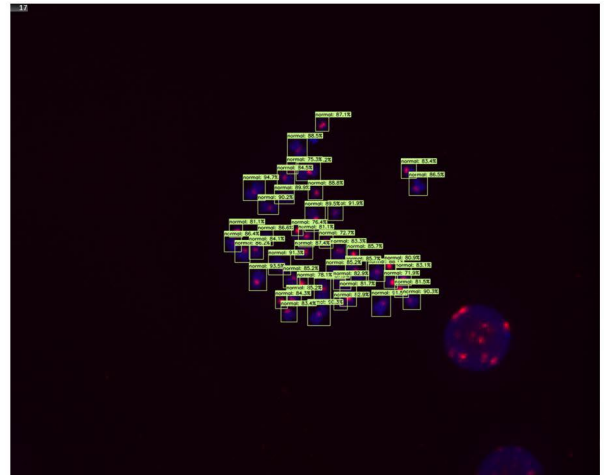
AI detection



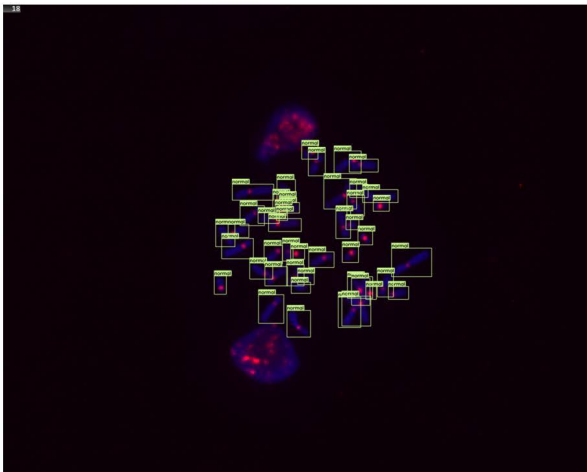
Ground truth



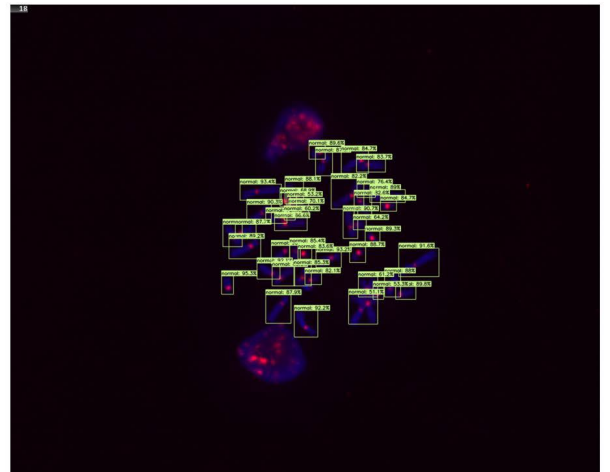
AI detection



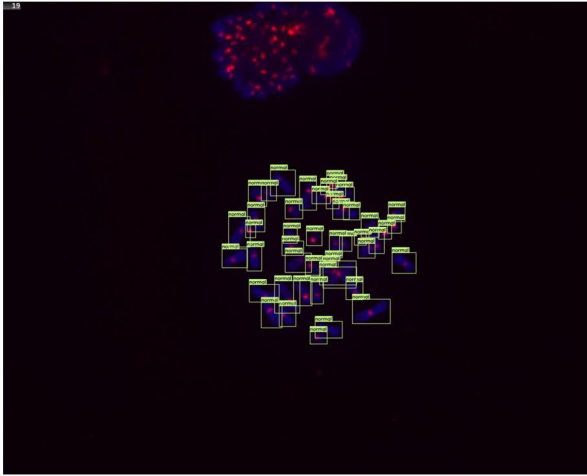
Ground truth



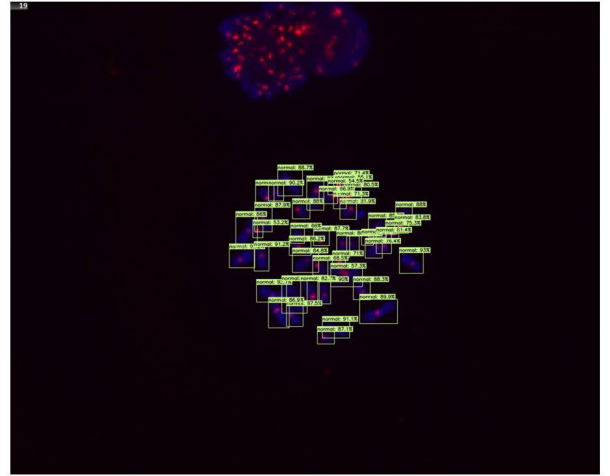
AI detection



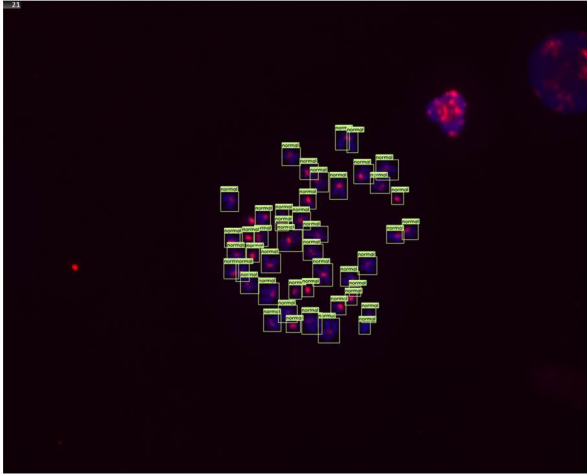
Ground truth



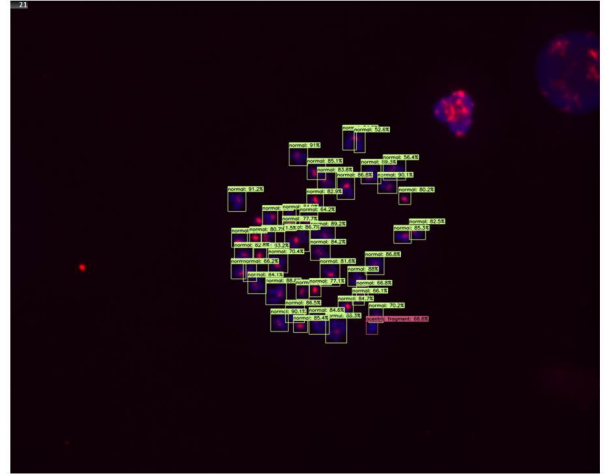
AI detection



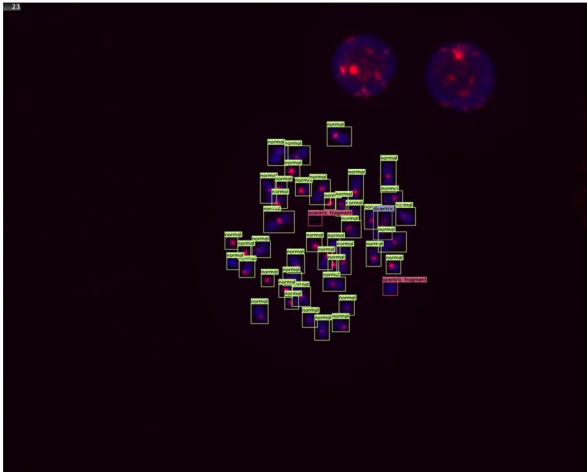
Ground truth



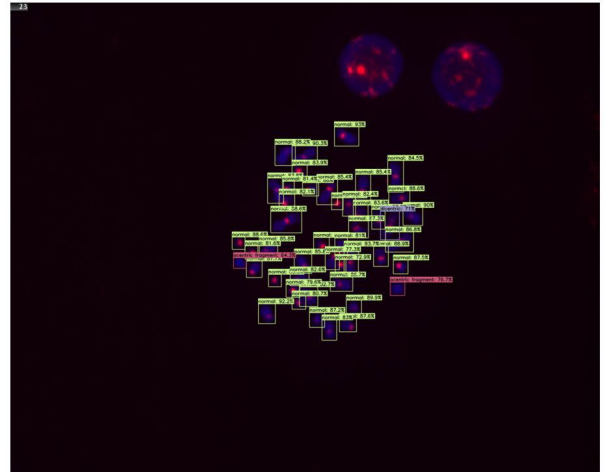
AI detection



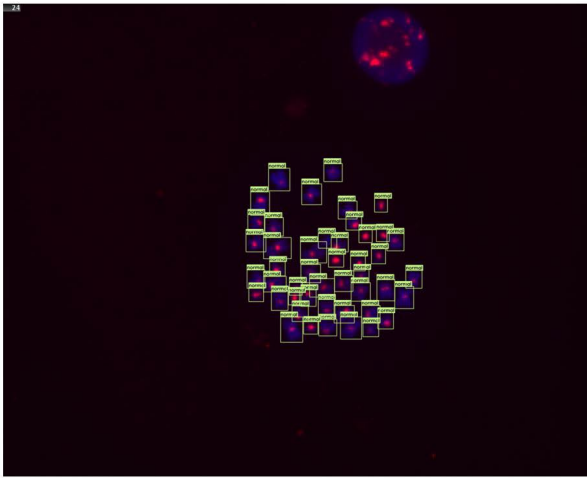
Ground truth



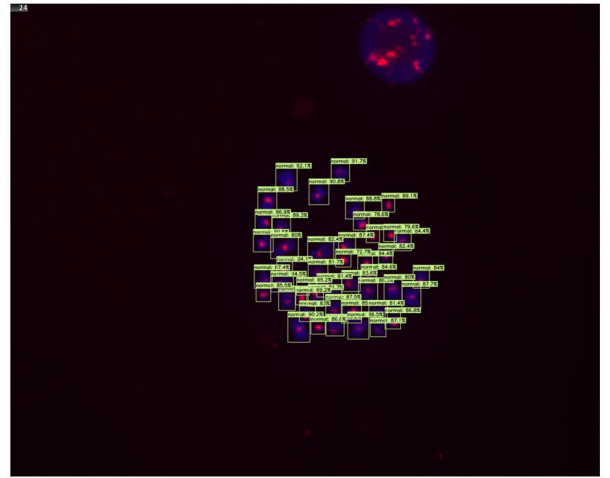
AI detection



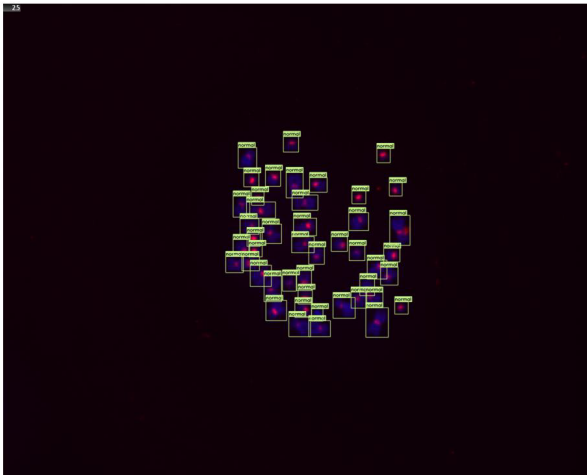
Ground truth



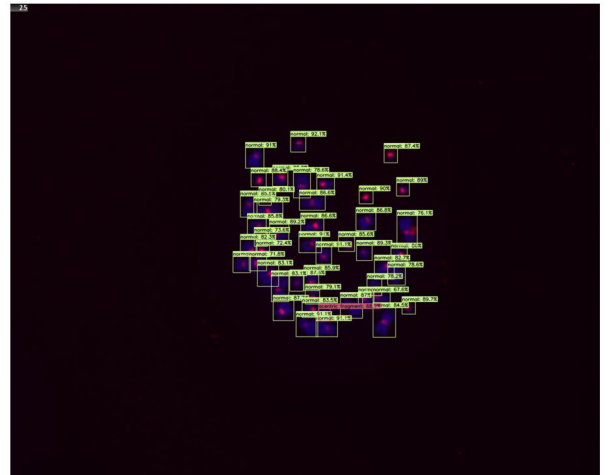
AI detection



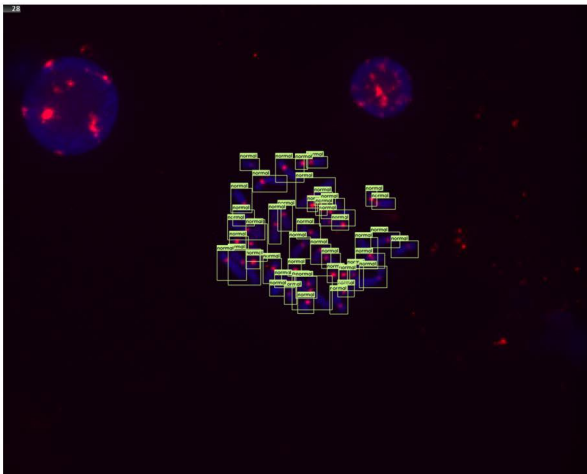
Ground truth



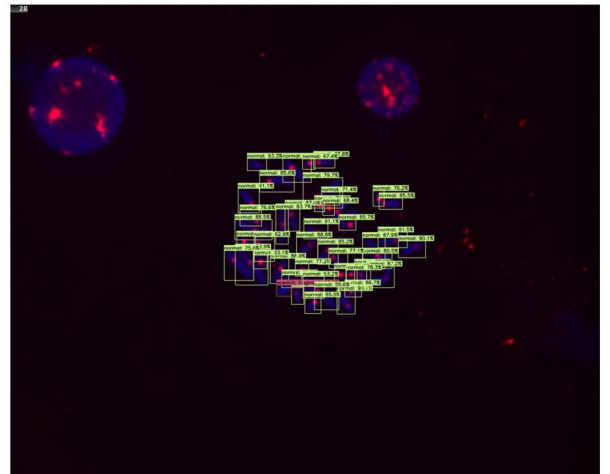
AI detection



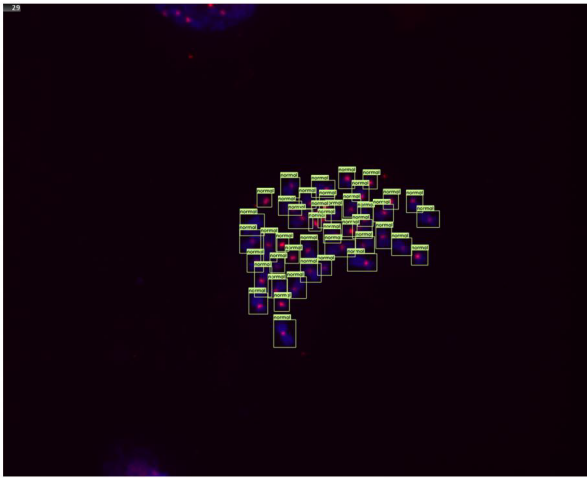
Ground truth



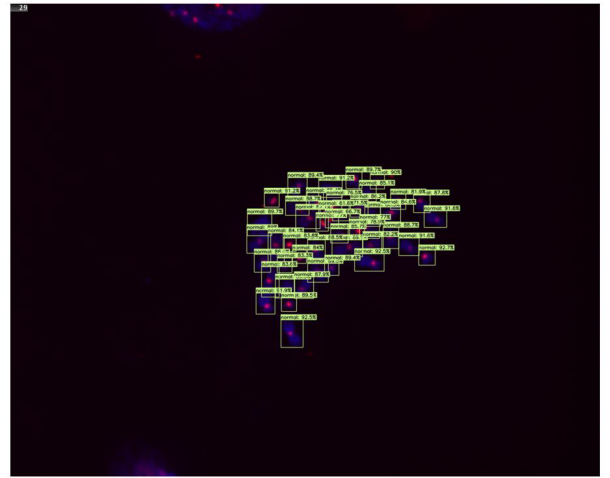
AI detection



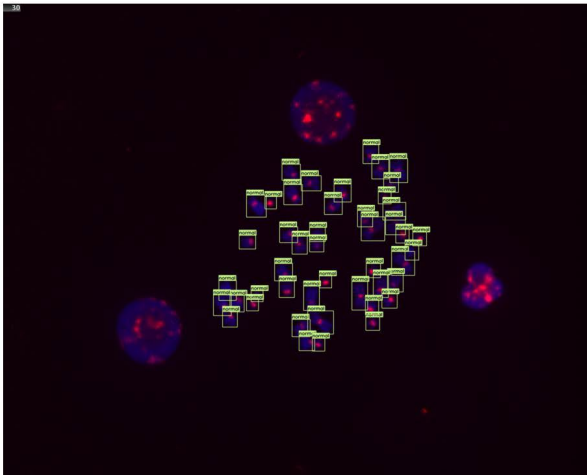
Ground truth



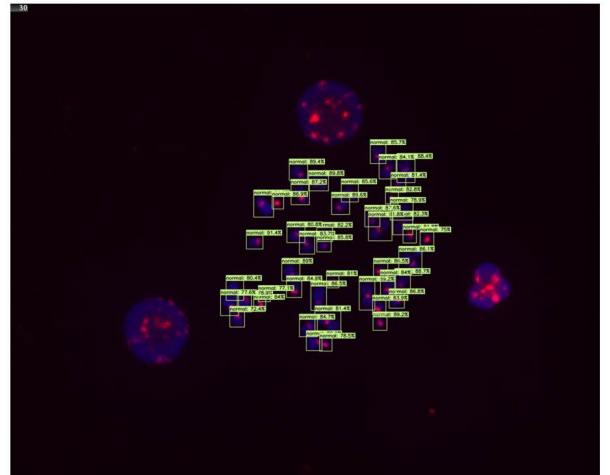
AI detection



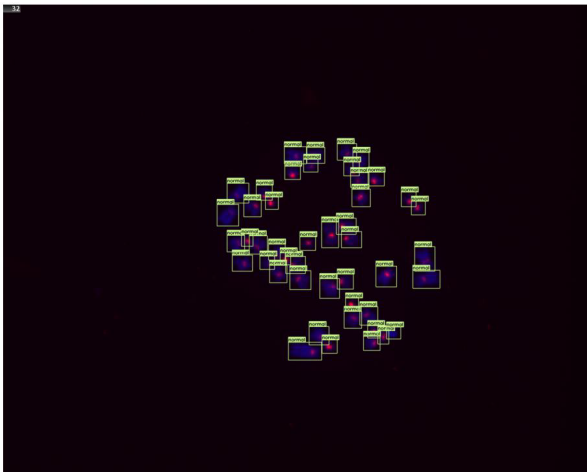
Ground truth



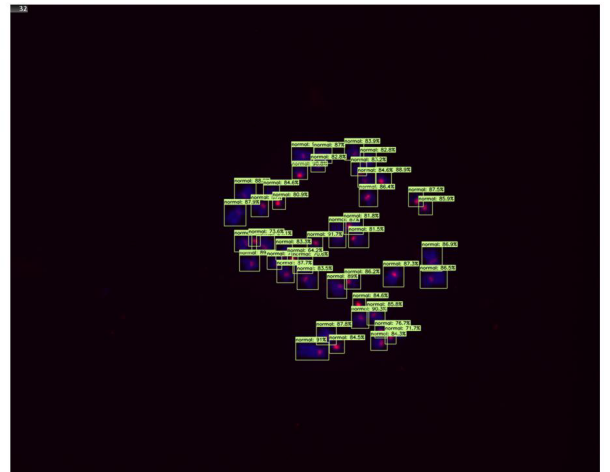
AI detection



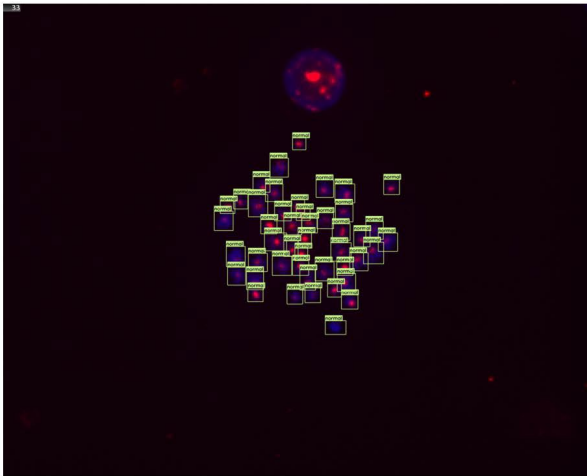
Ground truth



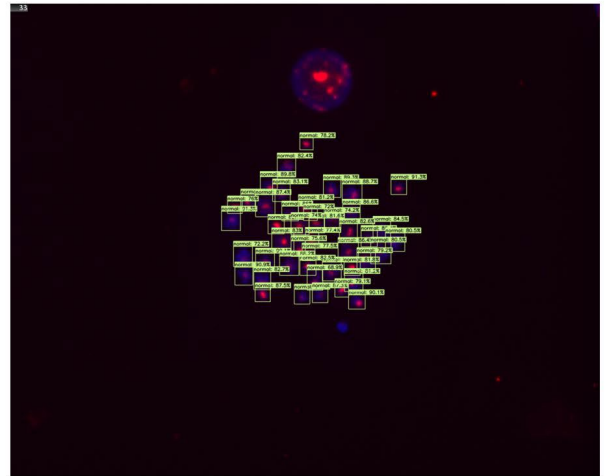
AI detection



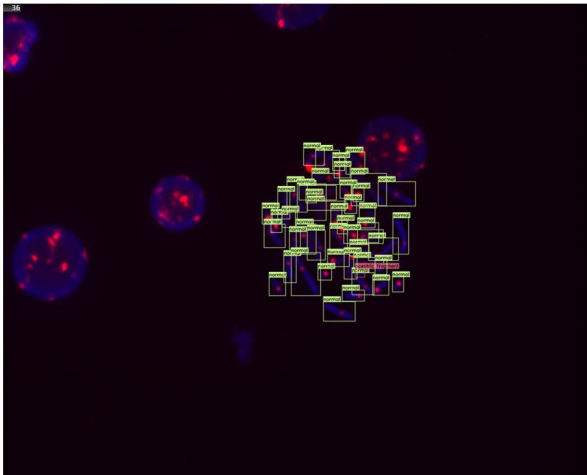
Ground truth



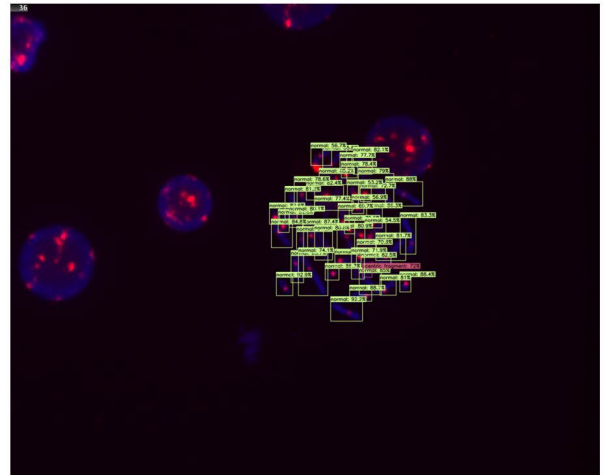
AI detection



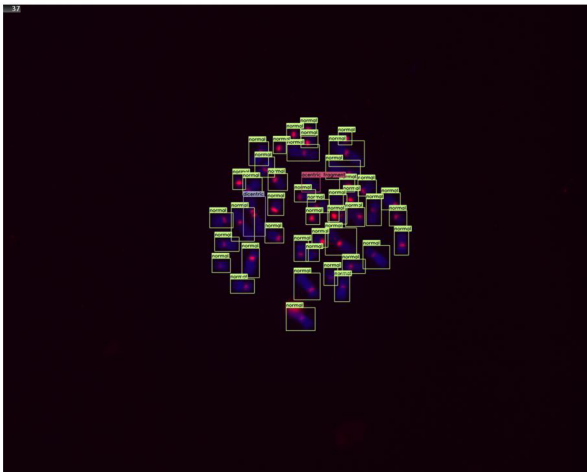
Ground truth



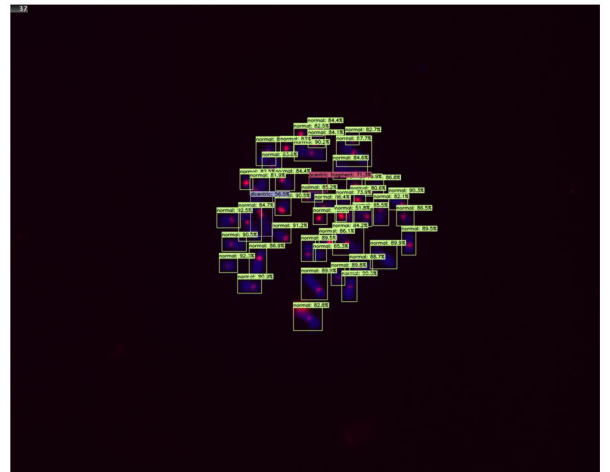
AI detection



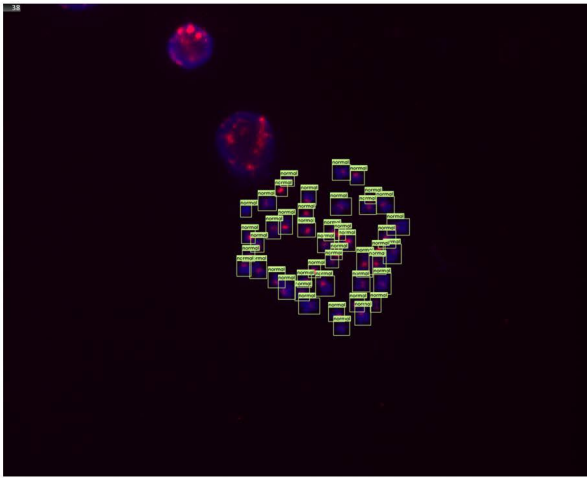
Ground truth



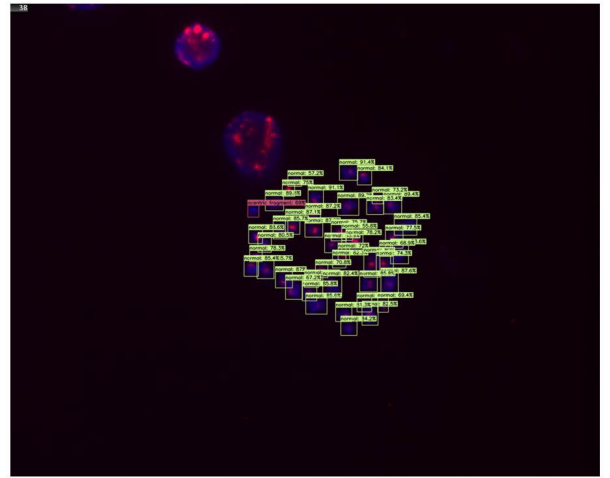
AI detection



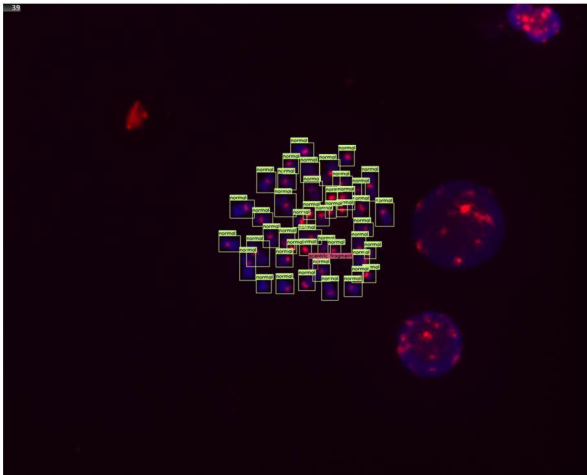
Ground truth



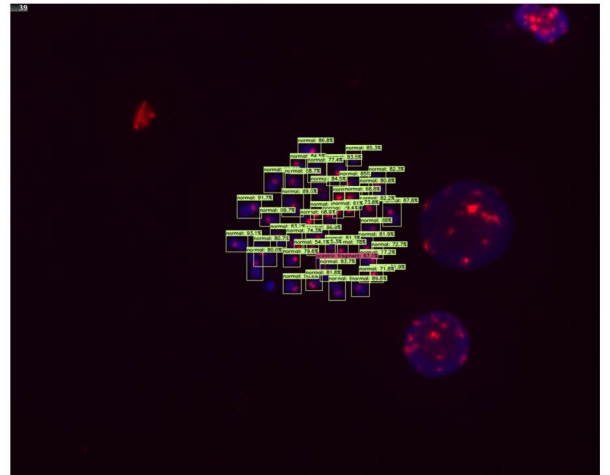
AI detection



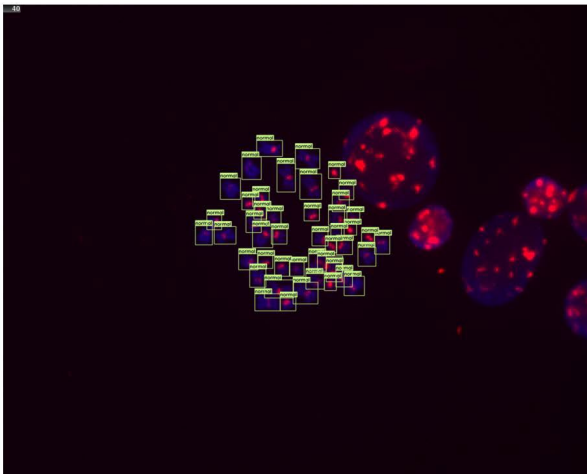
Ground truth



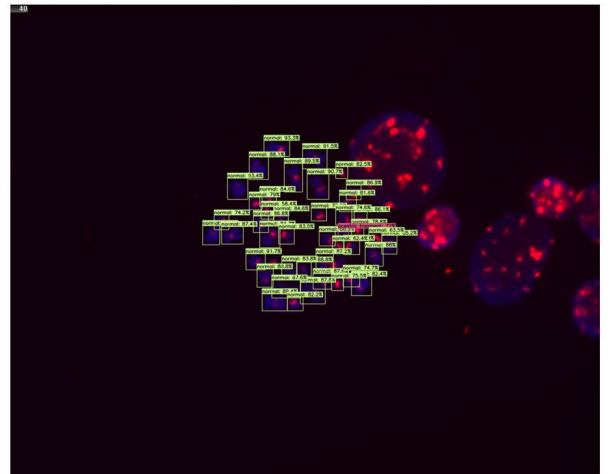
AI detection



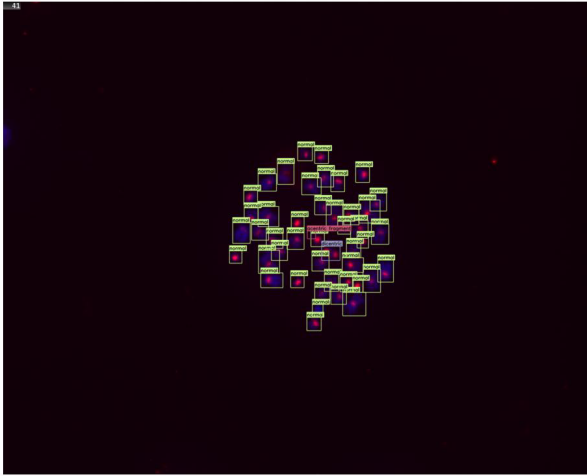
Ground truth



AI detection



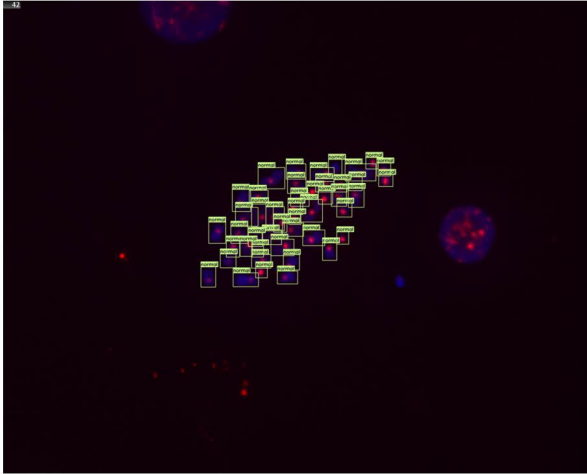
Ground truth



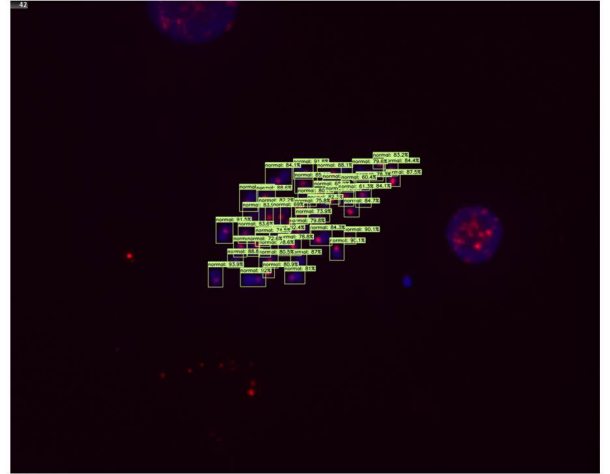
AI detection



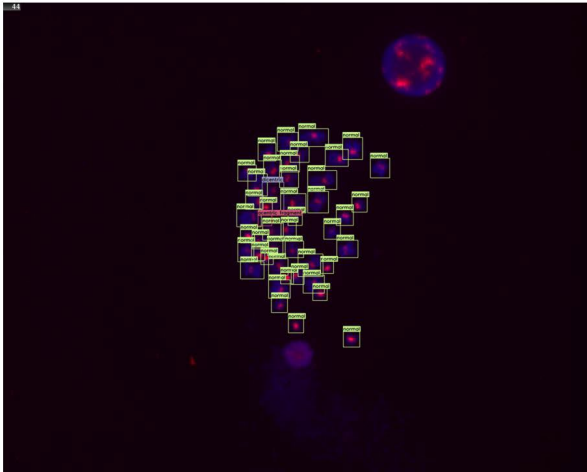
Ground truth



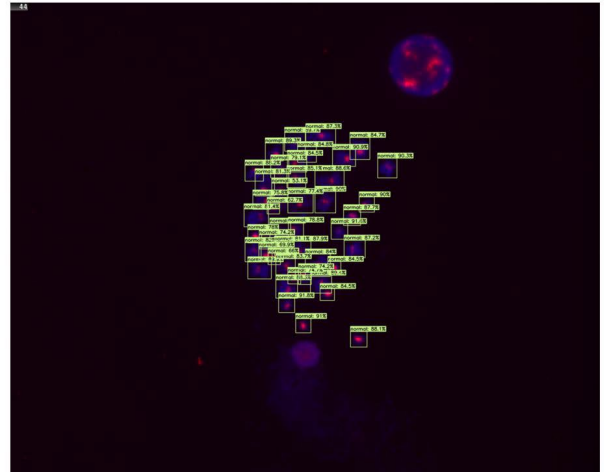
AI detection



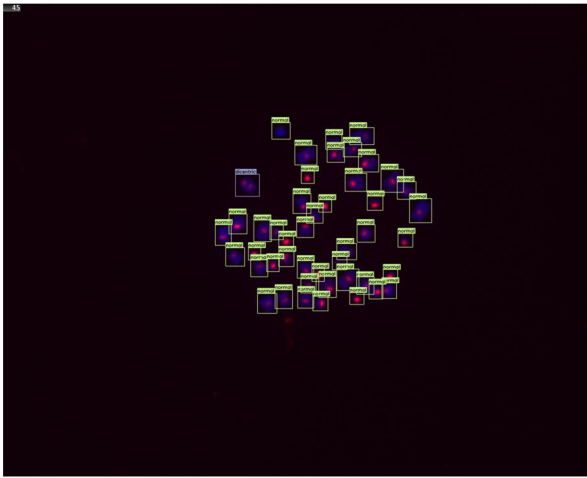
Ground truth



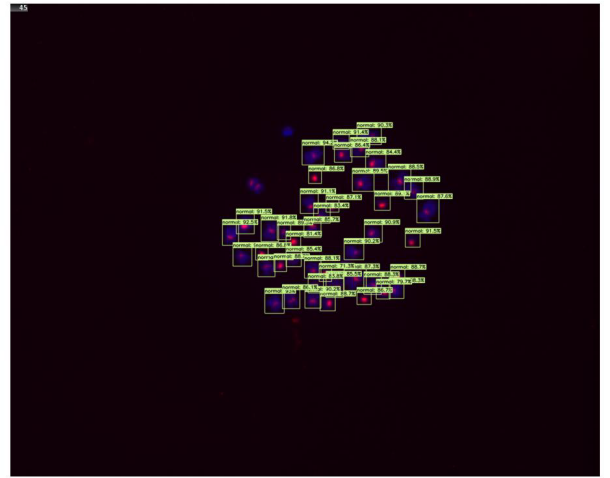
AI detection



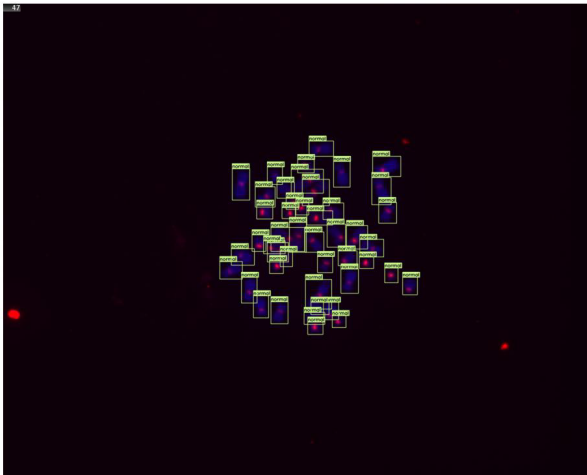
Ground truth



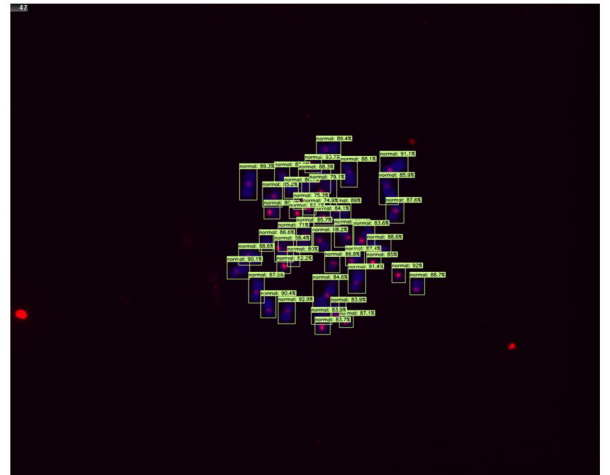
AI detection



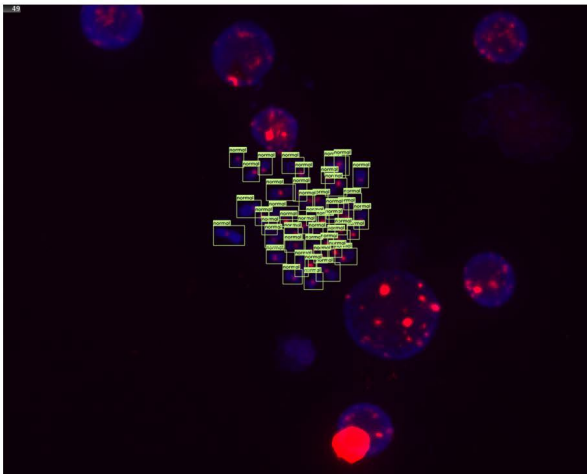
Ground truth



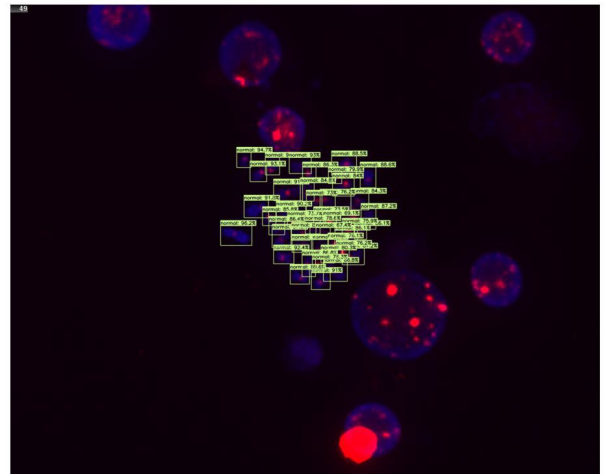
AI detection



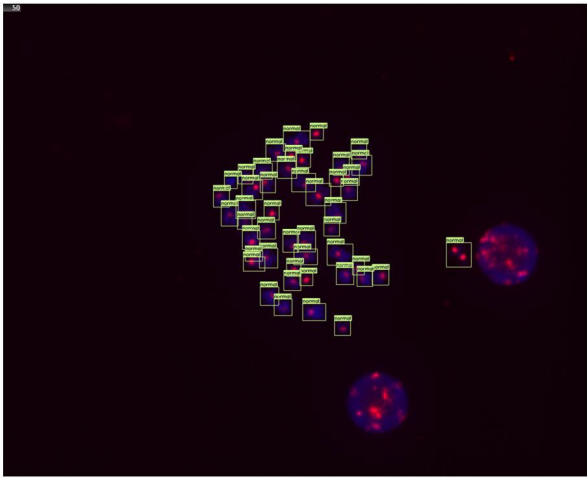
Ground truth



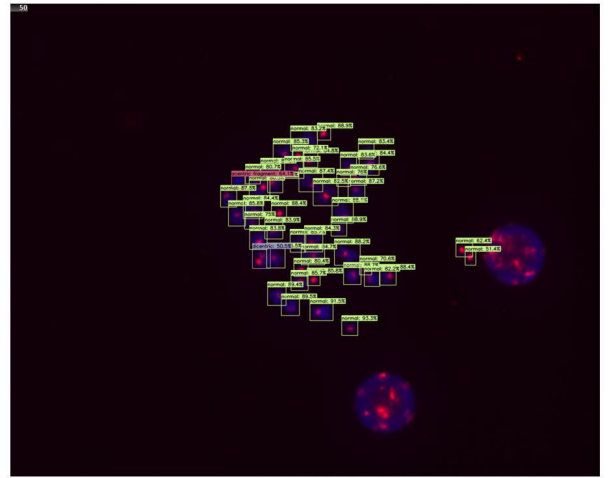
AI detection



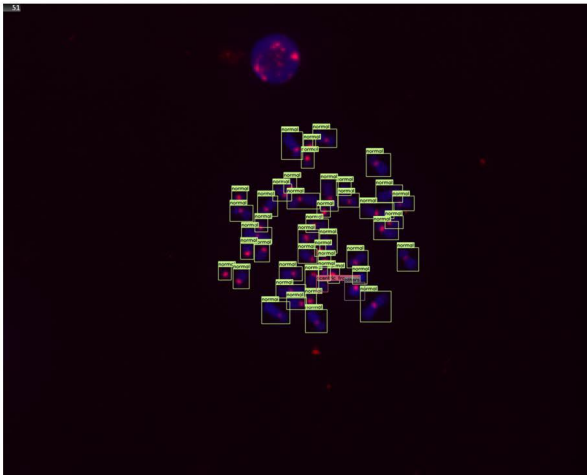
Ground truth



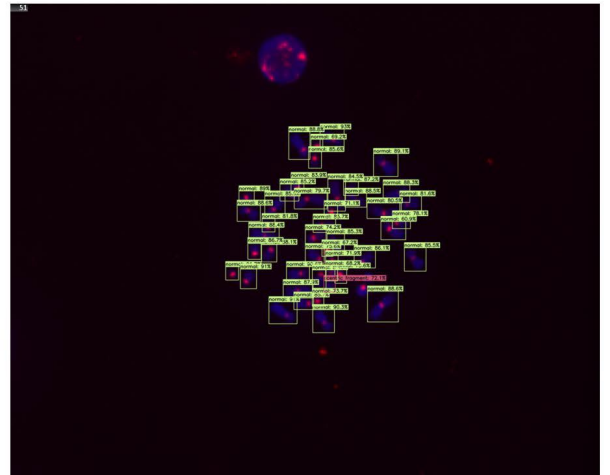
AI detection



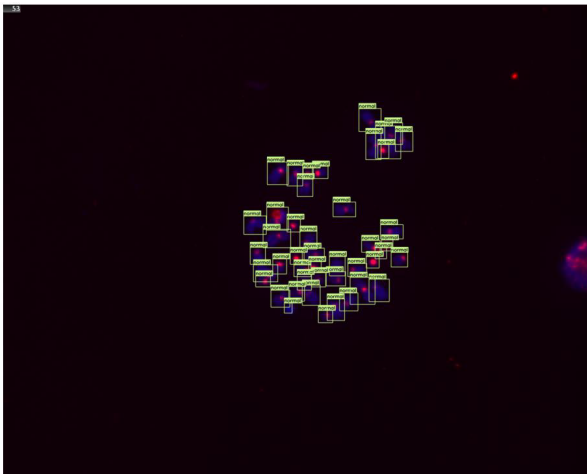
Ground truth



AI detection



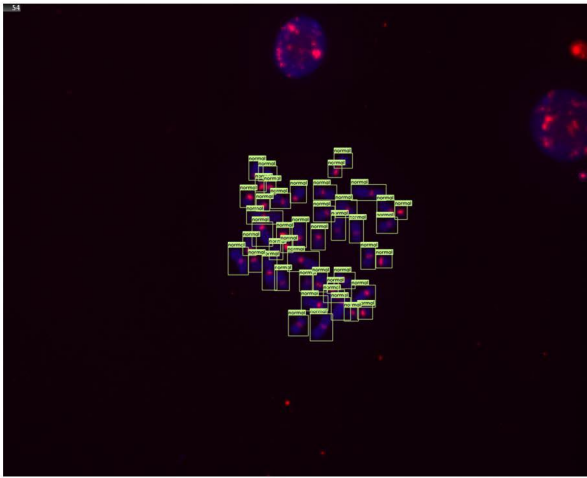
Ground truth



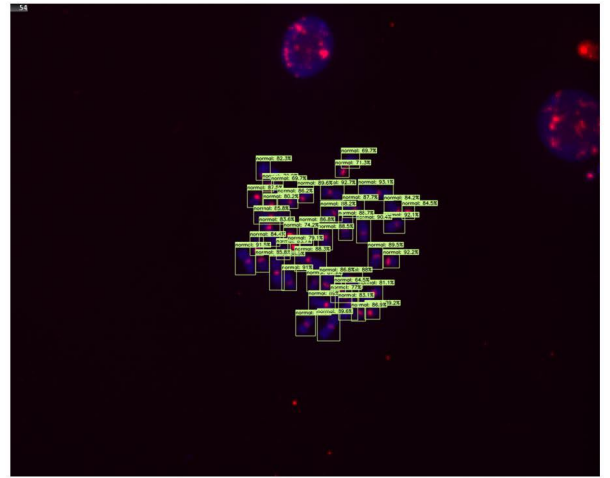
AI detection



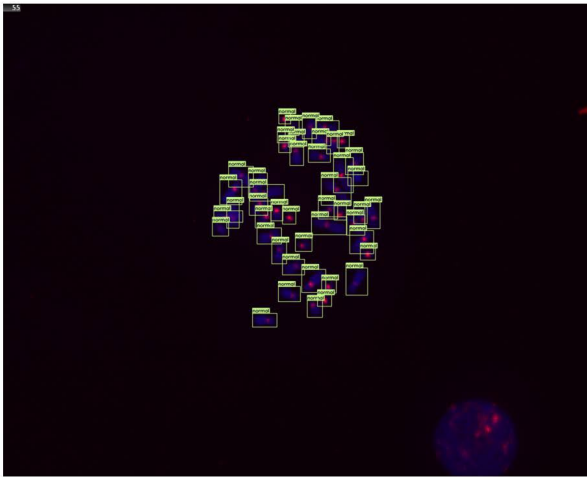
Ground truth



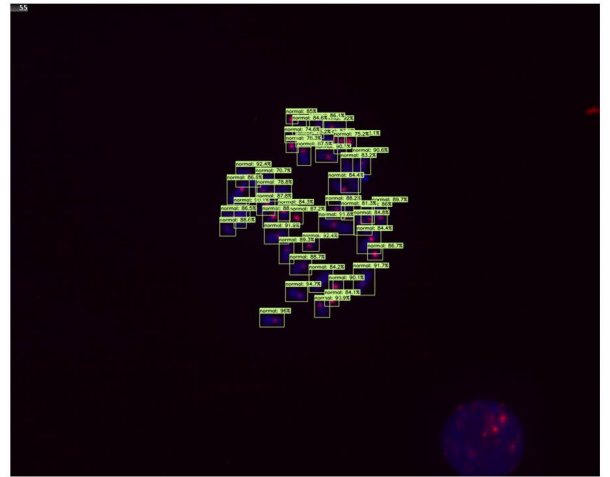
AI detection



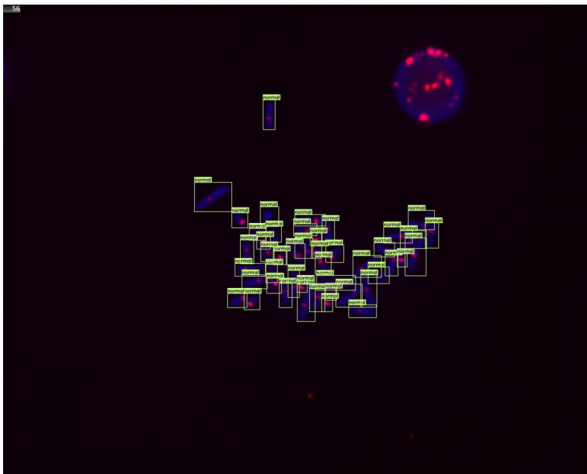
Ground truth



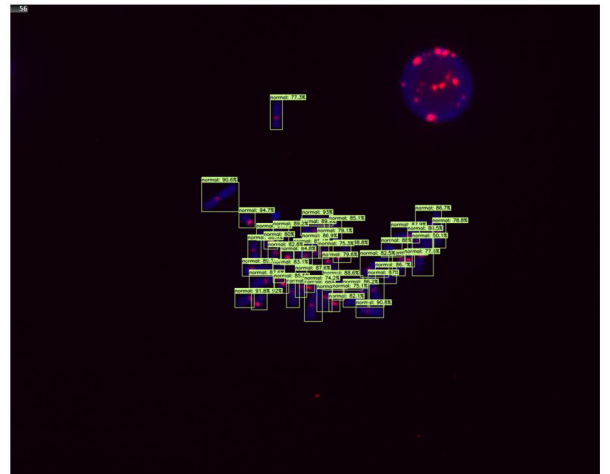
AI detection



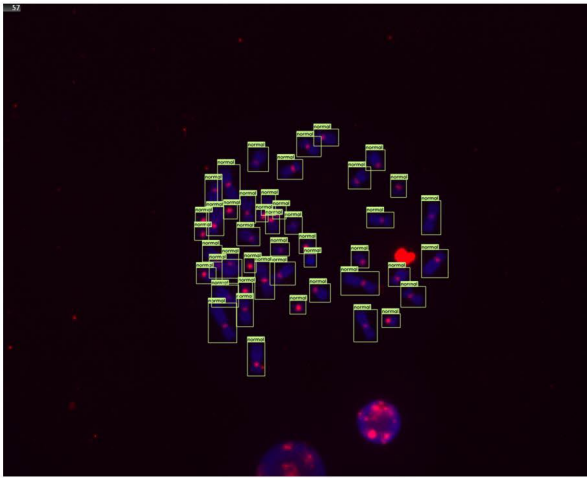
Ground truth



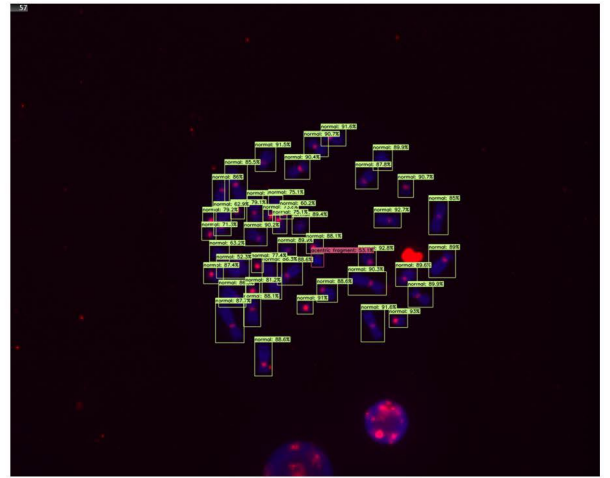
AI detection



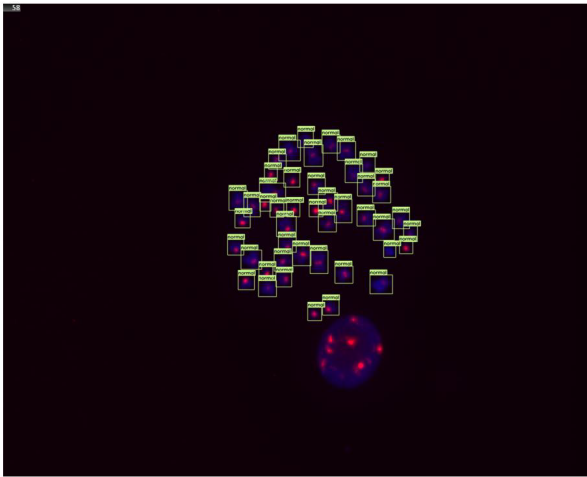
Ground truth



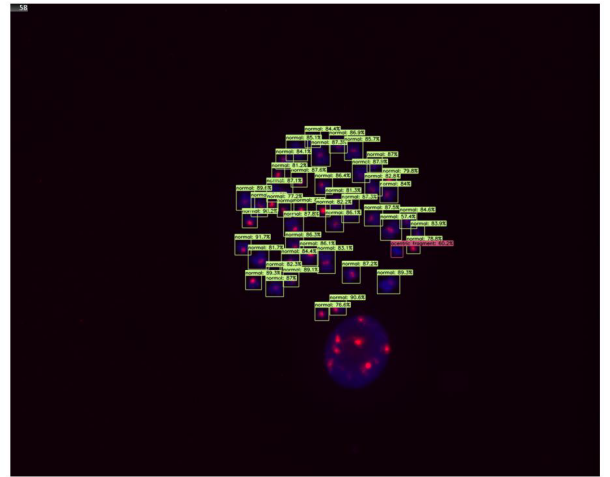
AI detection



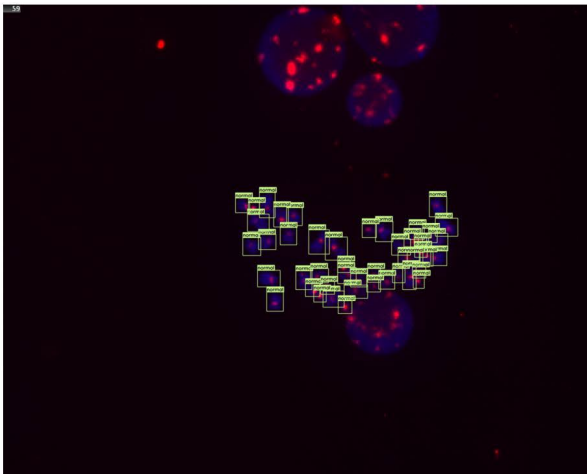
Ground truth



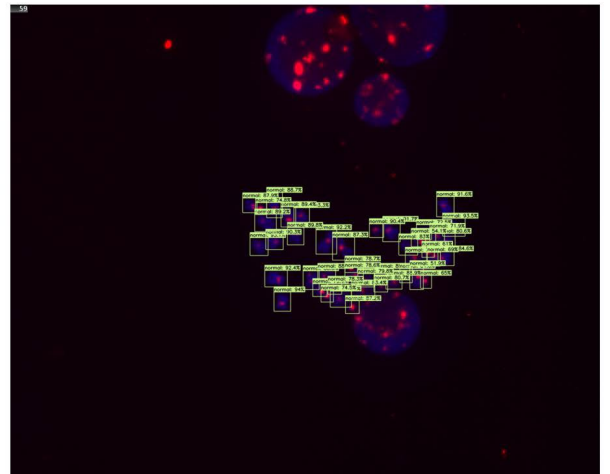
AI detection



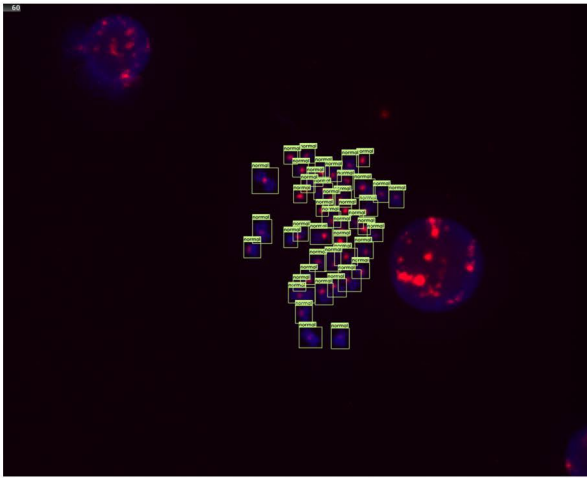
Ground truth



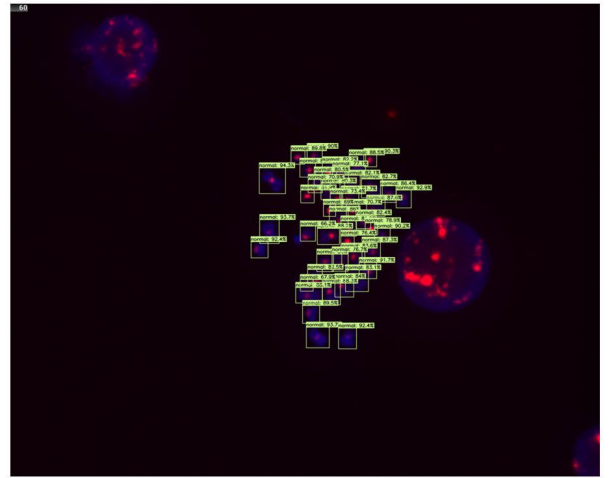
AI detection



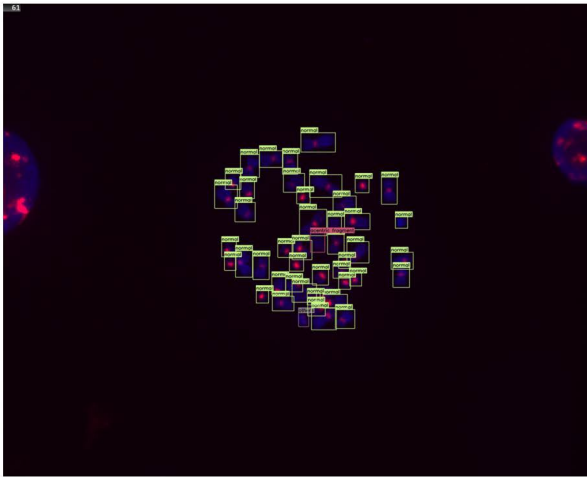
Ground truth



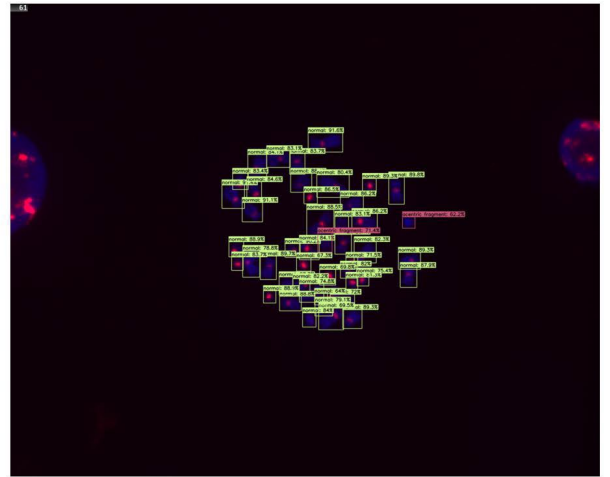
AI detection



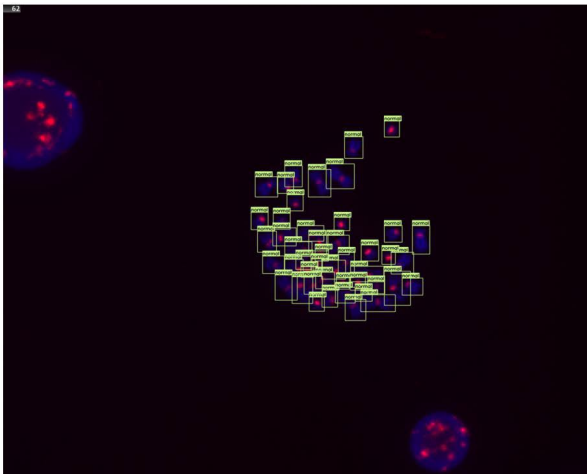
Ground truth



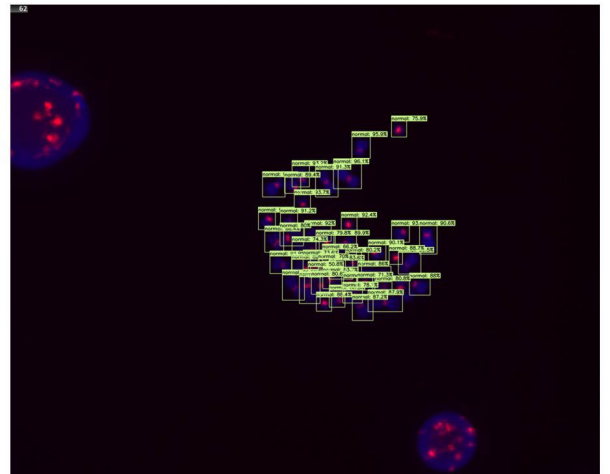
AI detection



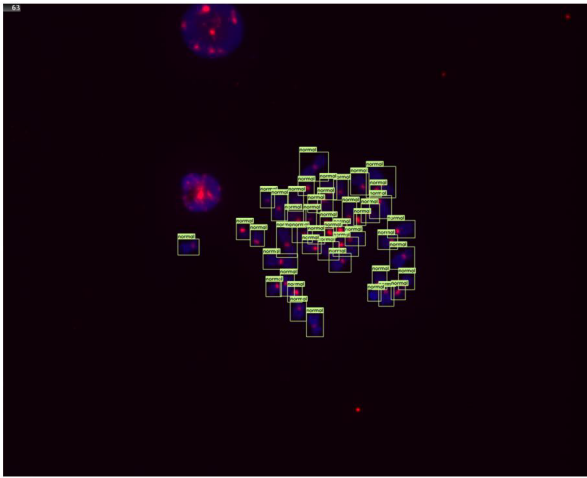
Ground truth



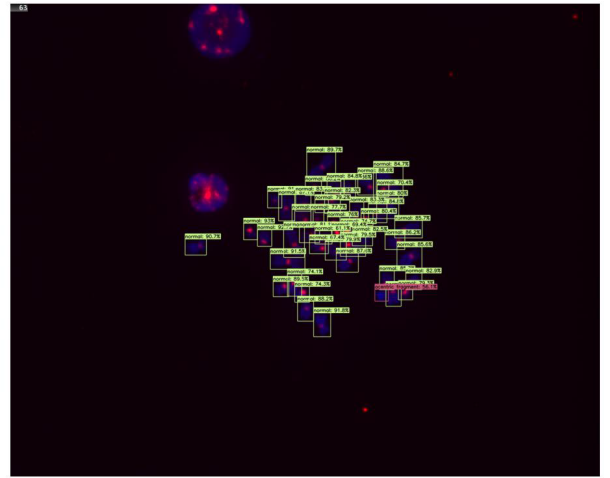
AI detection



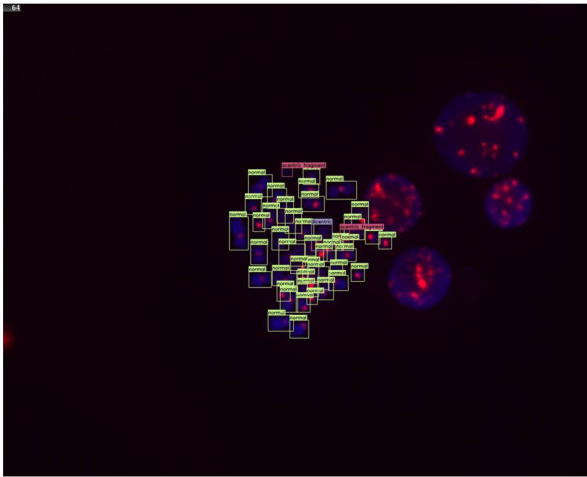
Ground truth



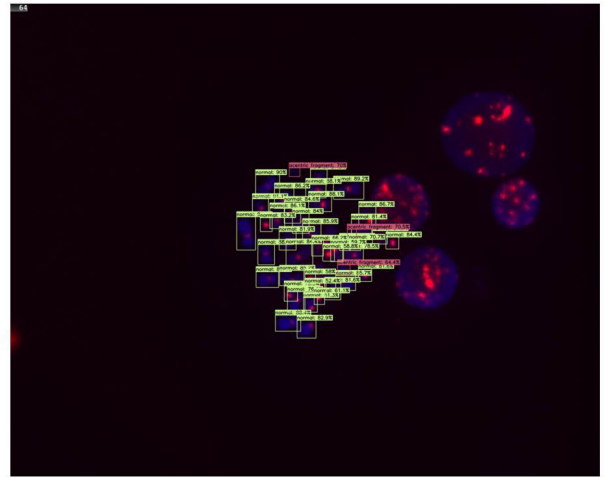
AI detection



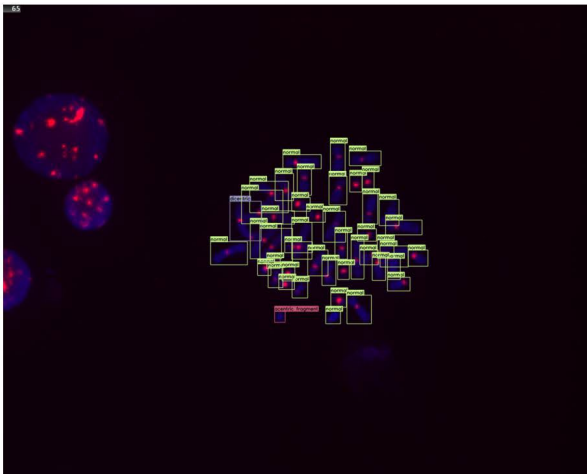
Ground truth



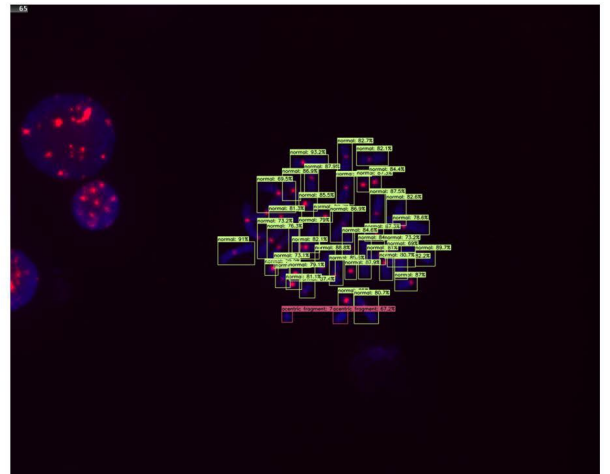
AI detection



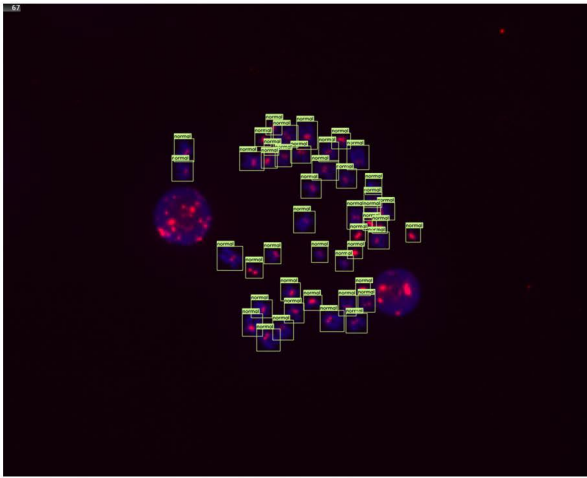
Ground truth



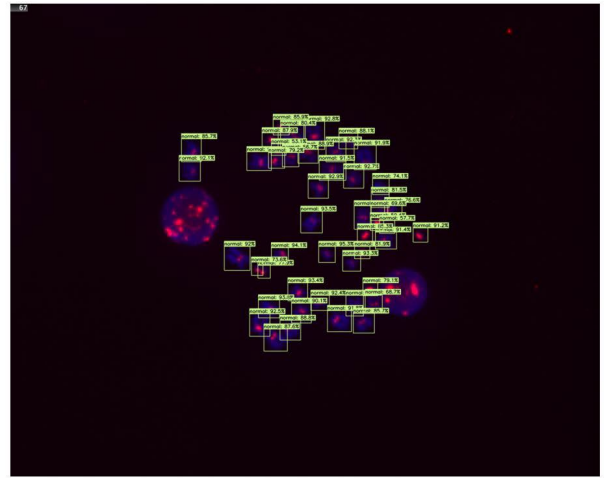
AI detection



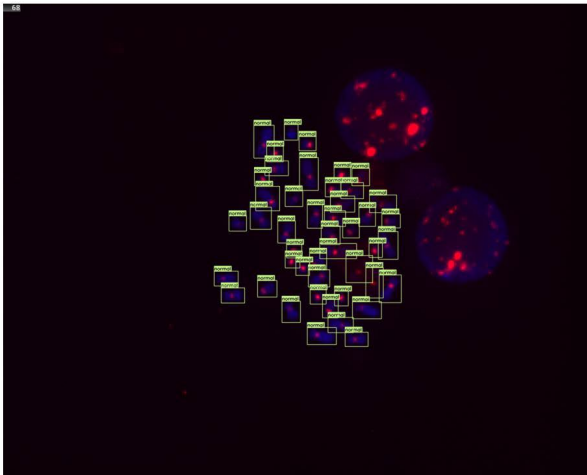
Ground truth



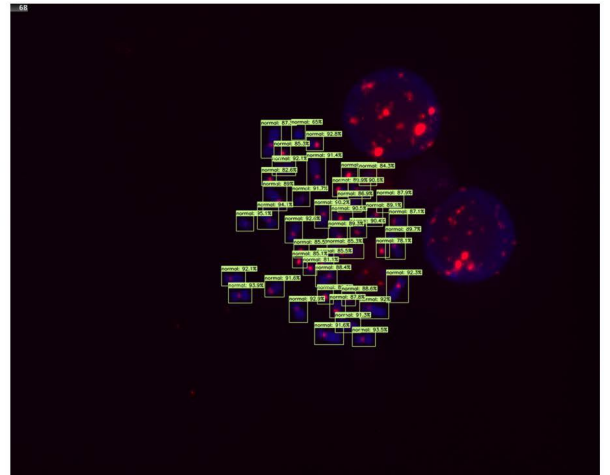
AI detection



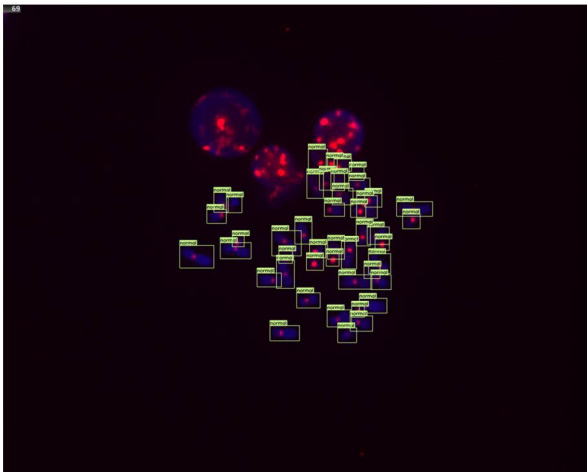
Ground truth



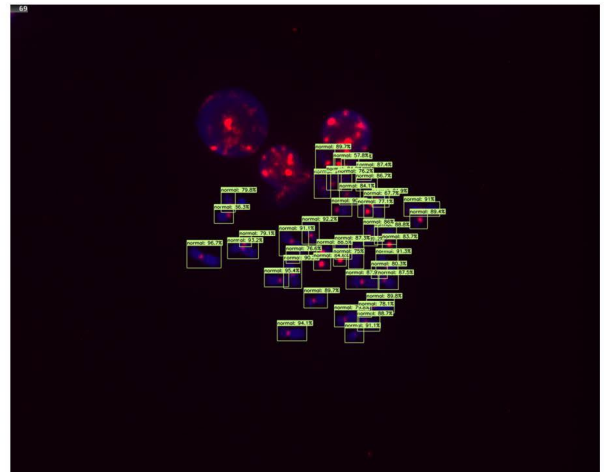
AI detection



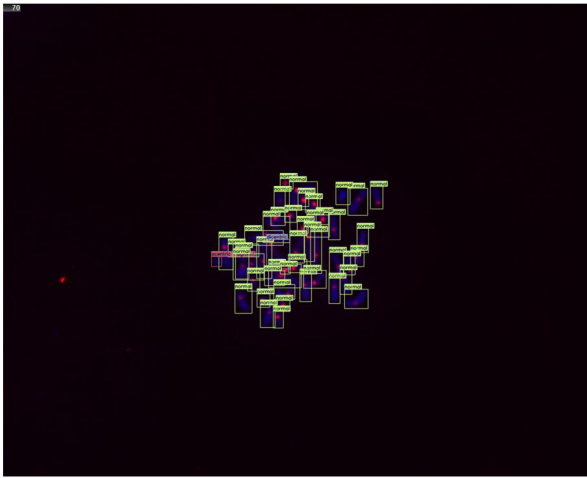
Ground truth



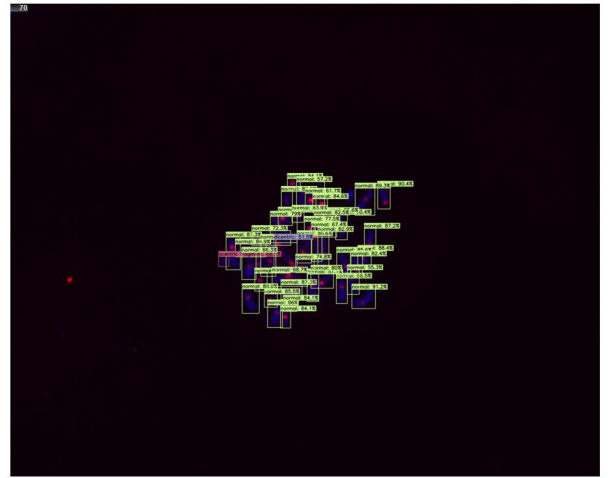
AI detection



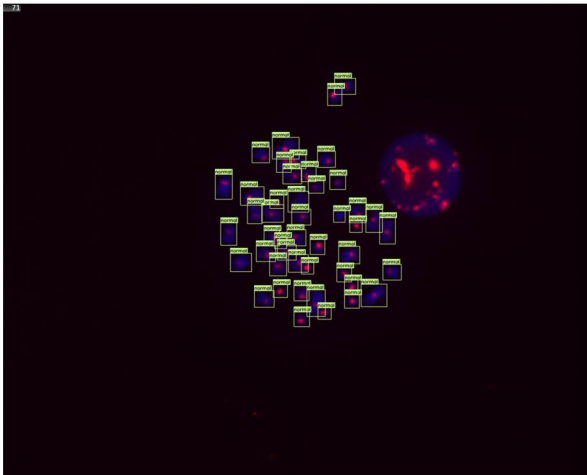
Ground truth



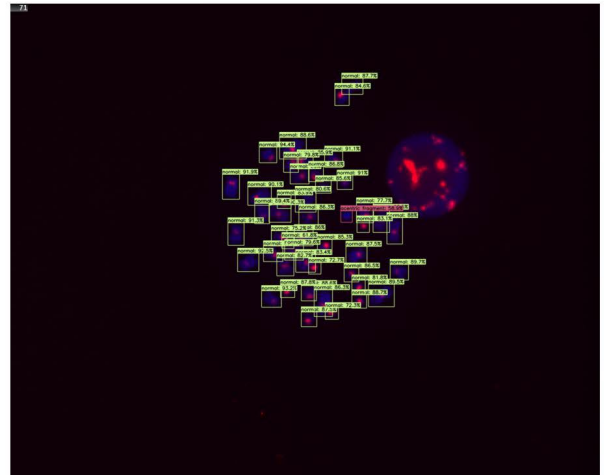
AI detection



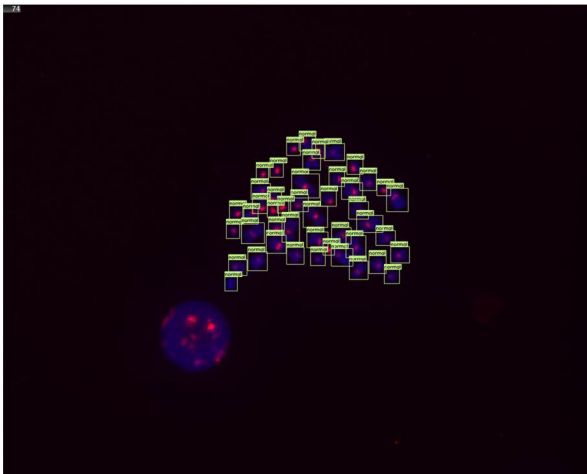
Ground truth



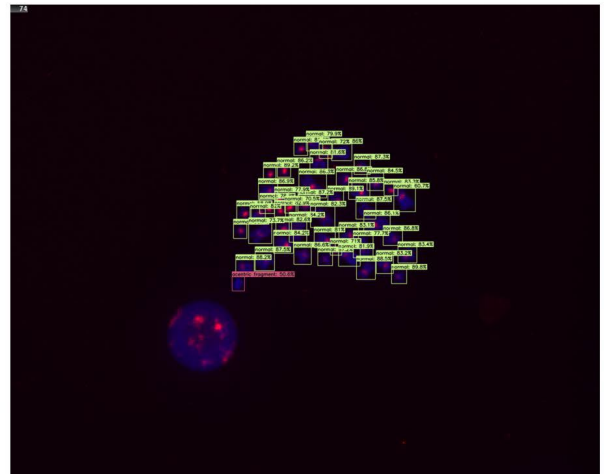
AI detection



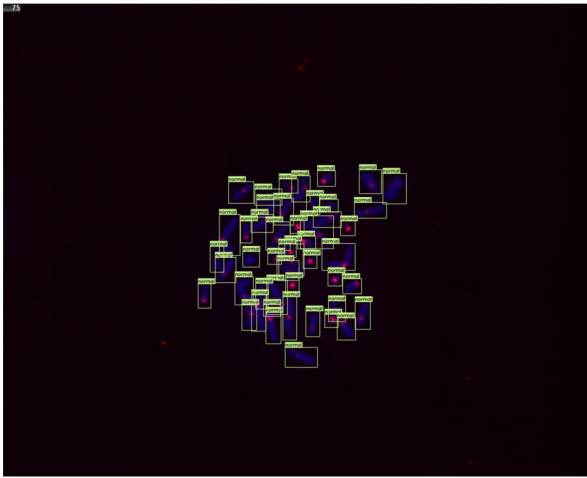
Ground truth



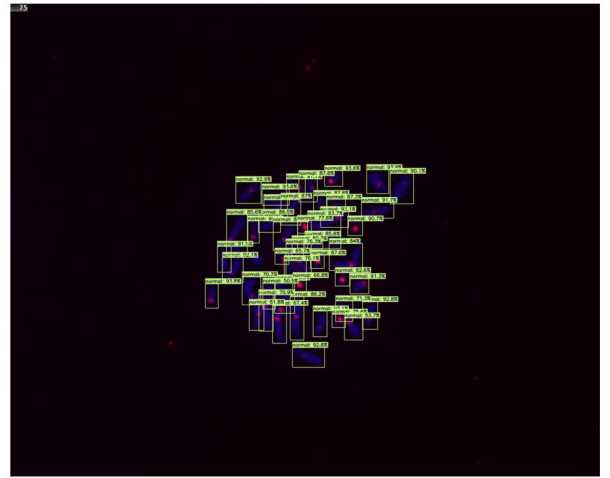
AI detection



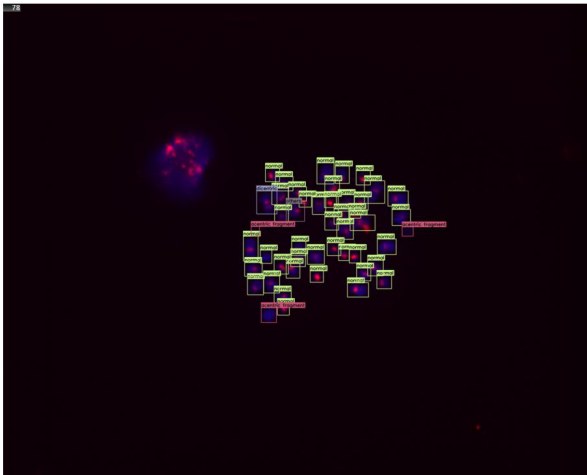
Ground truth



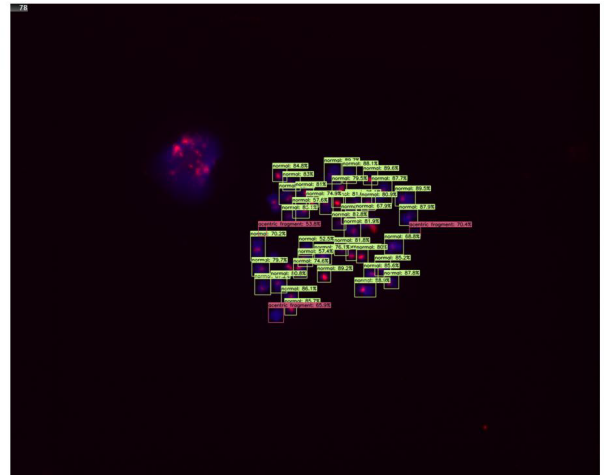
AI detection



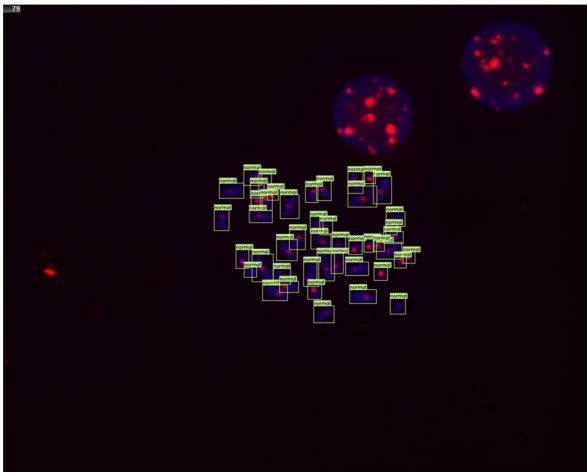
Ground truth



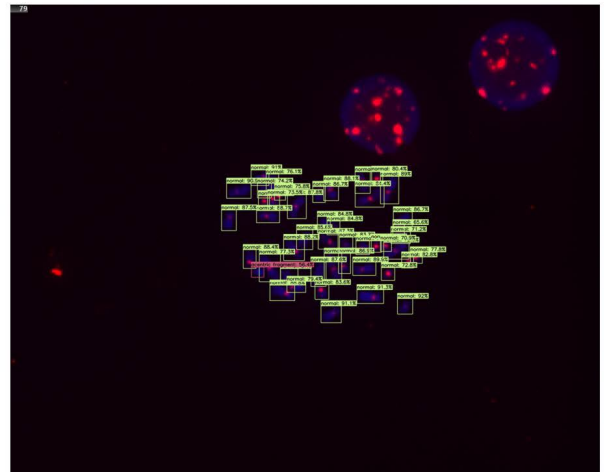
AI detection



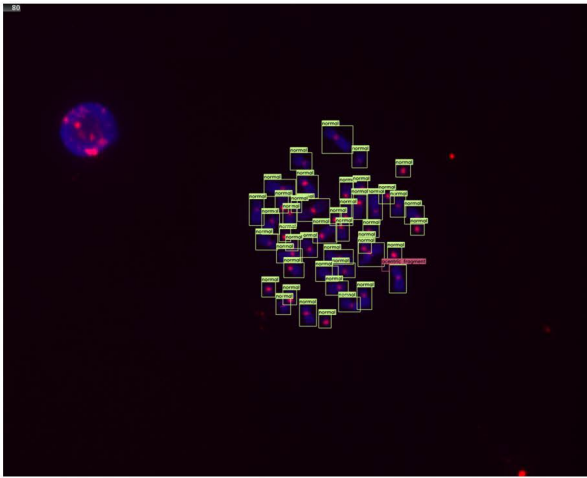
Ground truth



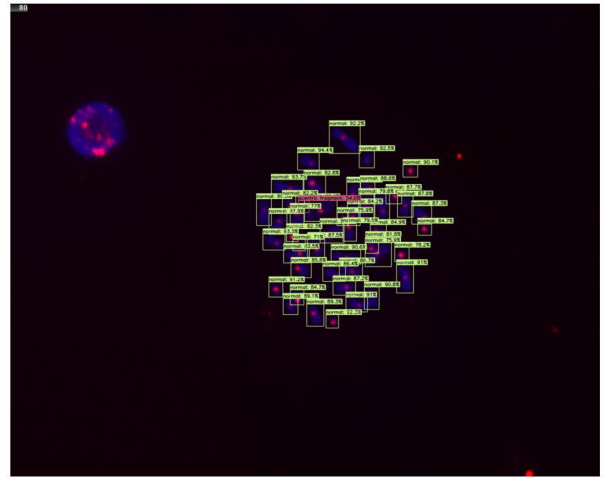
AI detection



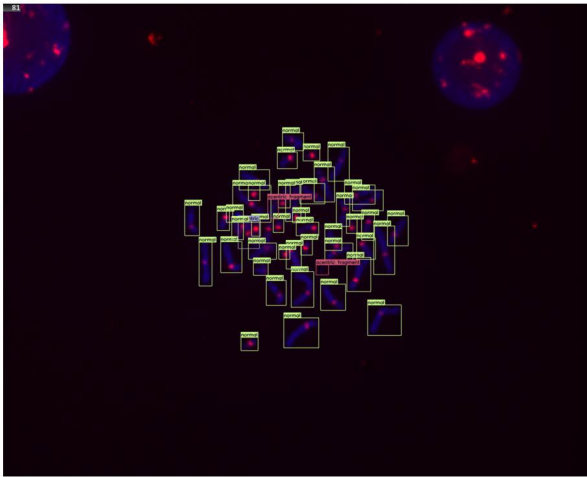
Ground truth



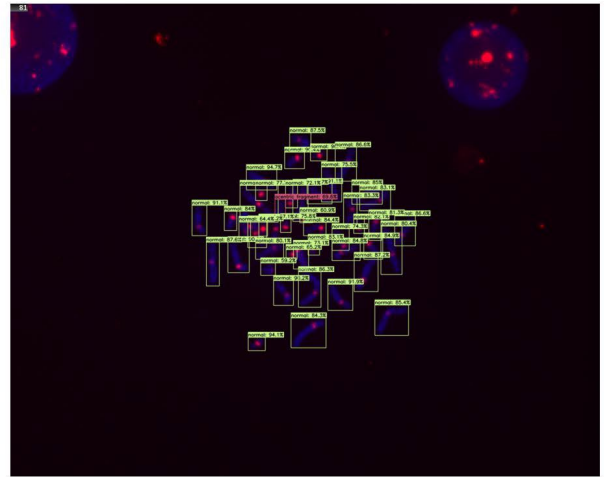
AI detection



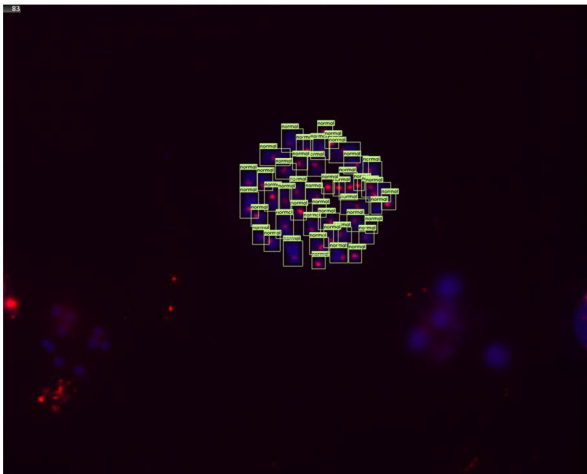
Ground truth



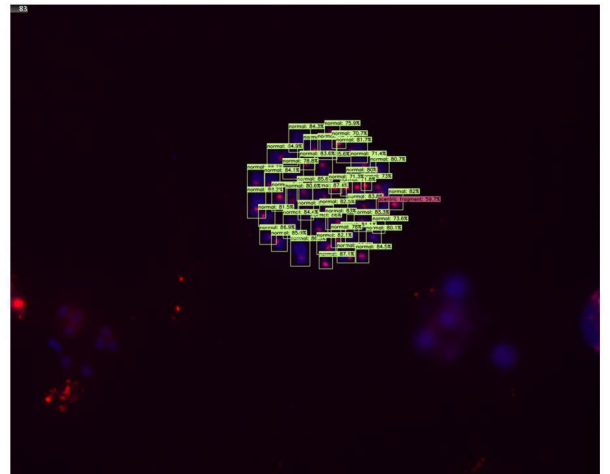
AI detection



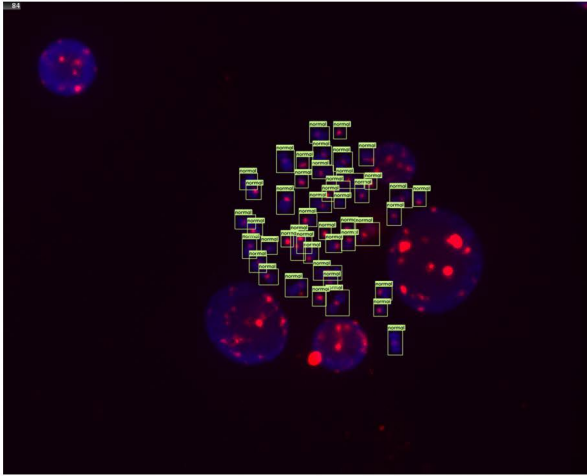
Ground truth



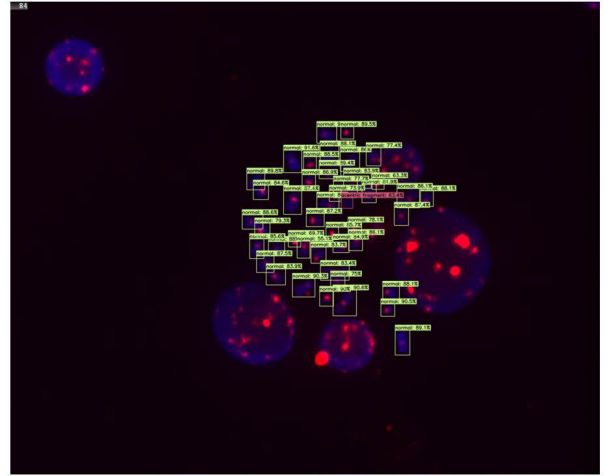
AI detection



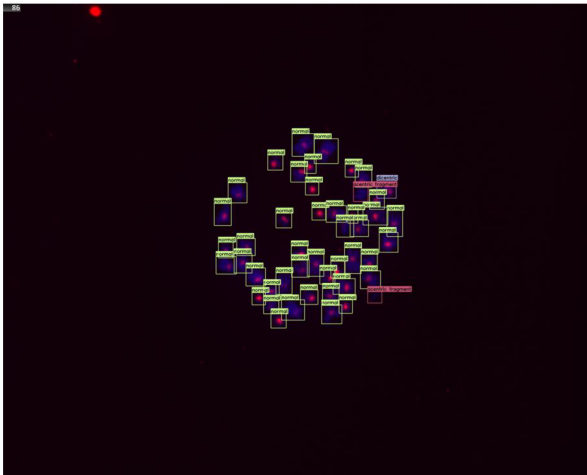
Ground truth



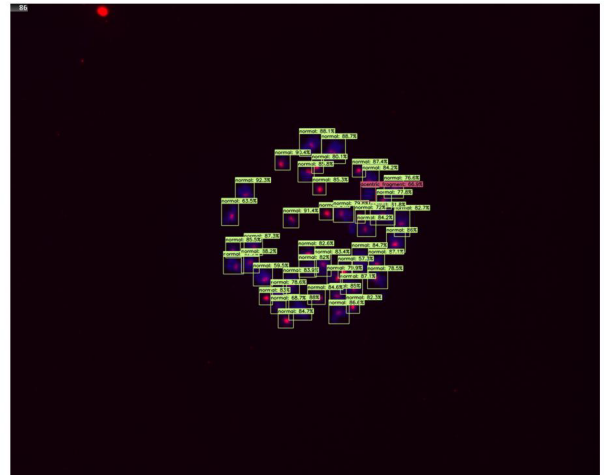
AI detection



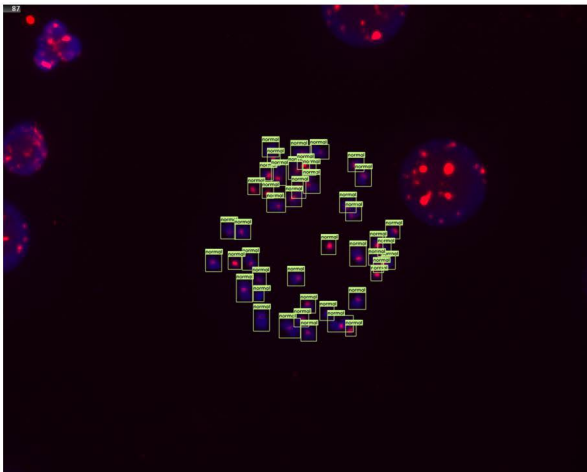
Ground truth



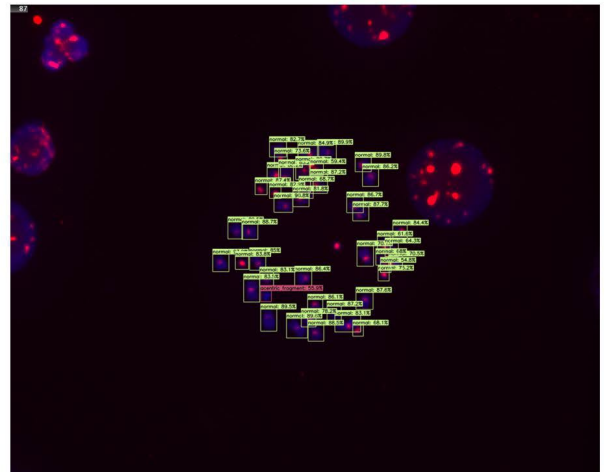
AI detection



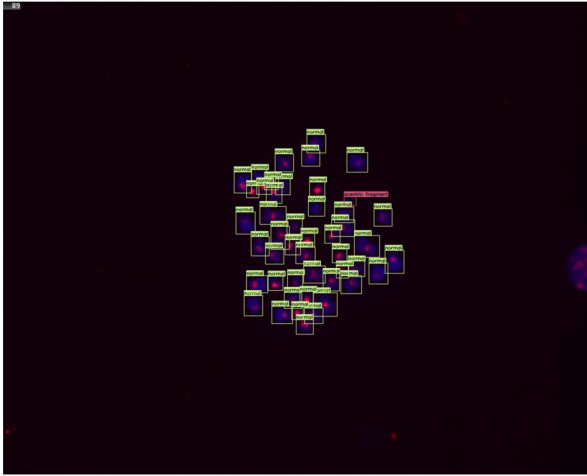
Ground truth



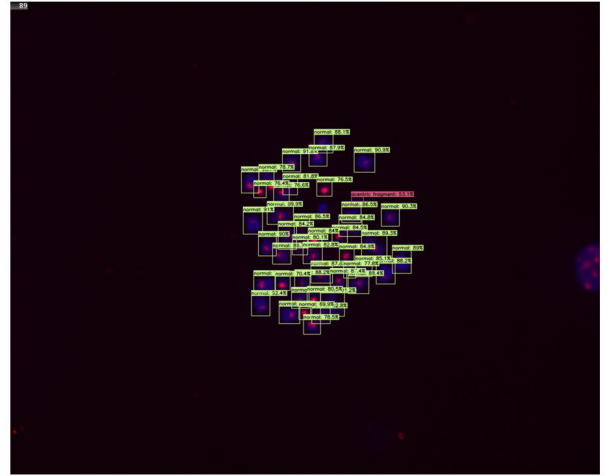
AI detection



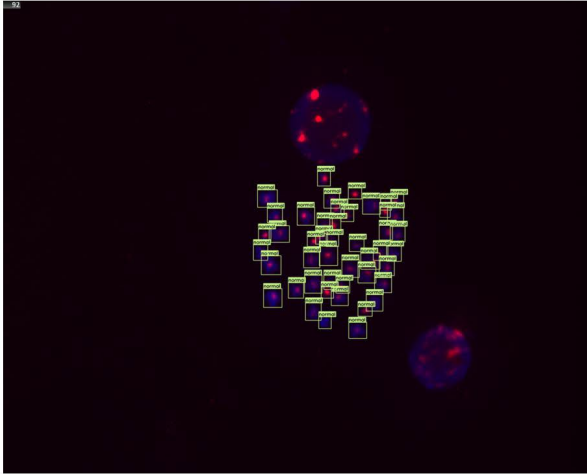
Ground truth



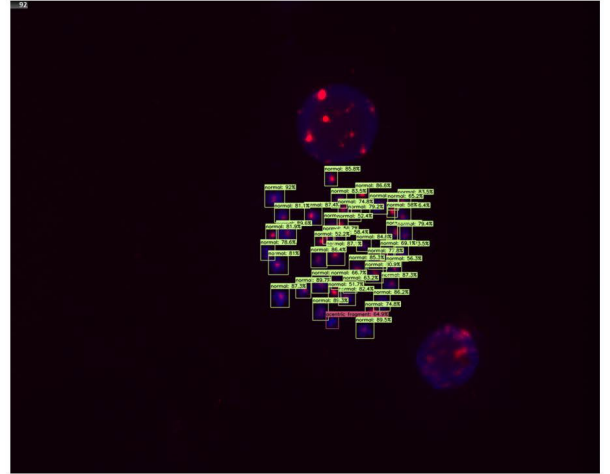
AI detection



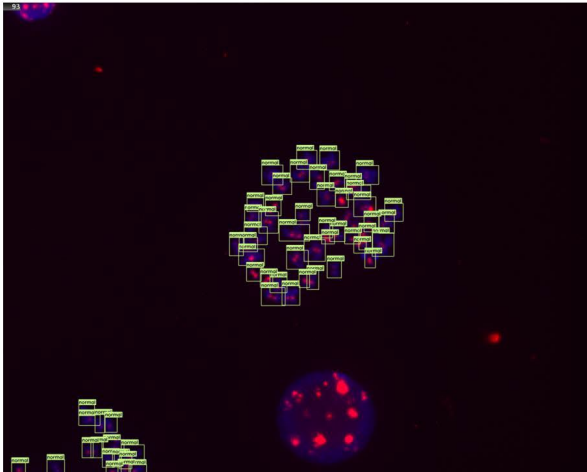
Ground truth



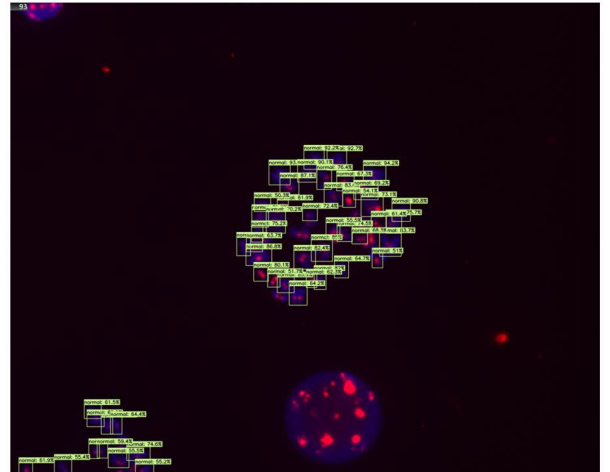
AI detection



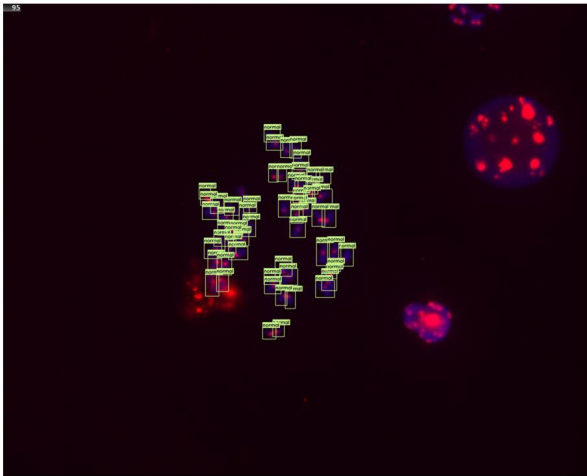
Ground truth



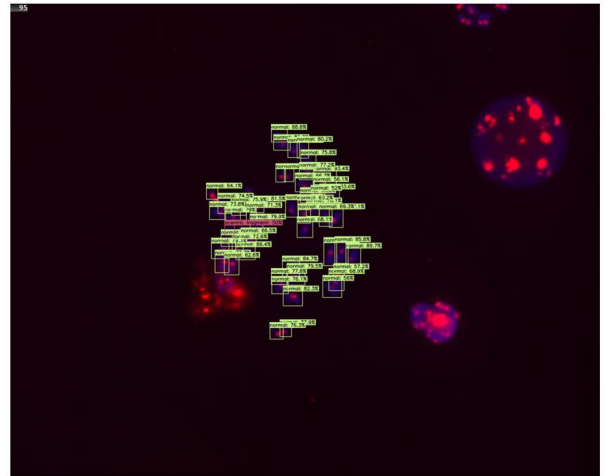
AI detection



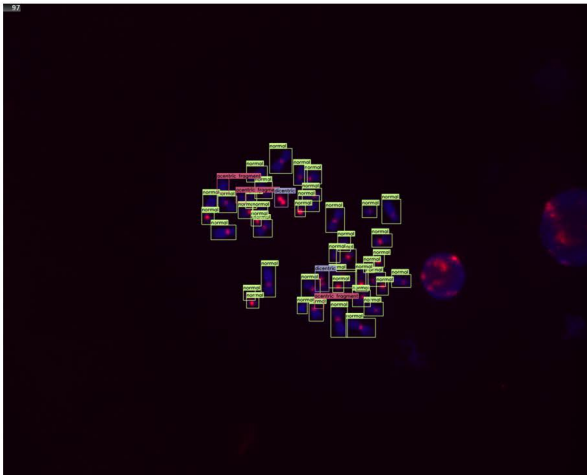
Ground truth



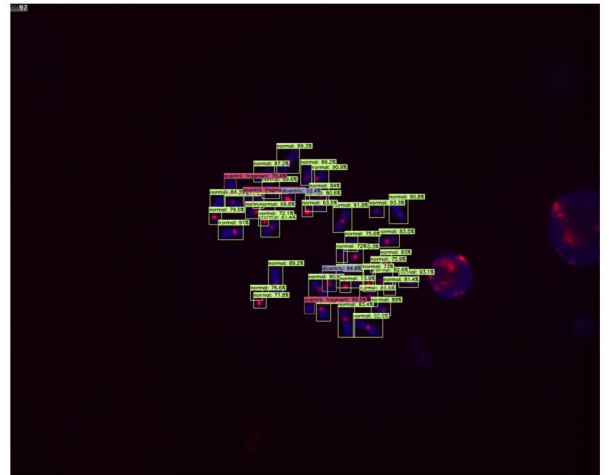
AI detection



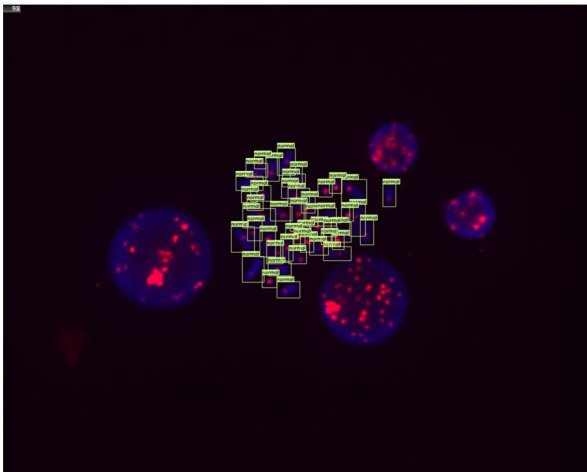
Ground truth



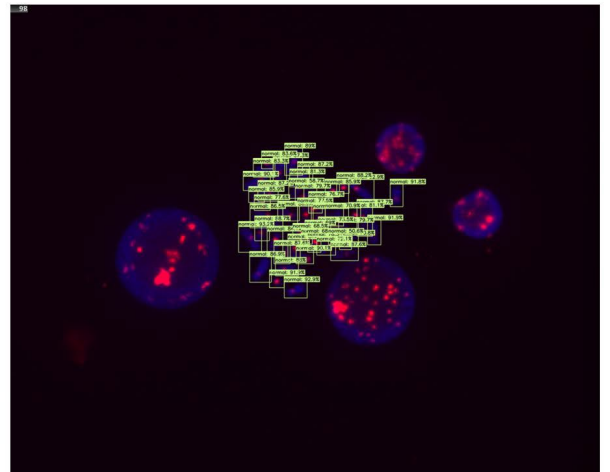
AI detection



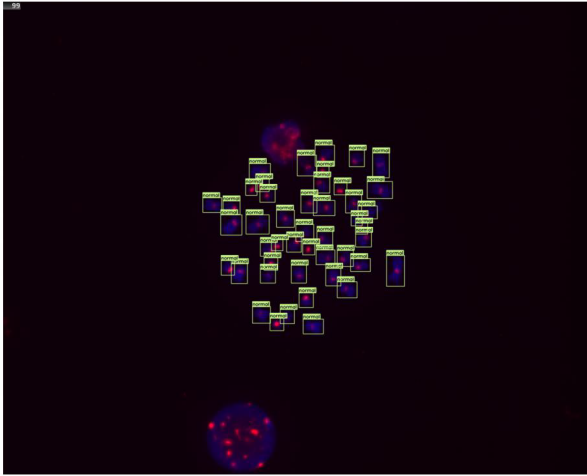
Ground truth



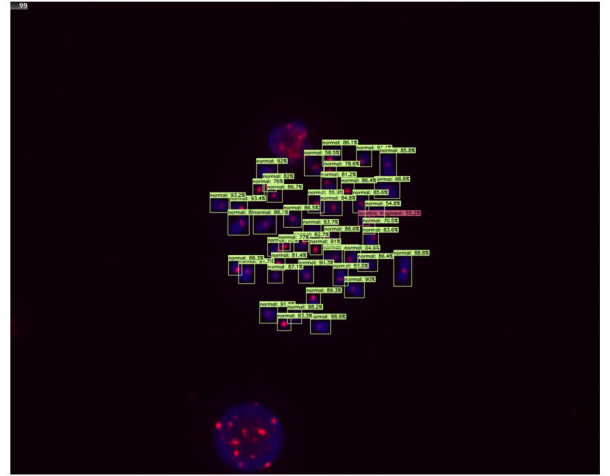
AI detection



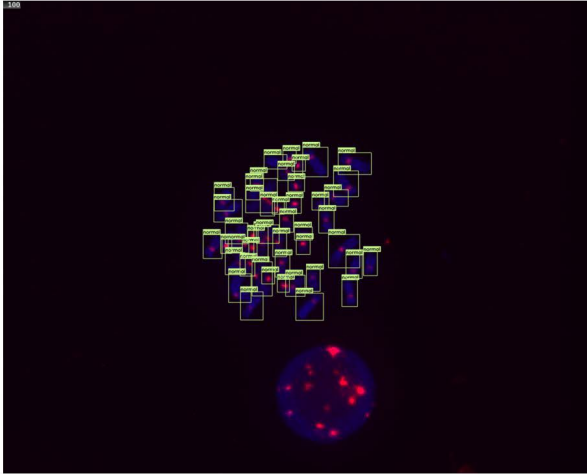
Ground truth



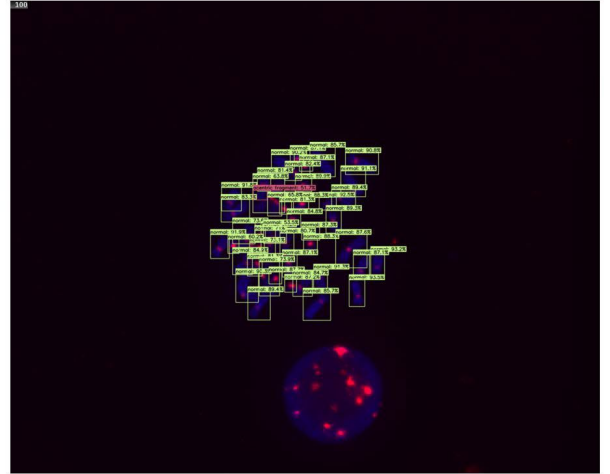
AI detection



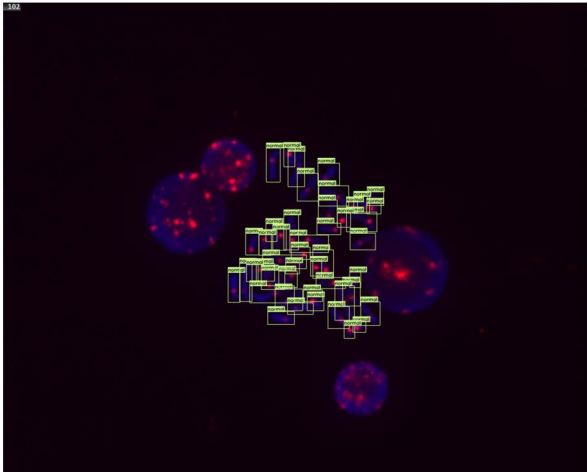
Ground truth



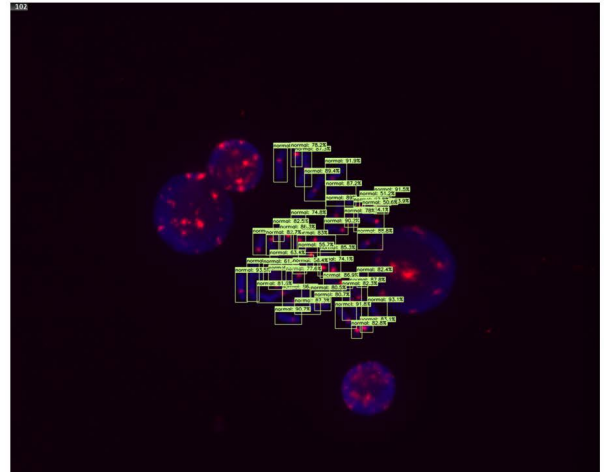
AI detection



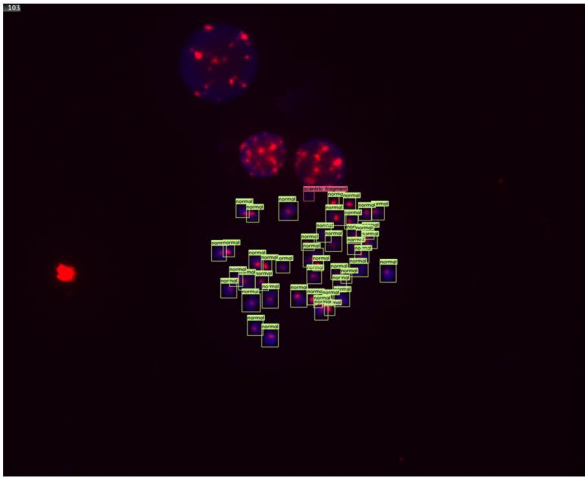
Ground truth



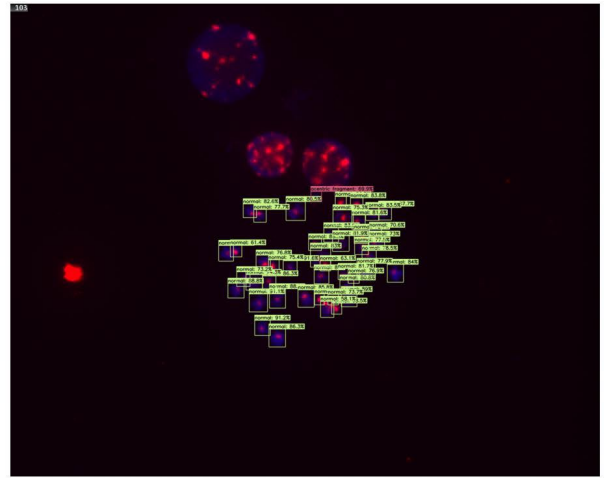
AI detection



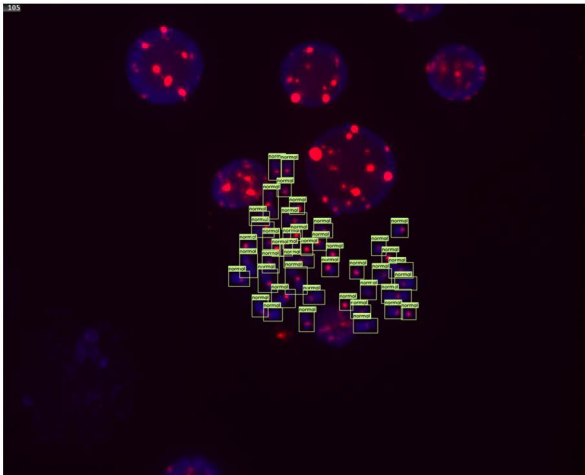
Ground truth



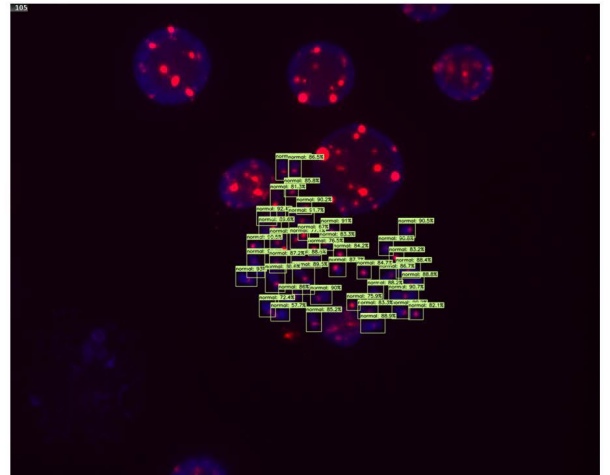
AI detection



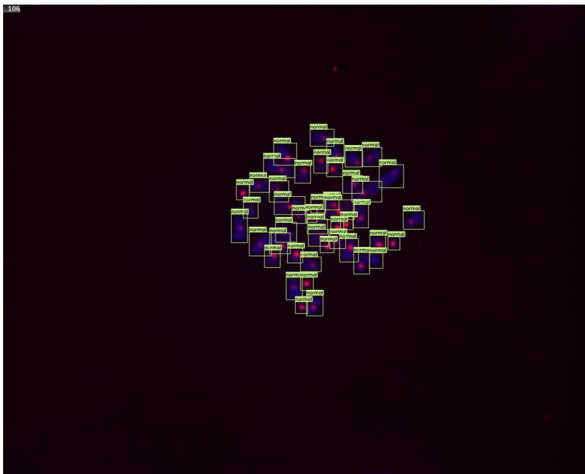
Ground truth



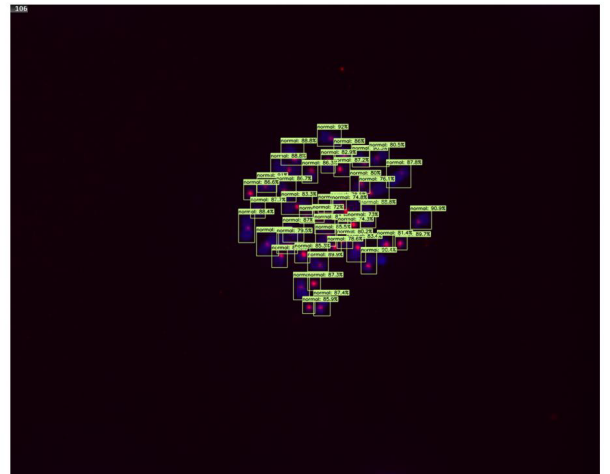
AI detection



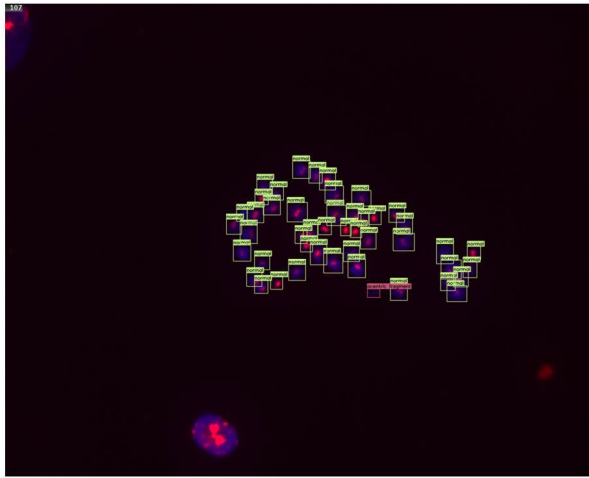
Ground truth



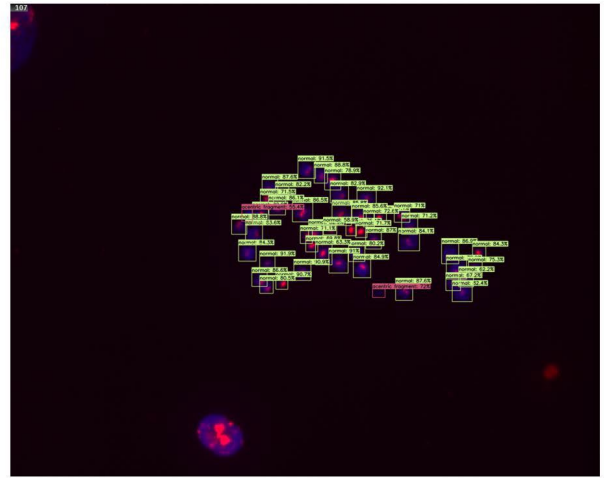
AI detection



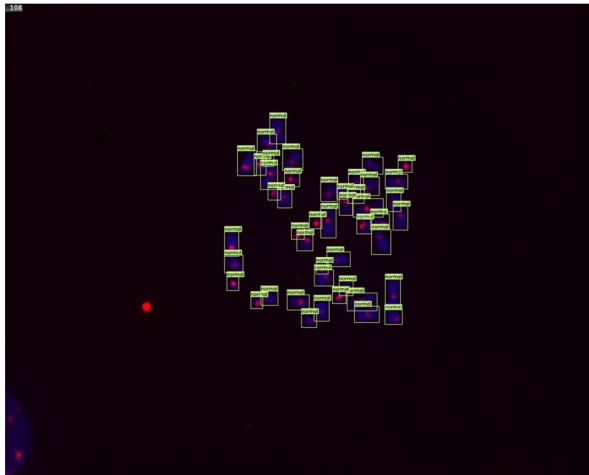
Ground truth



AI detection



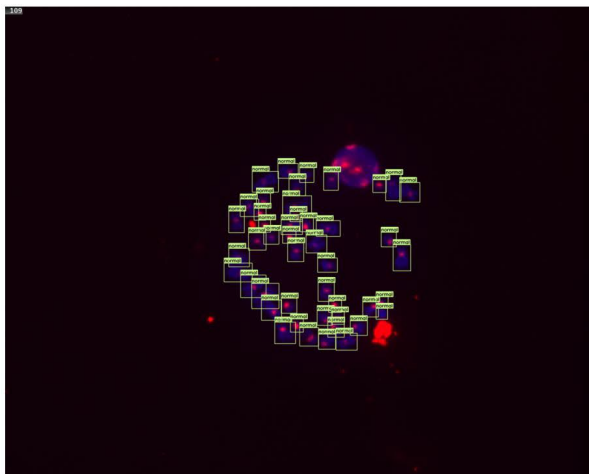
Ground truth



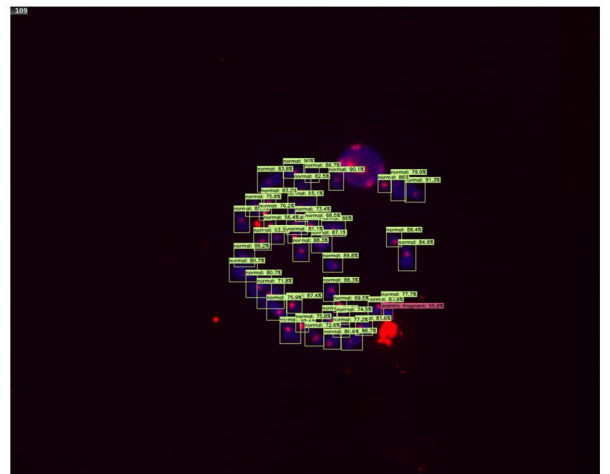
AI detection



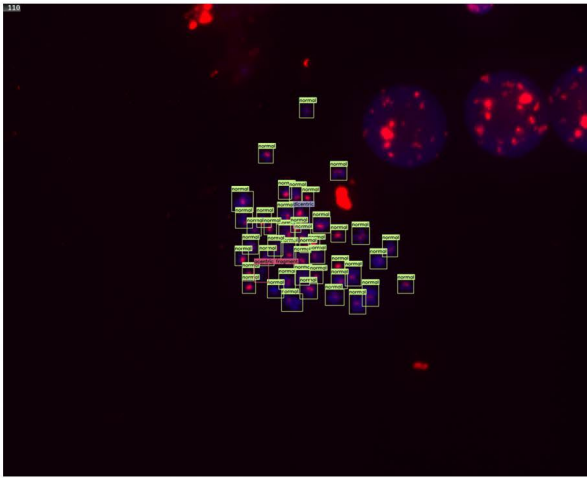
Ground truth



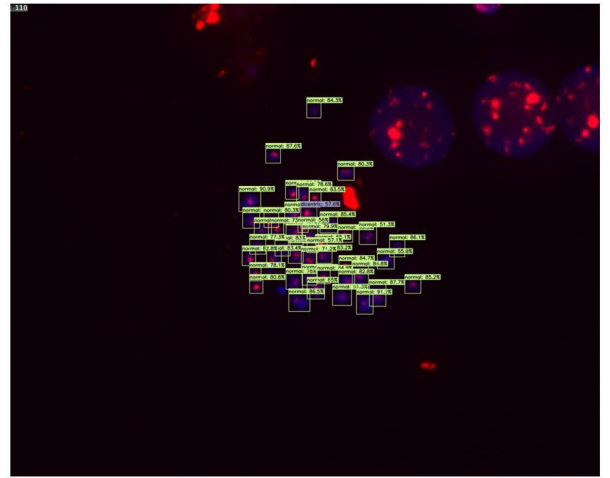
AI detection



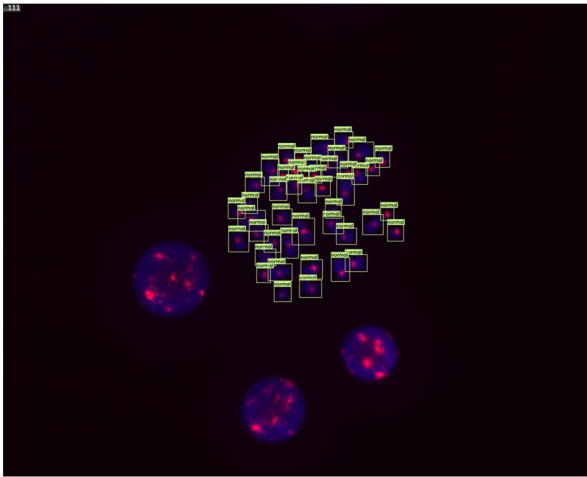
Ground truth



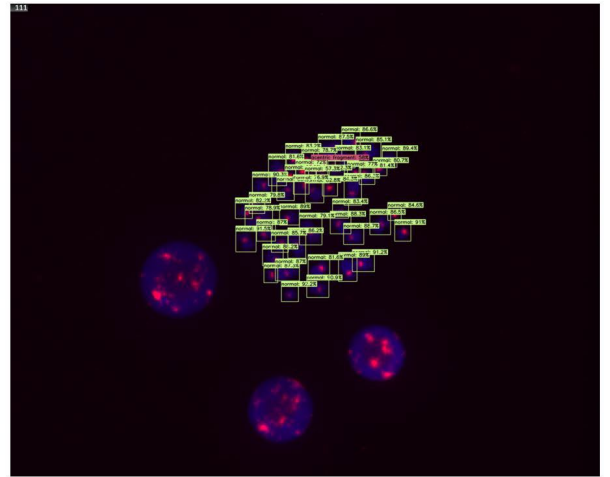
AI detection



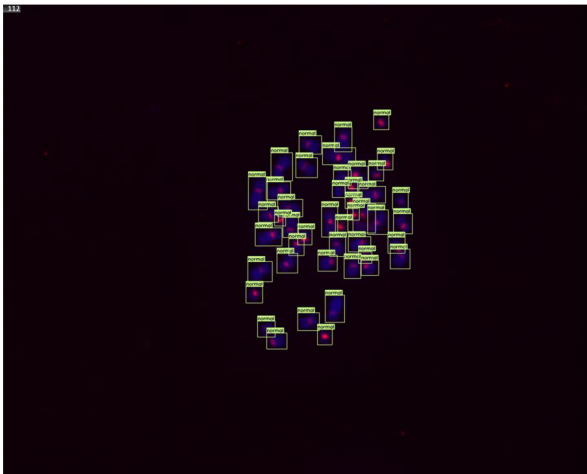
Ground truth



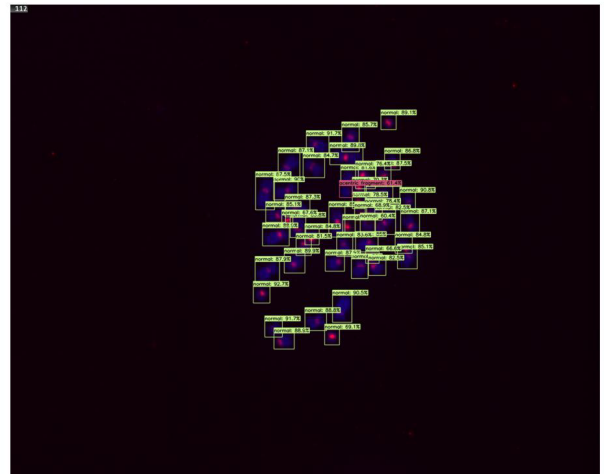
AI detection



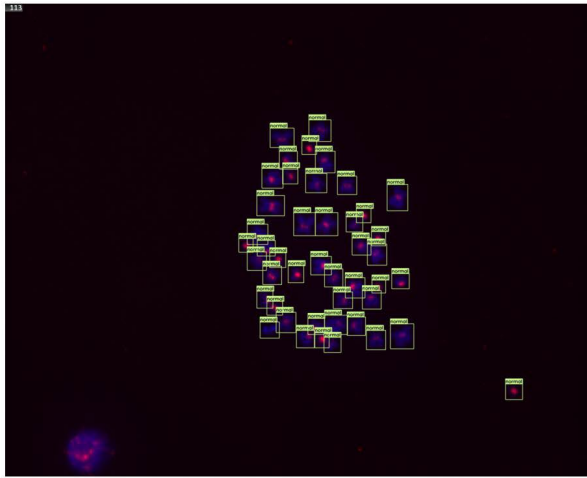
Ground truth



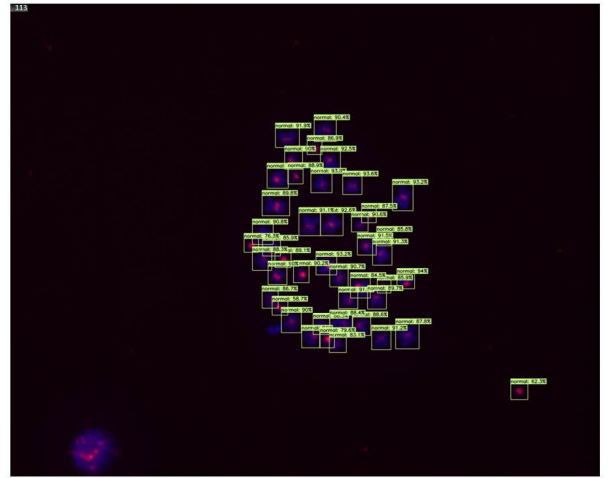
AI detection



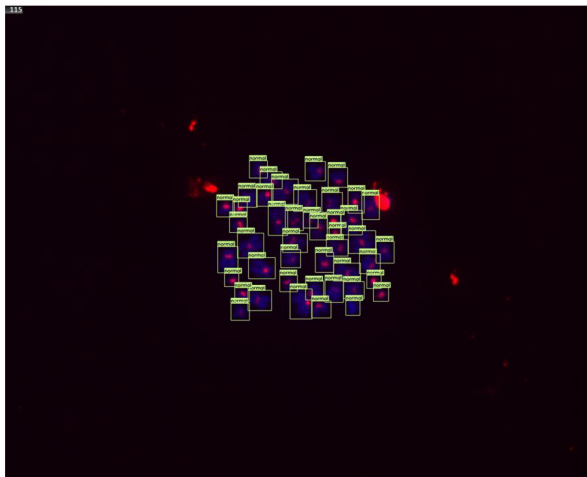
Ground truth



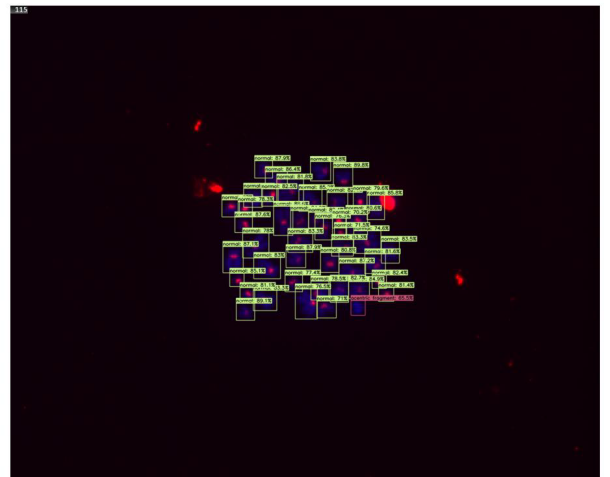
AI detection



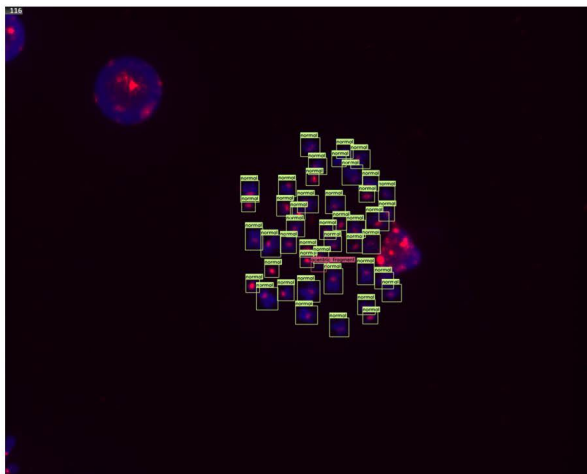
Ground truth



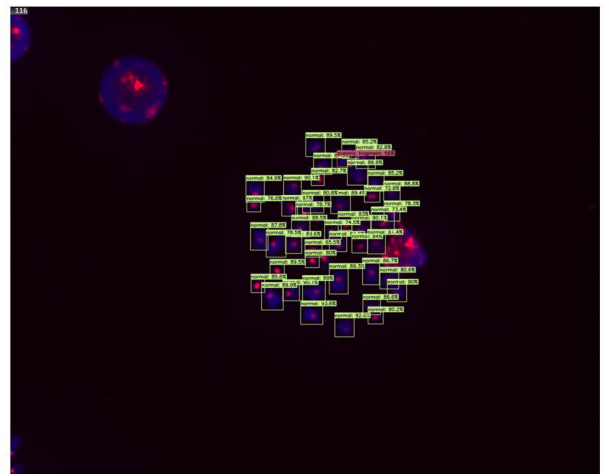
AI detection



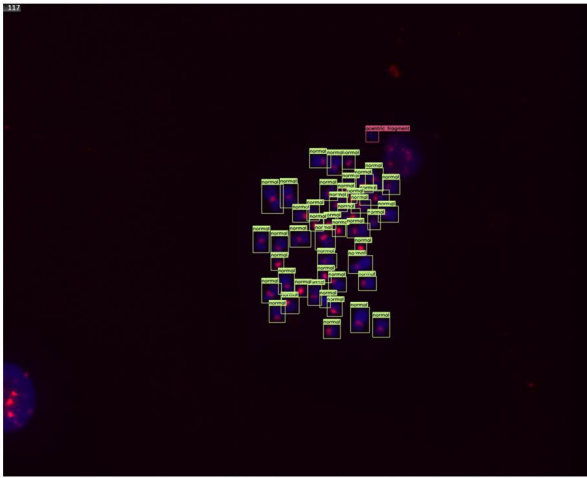
Ground truth



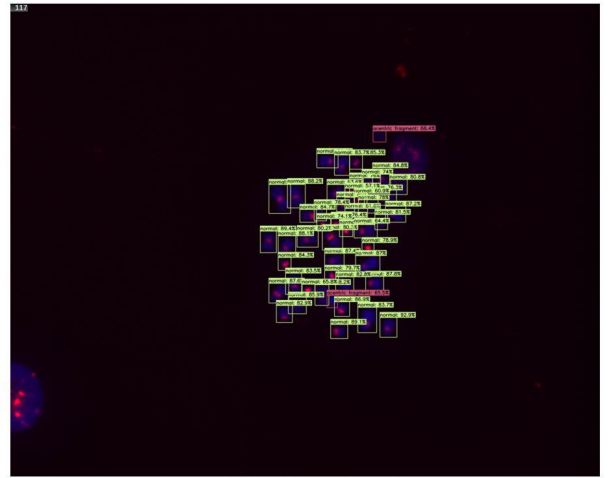
AI detection



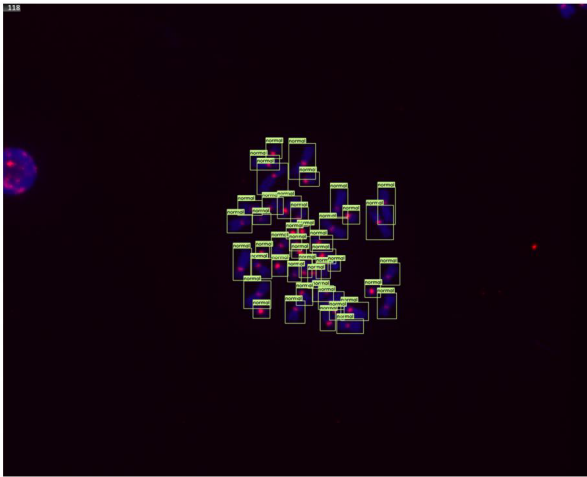
Ground truth



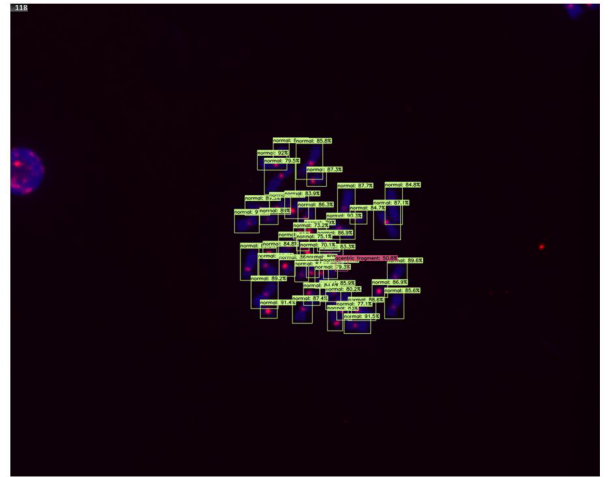
AI detection



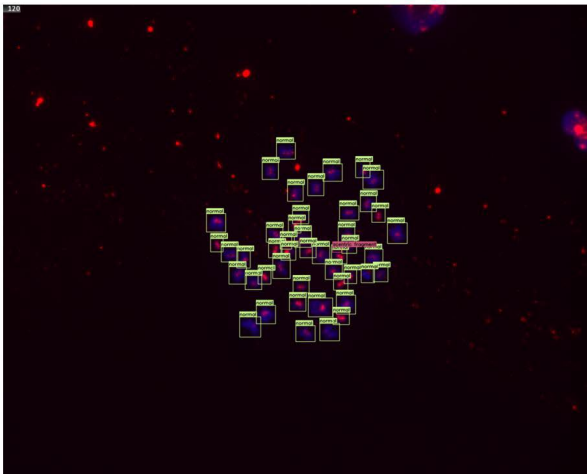
Ground truth



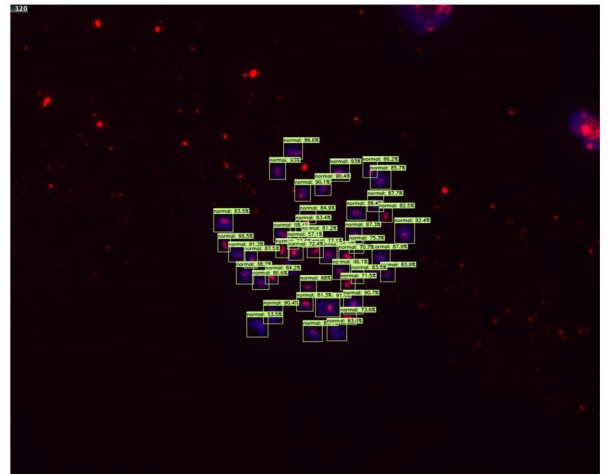
AI detection



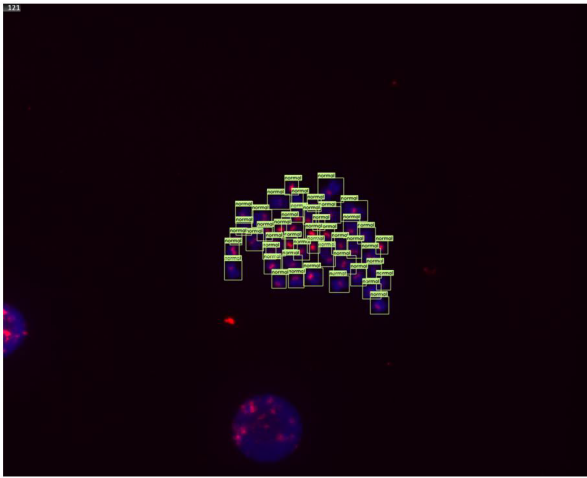
Ground truth



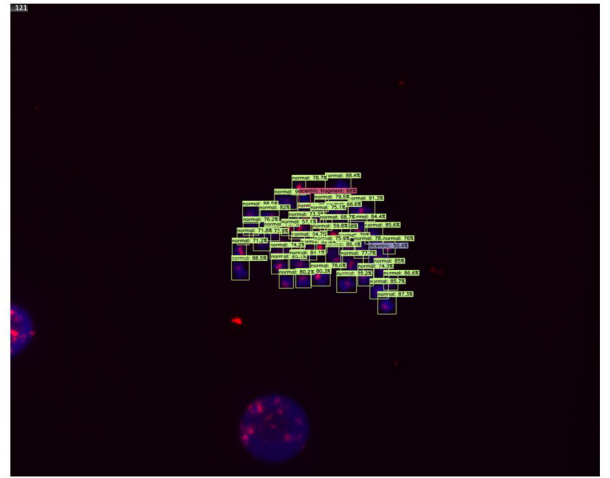
AI detection



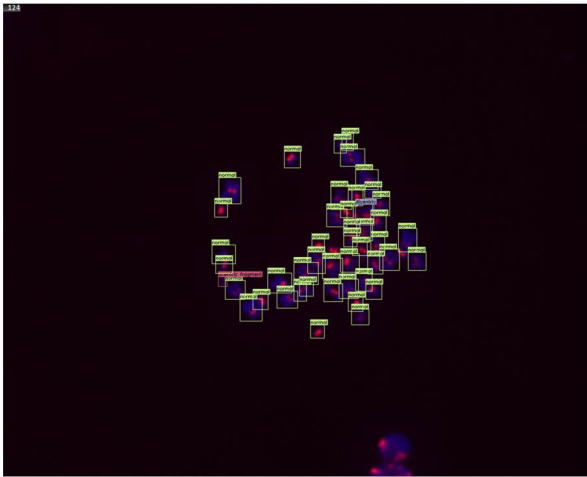
Ground truth



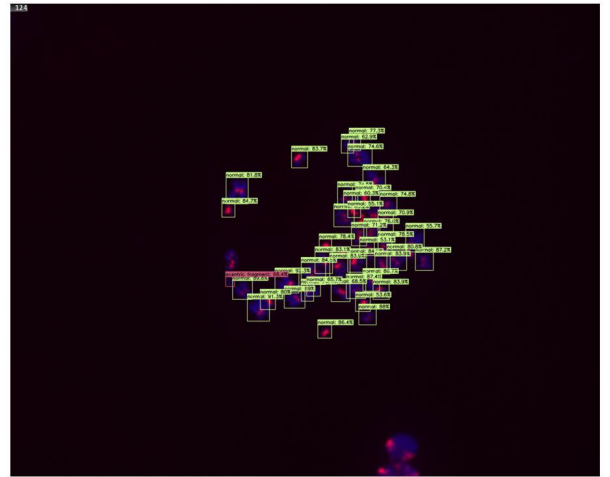
AI detection



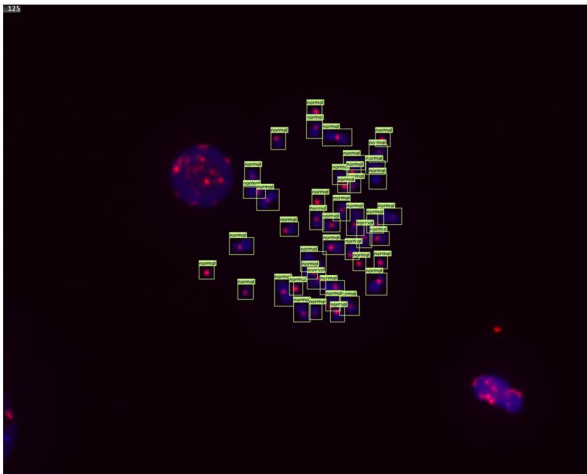
Ground truth



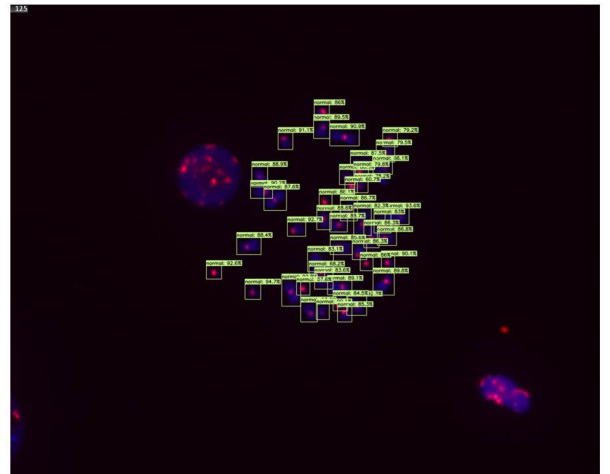
AI detection



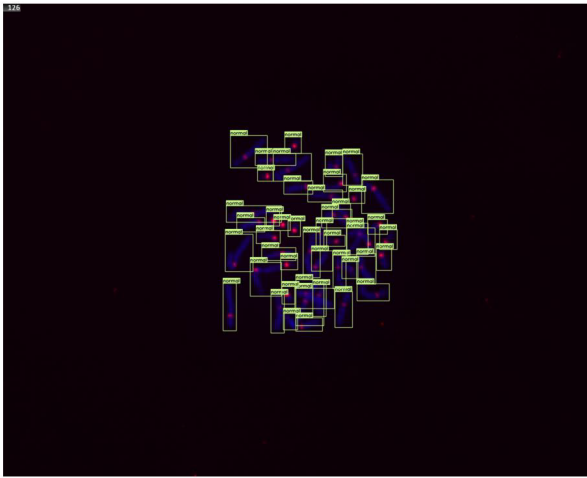
Ground truth



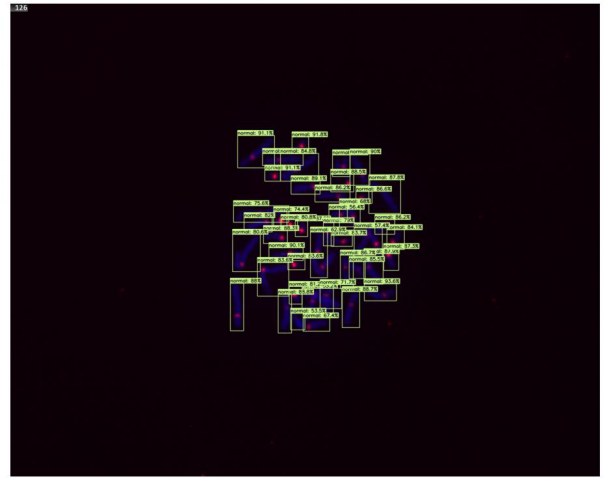
AI detection



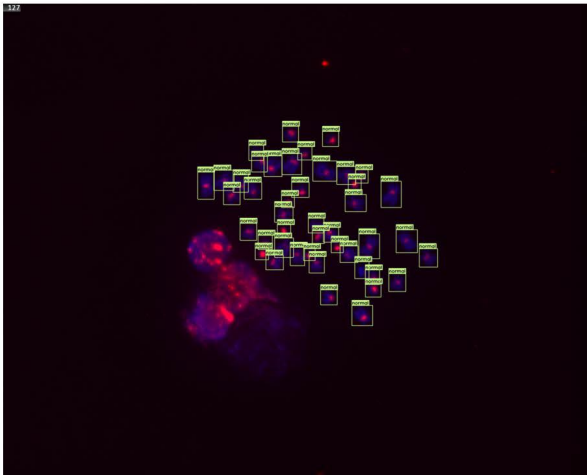
Ground truth



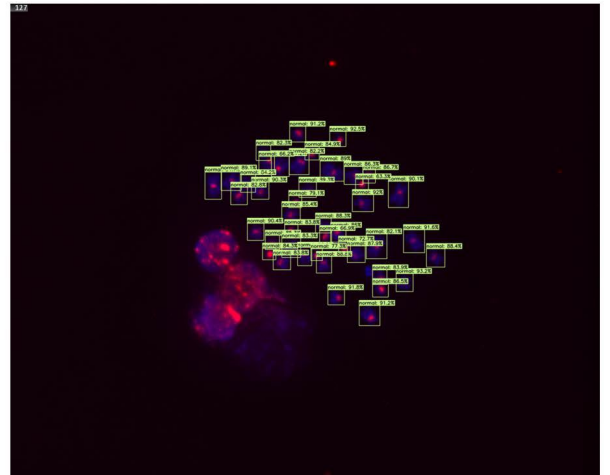
AI detection



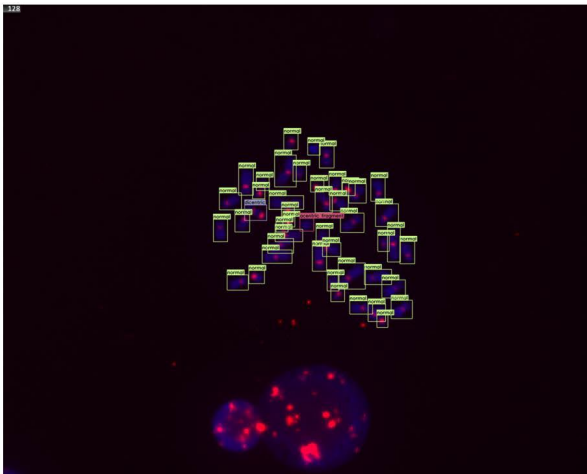
Ground truth



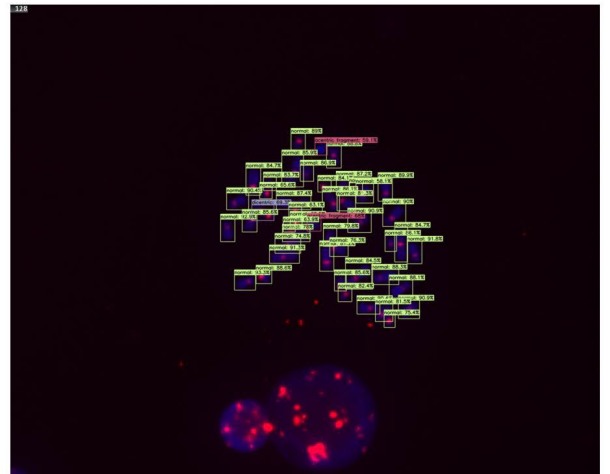
AI detection



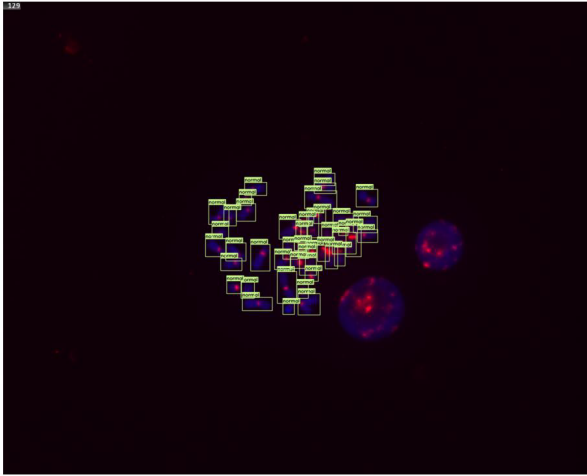
Ground truth



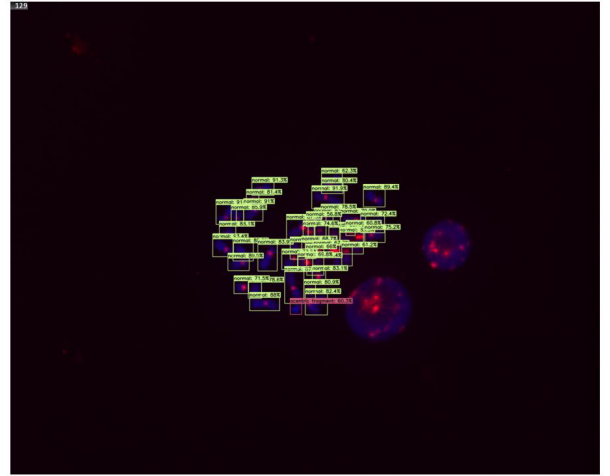
AI detection



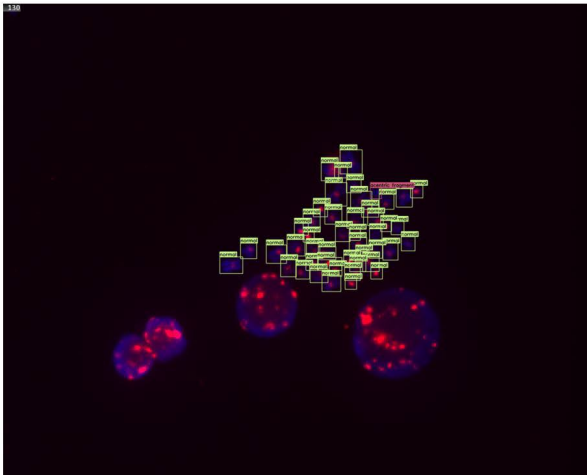
Ground truth



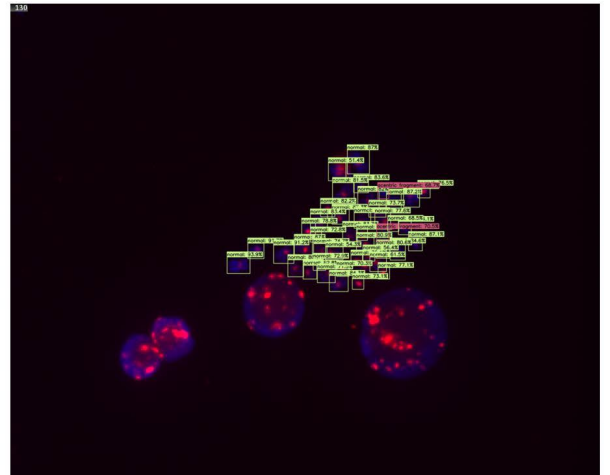
AI detection



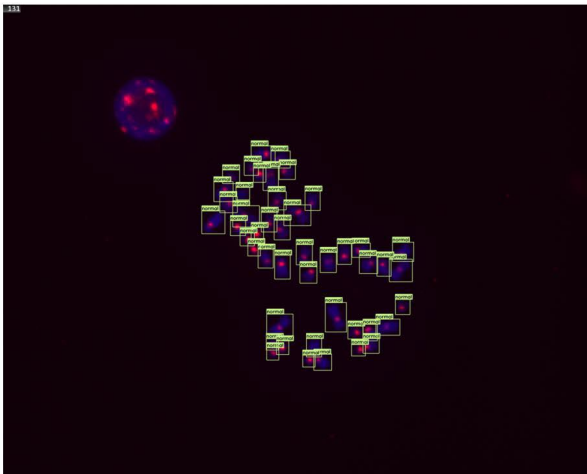
Ground truth



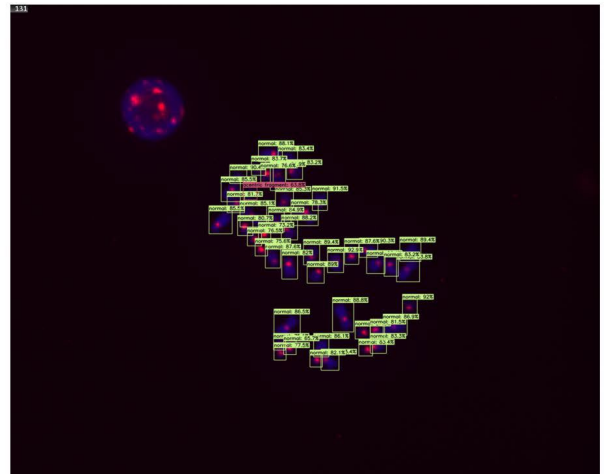
AI detection



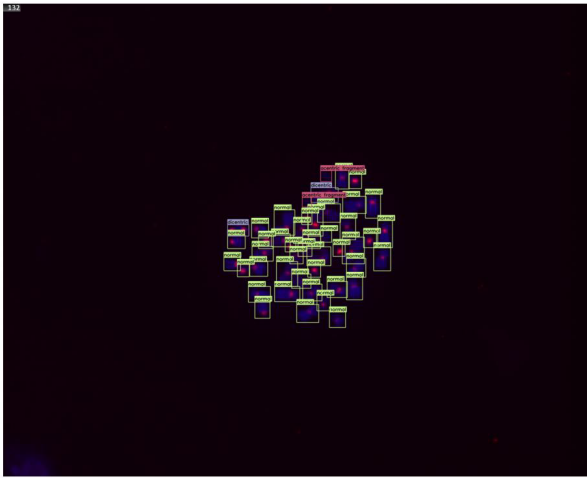
Ground truth



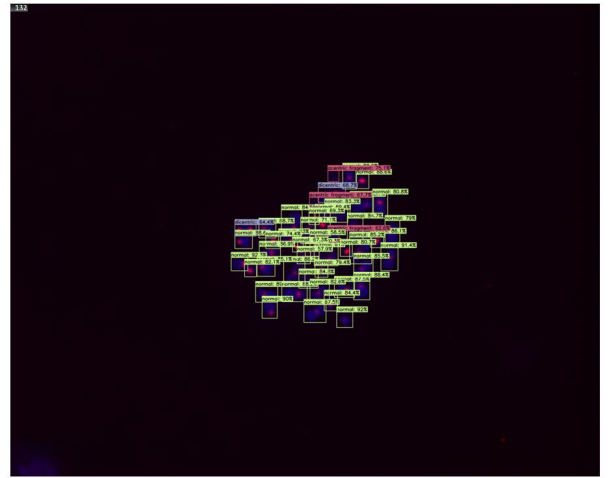
AI detection



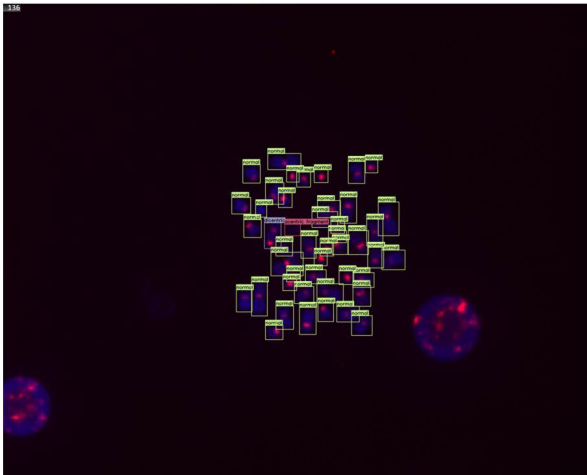
Ground truth



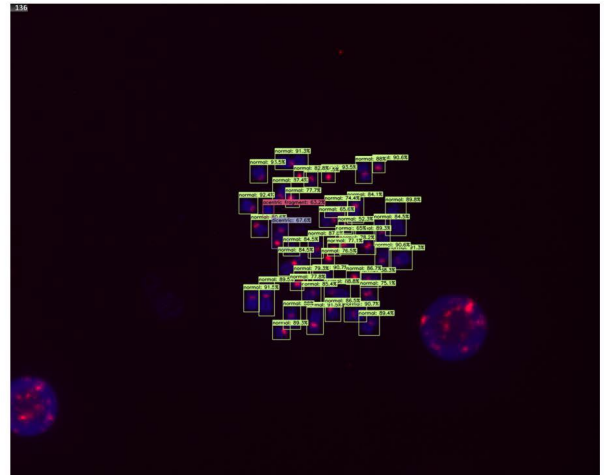
AI detection



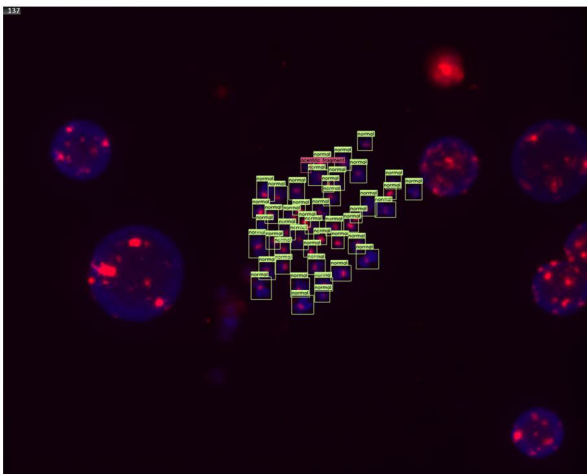
Ground truth



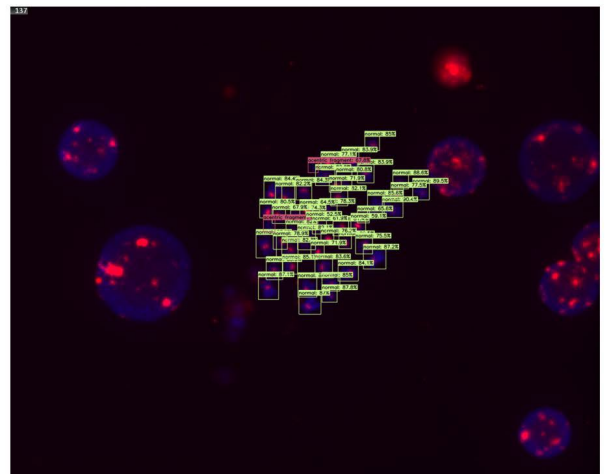
AI detection



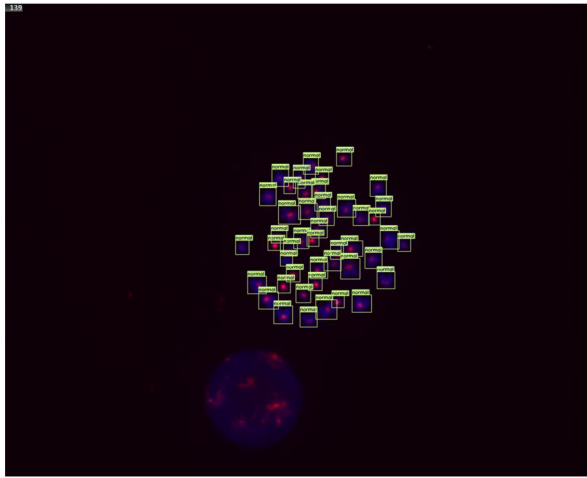
Ground truth



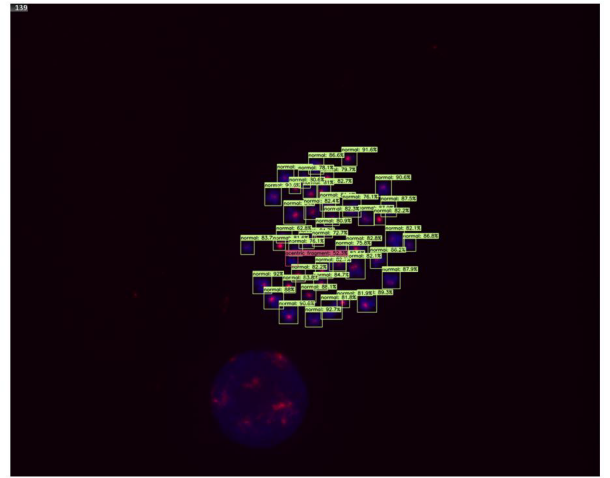
AI detection



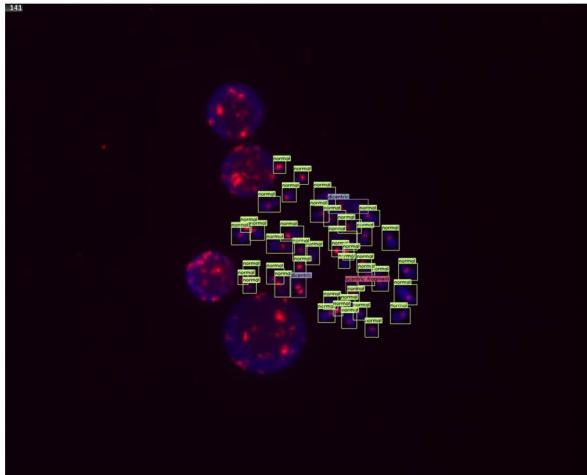
Ground truth



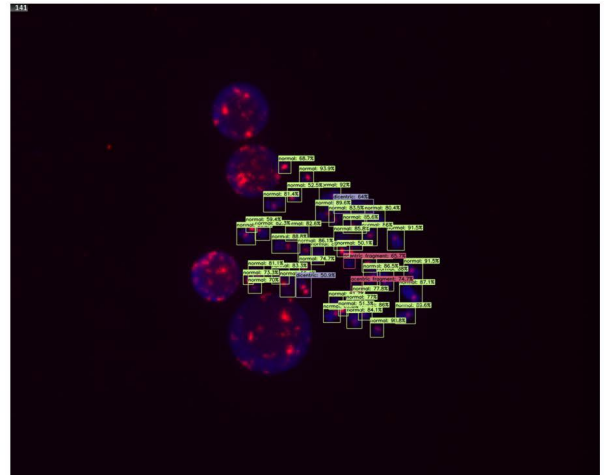
AI detection



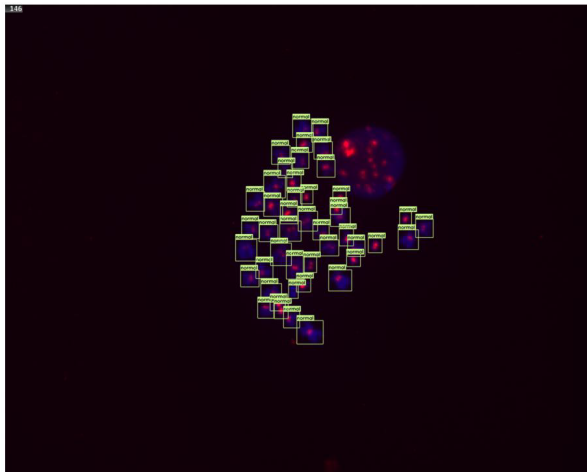
Ground truth



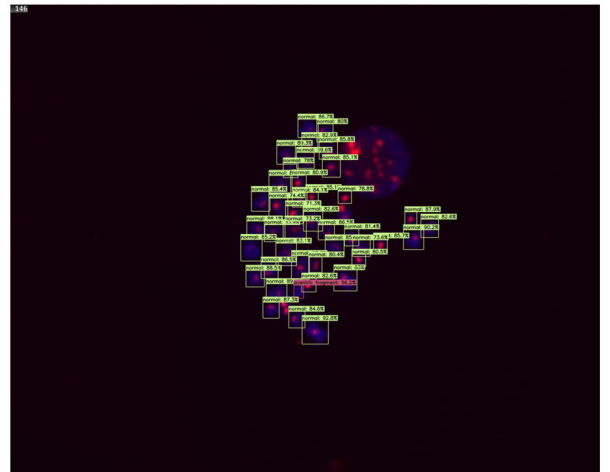
AI detection



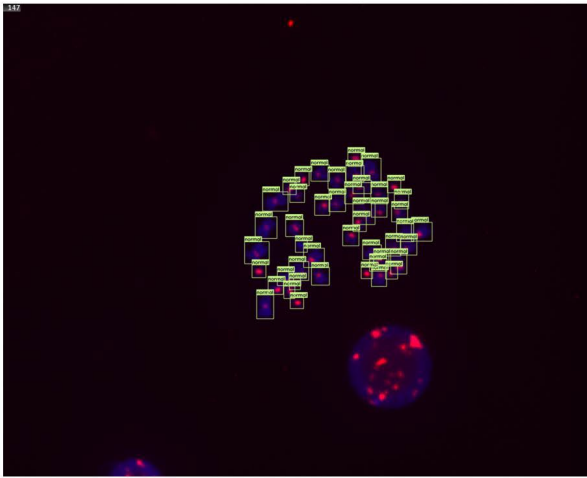
Ground truth



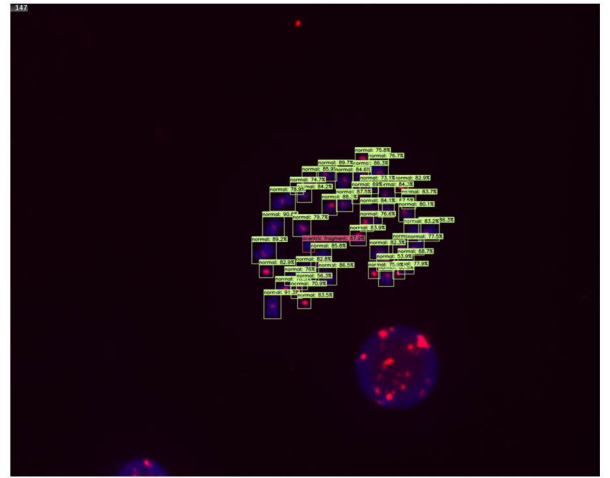
AI detection



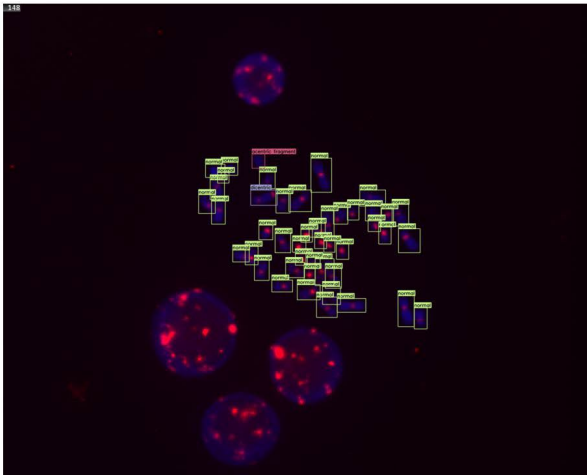
Ground truth



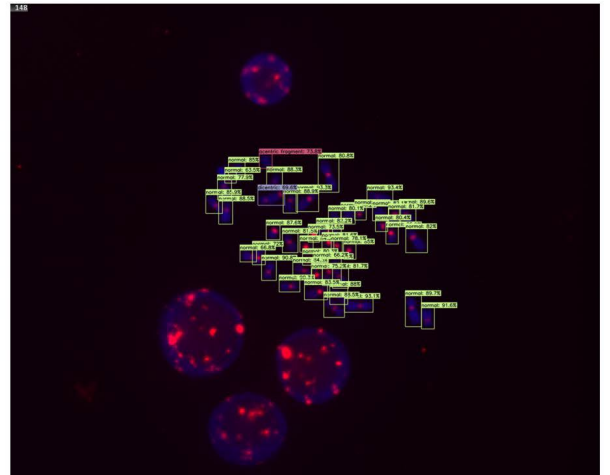
AI detection



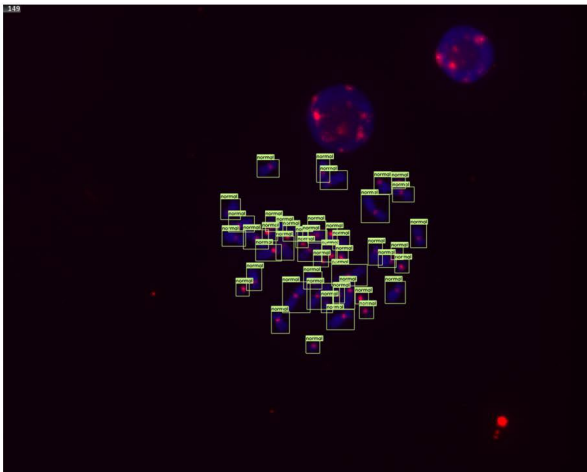
Ground truth



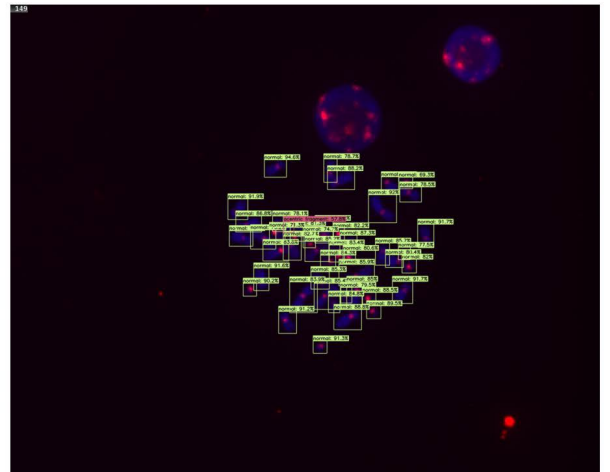
AI detection



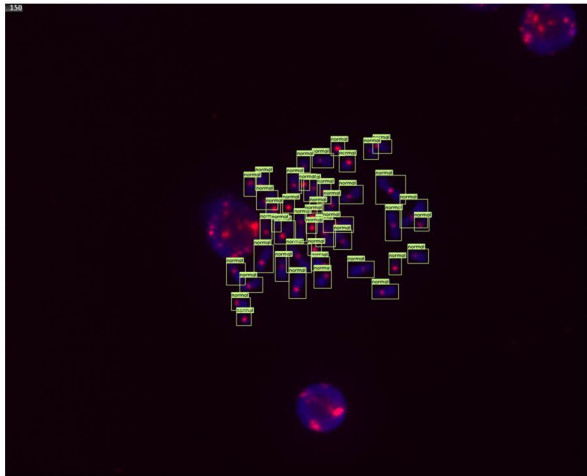
Ground truth



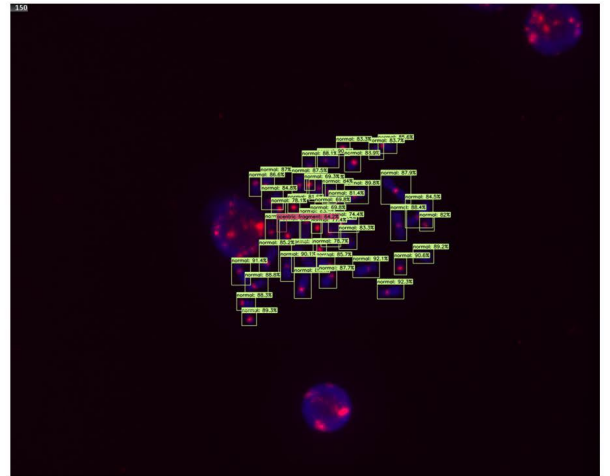
AI detection



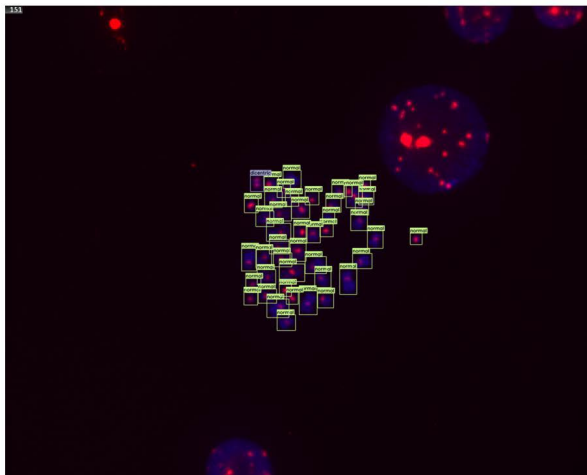
Ground truth



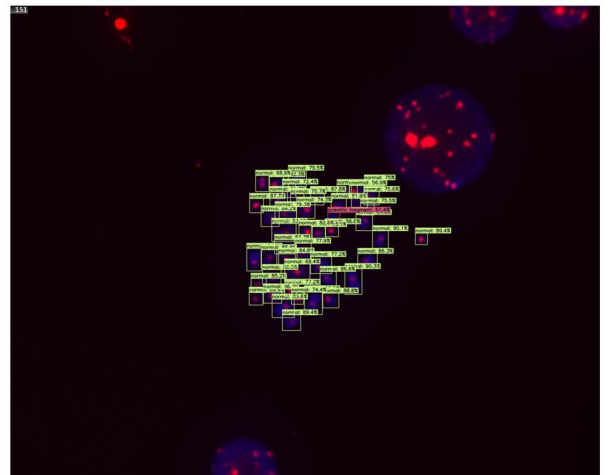
AI detection



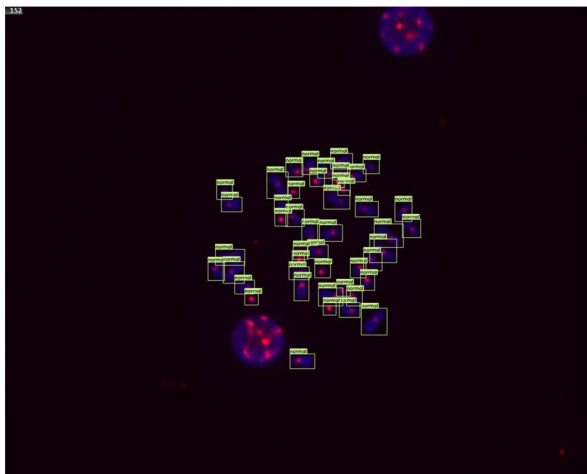
Ground truth



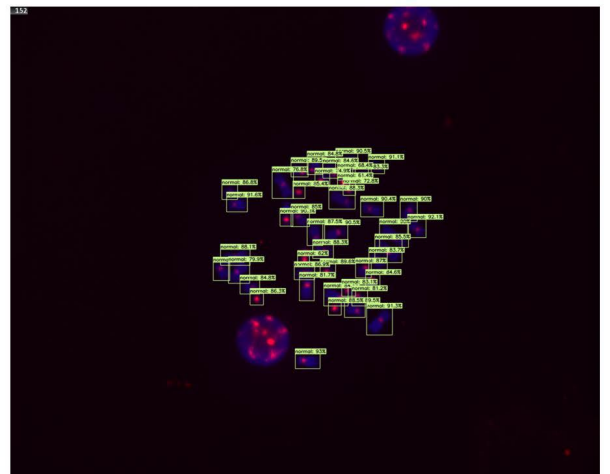
AI detection



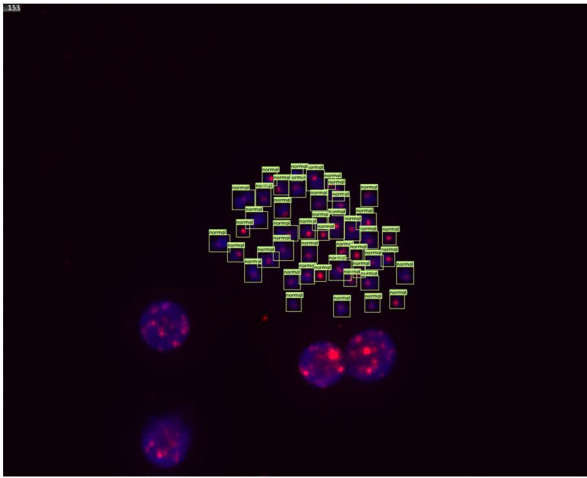
Ground truth



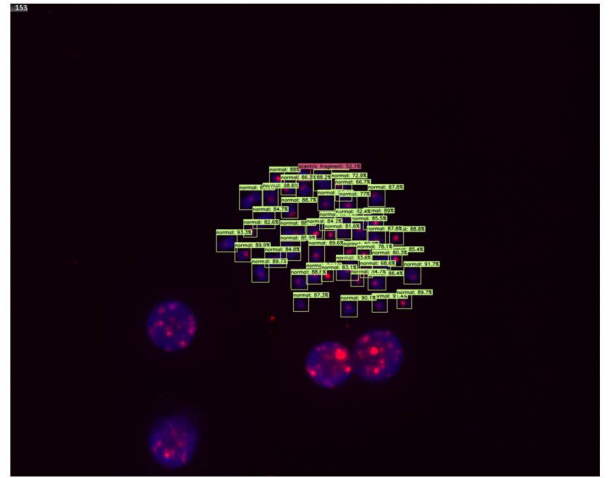
AI detection



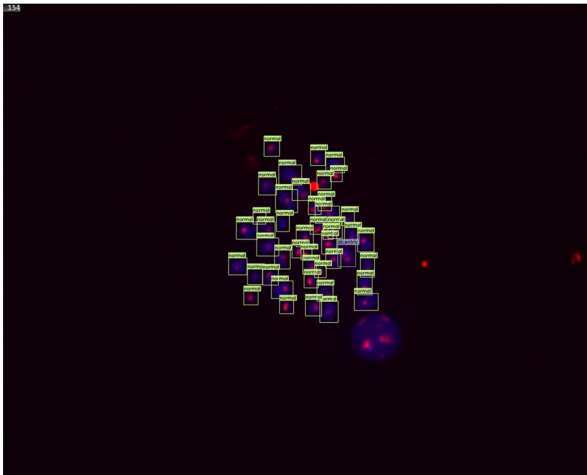
Ground truth



AI detection



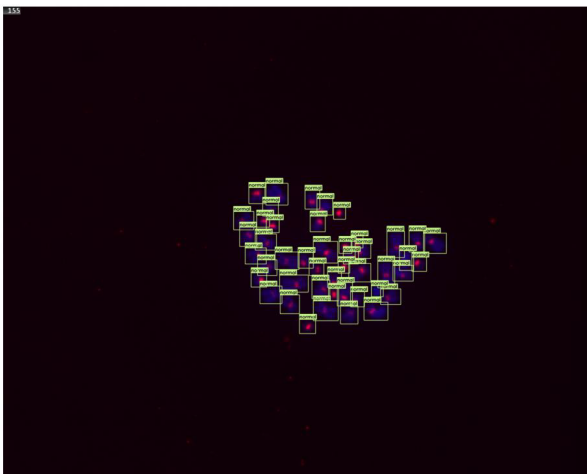
Ground truth



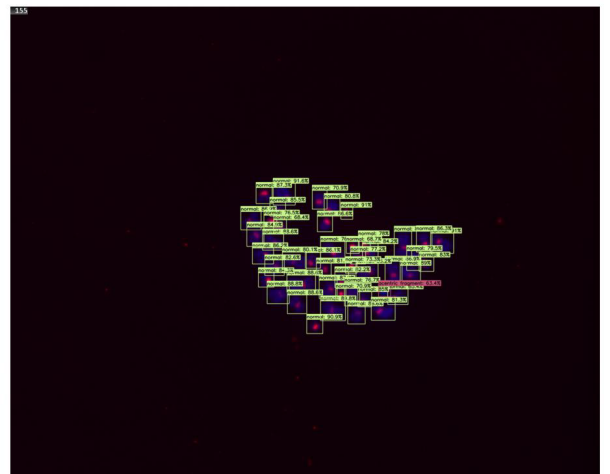
AI detection



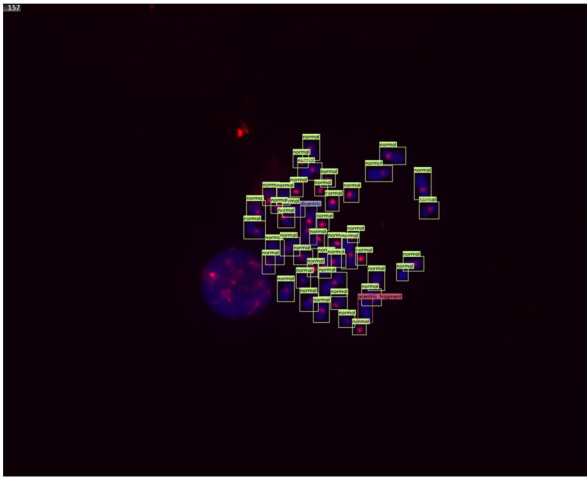
Ground truth



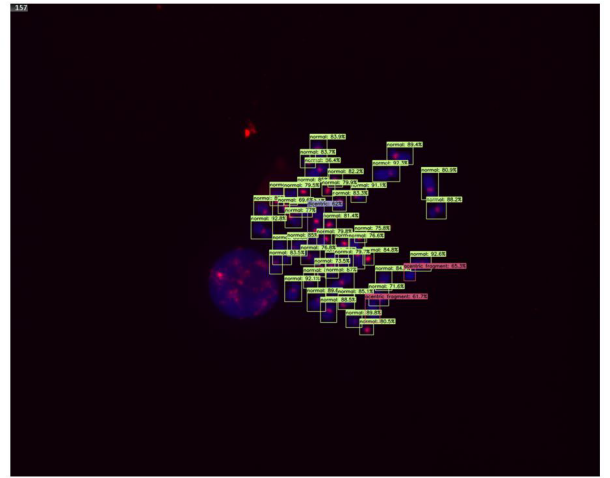
AI detection



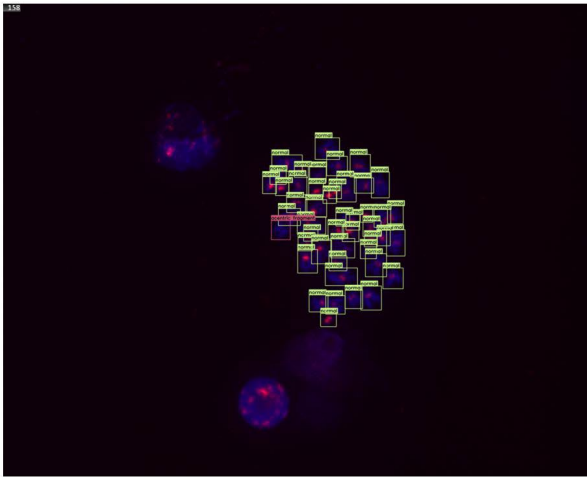
Ground truth



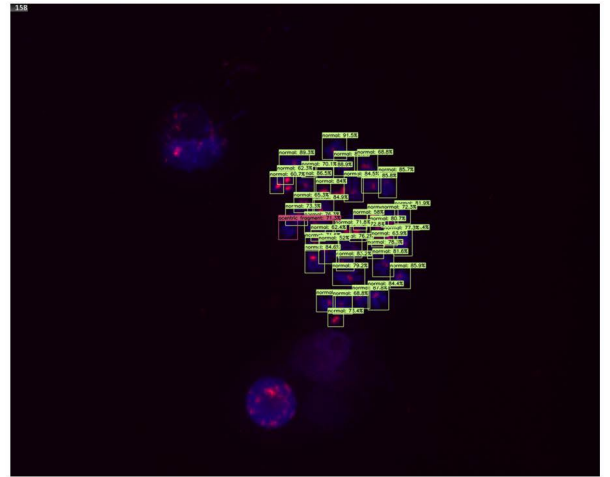
AI detection



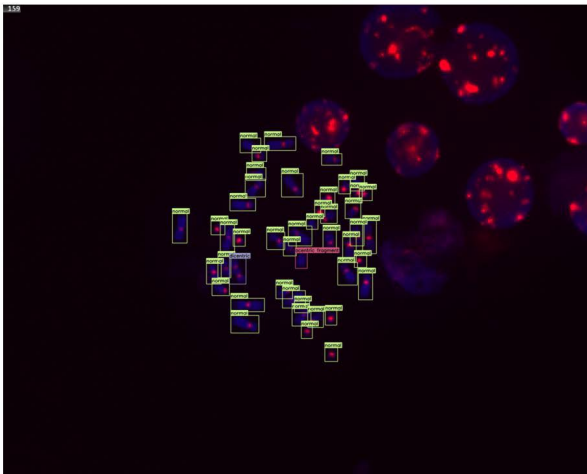
Ground truth



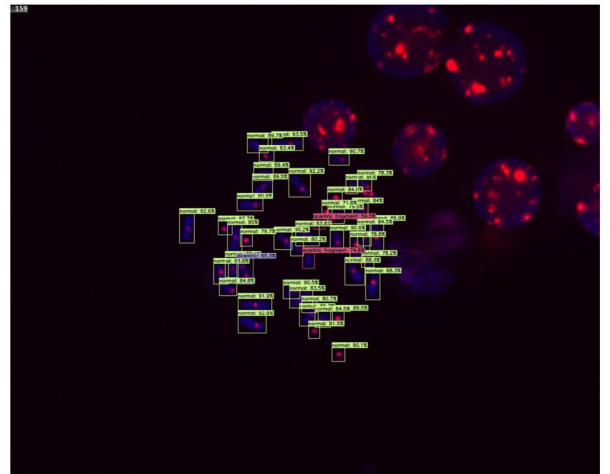
AI detection



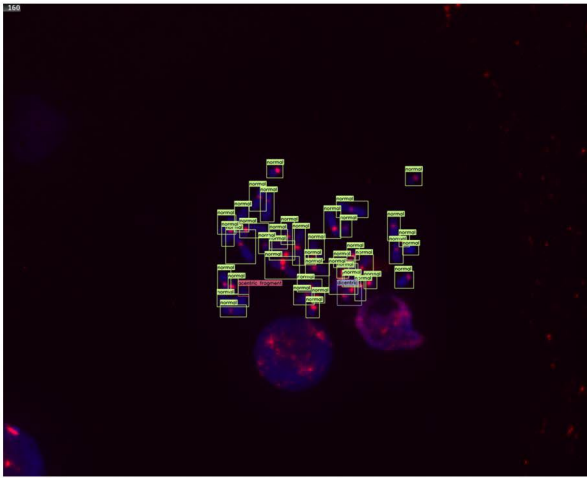
Ground truth



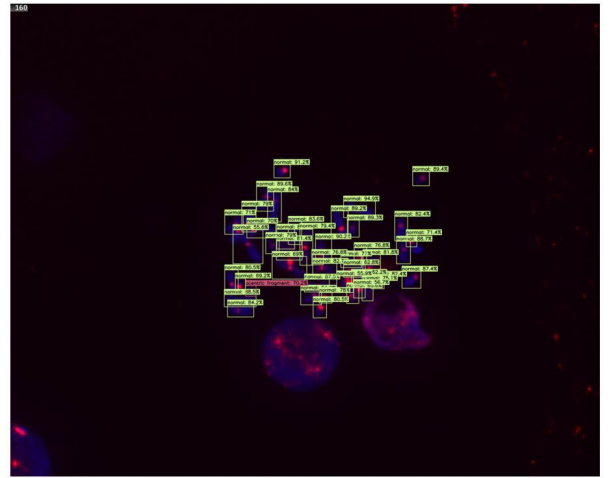
AI detection



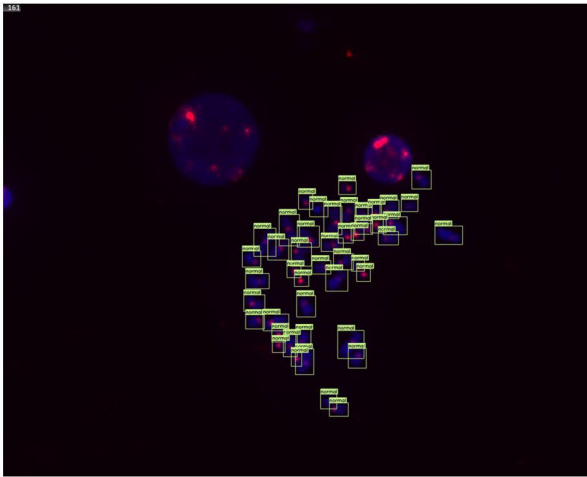
Ground truth



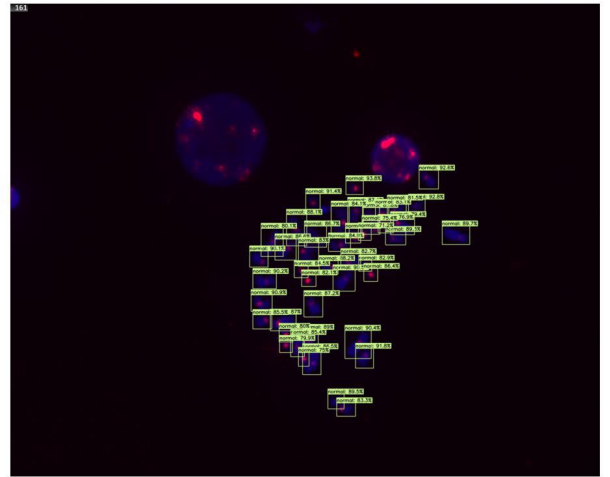
AI detection



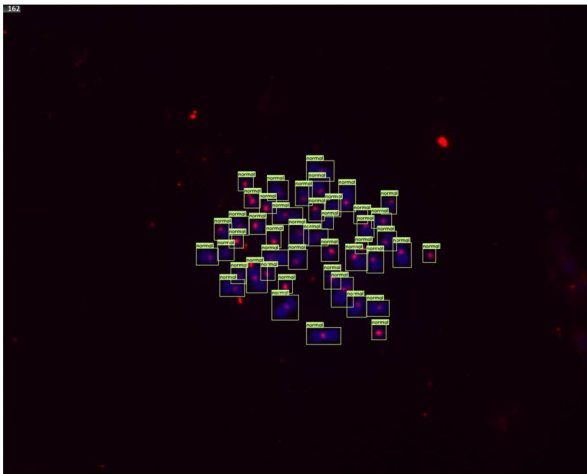
Ground truth



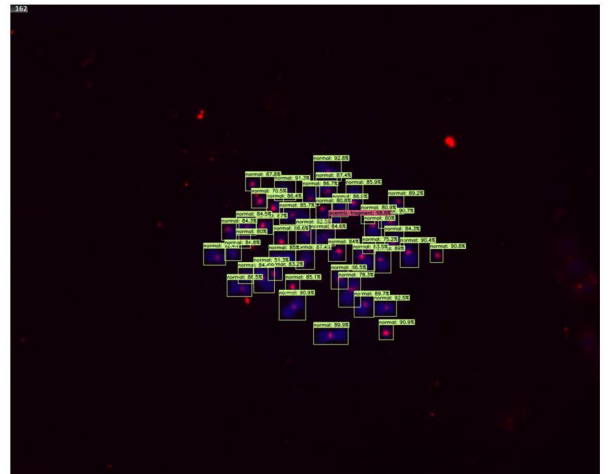
AI detection



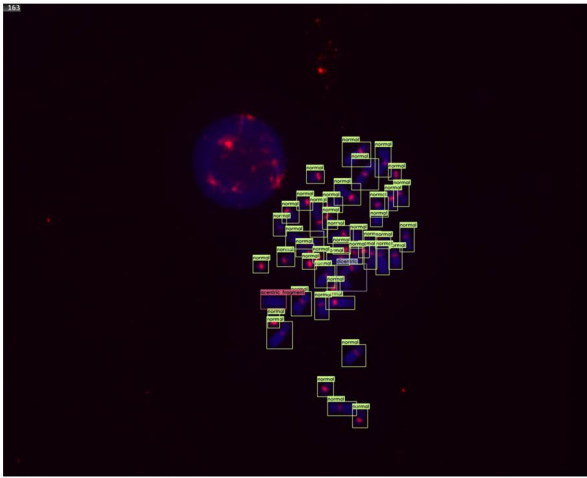
Ground truth



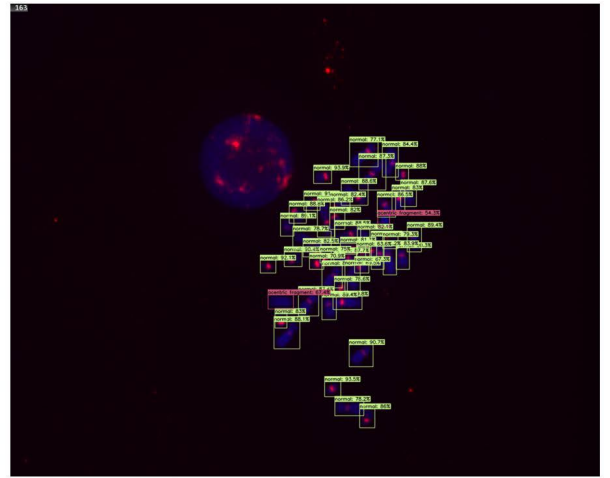
AI detection



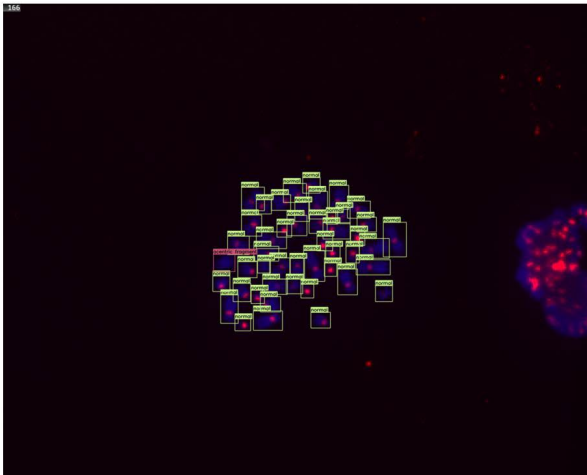
Ground truth



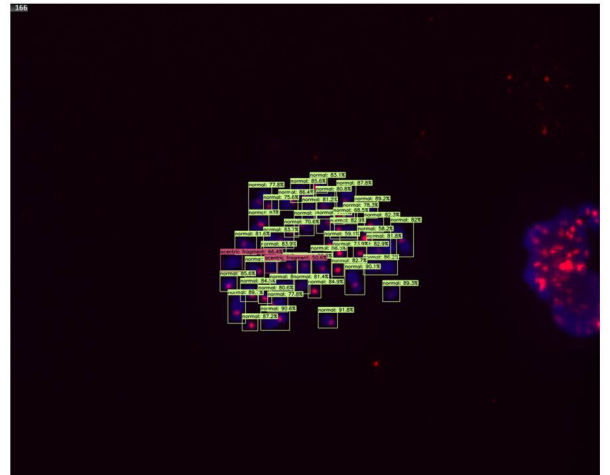
AI detection



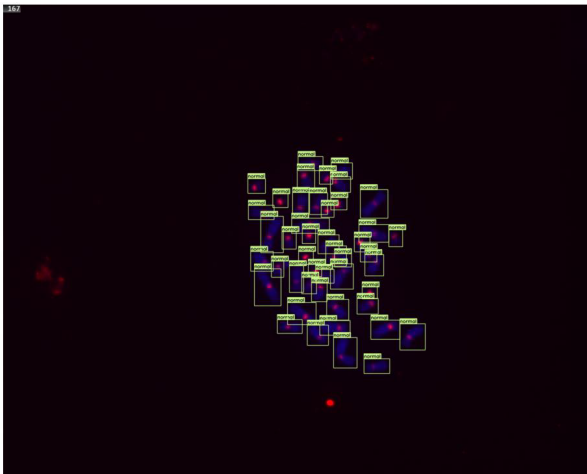
Ground truth



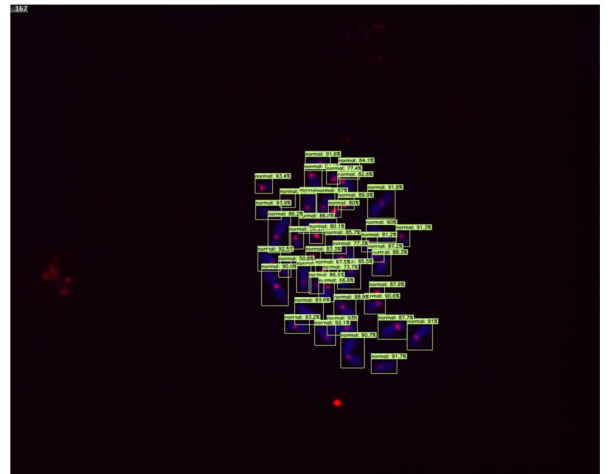
AI detection



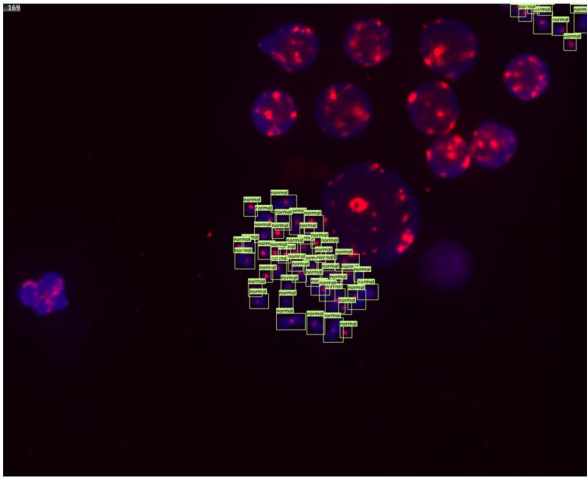
Ground truth



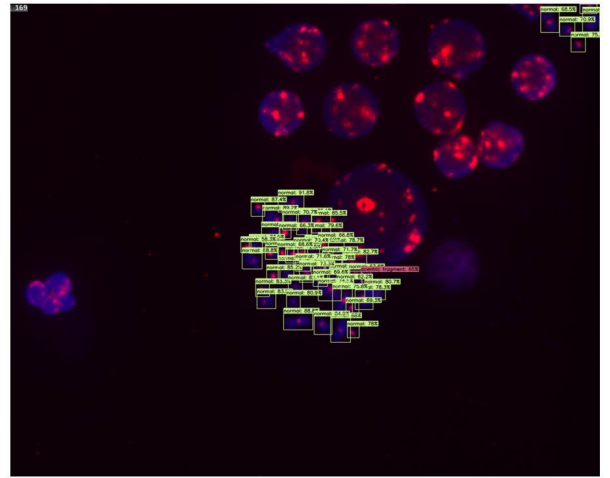
AI detection



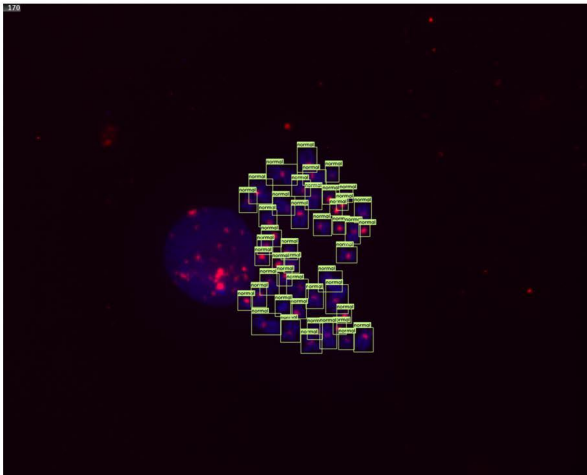
Ground truth



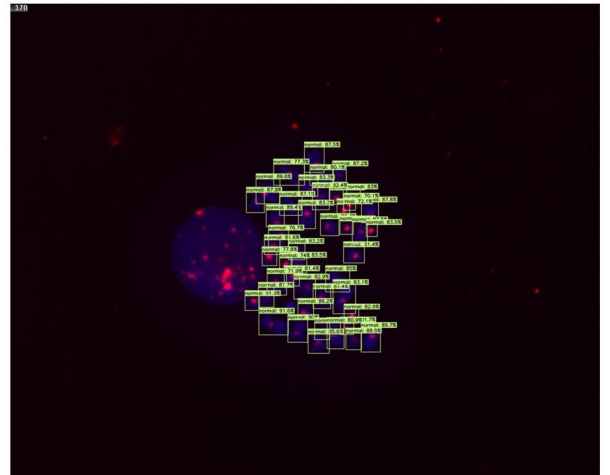
AI detection



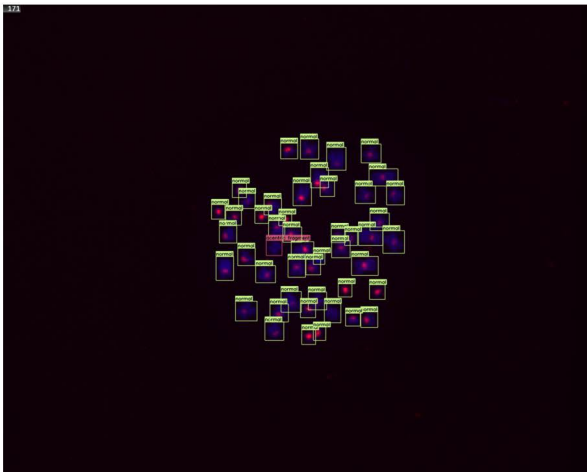
Ground truth



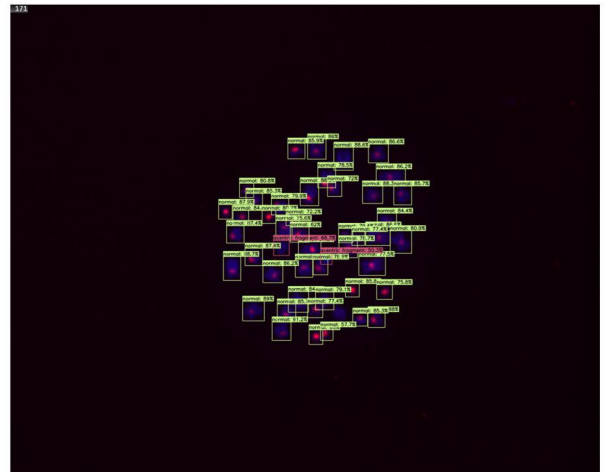
AI detection



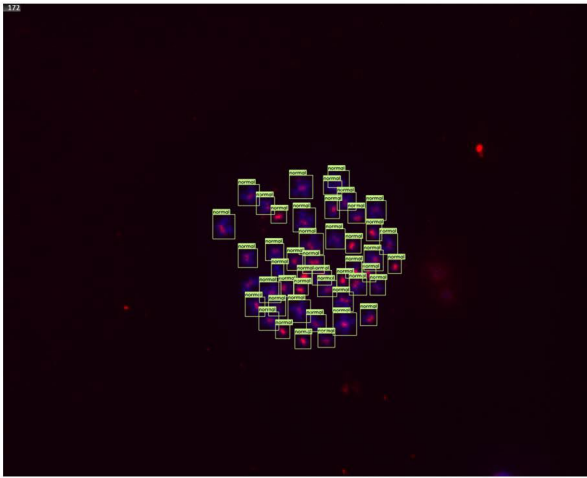
Ground truth



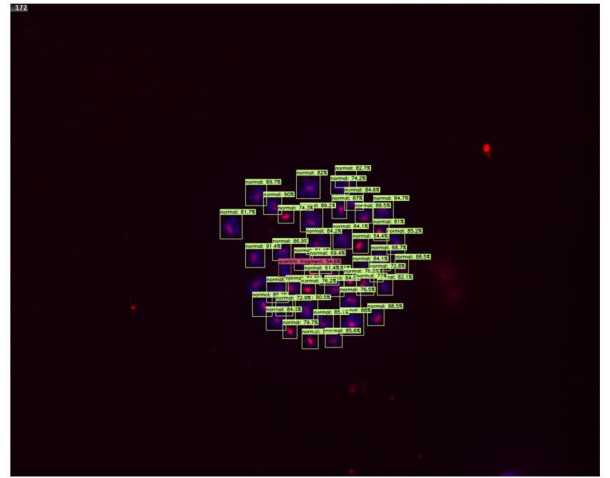
AI detection



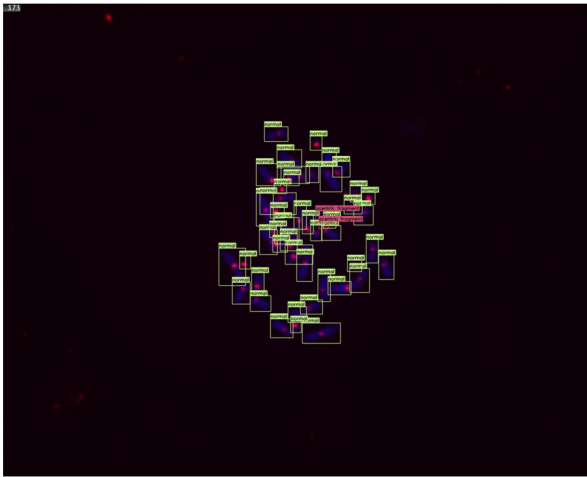
Ground truth



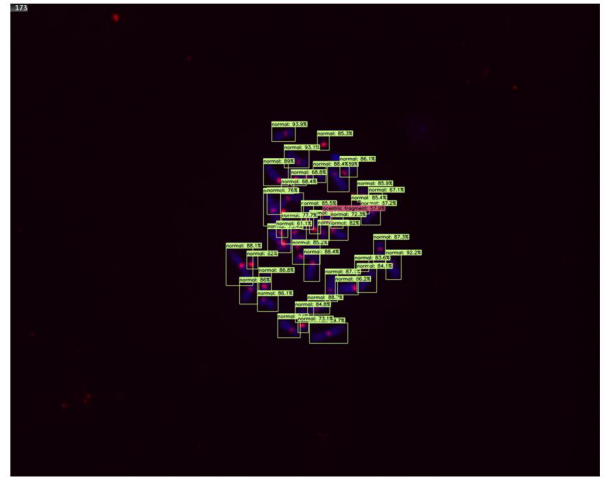
AI detection



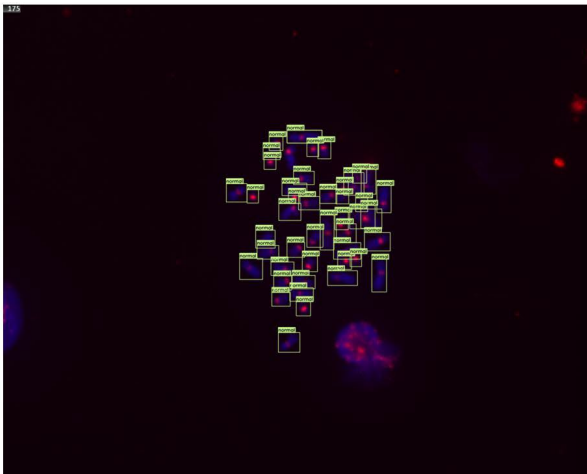
Ground truth



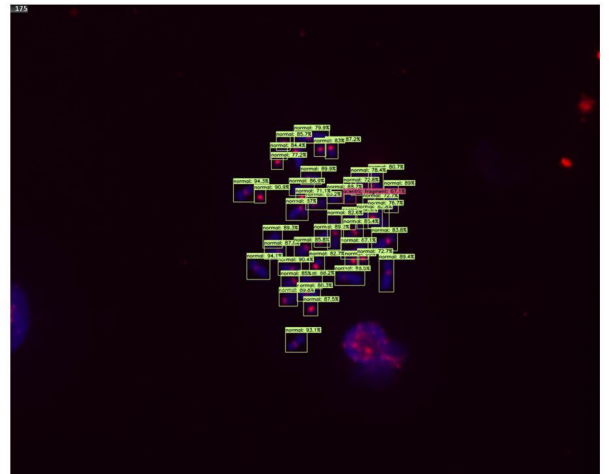
AI detection



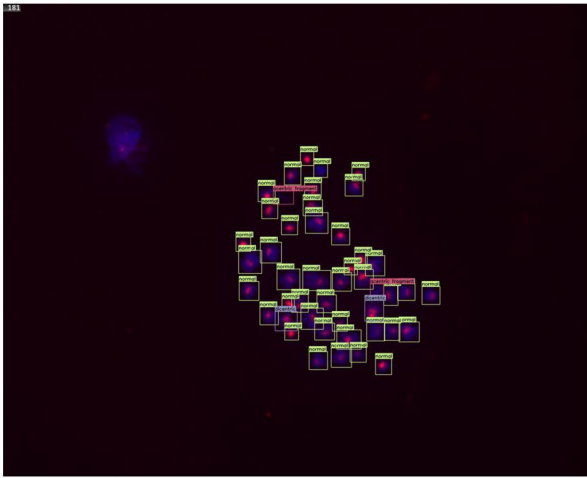
Ground truth



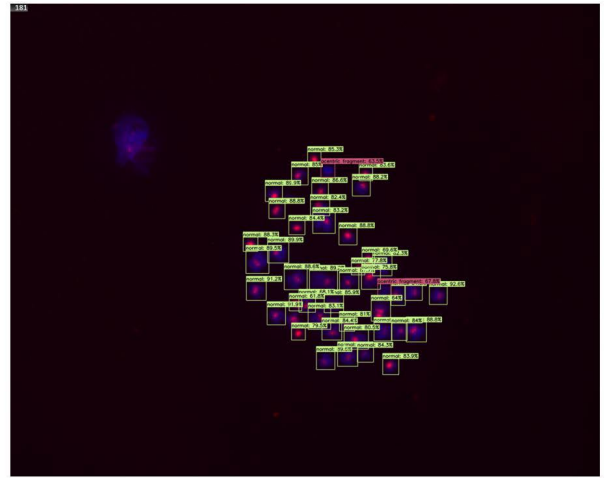
AI detection



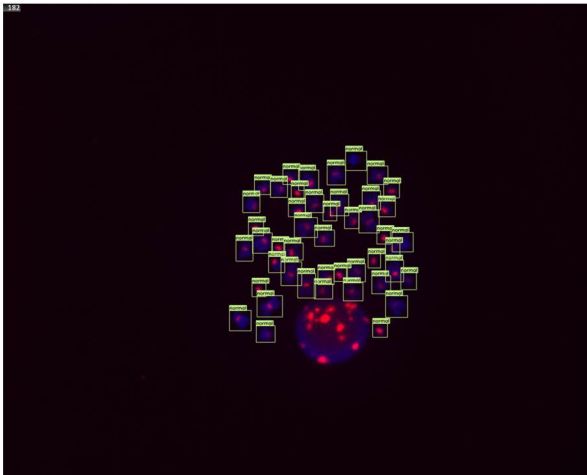
Ground truth



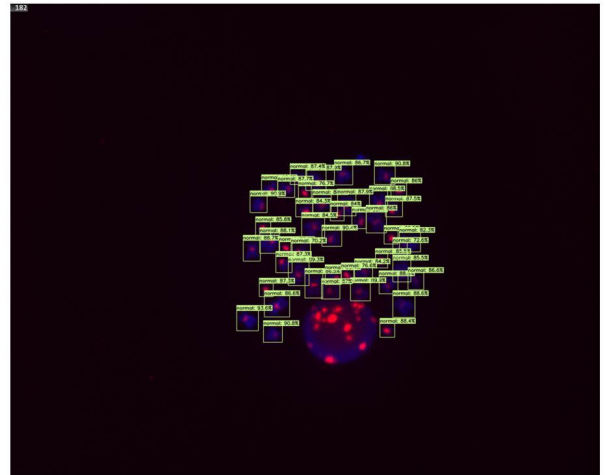
AI detection



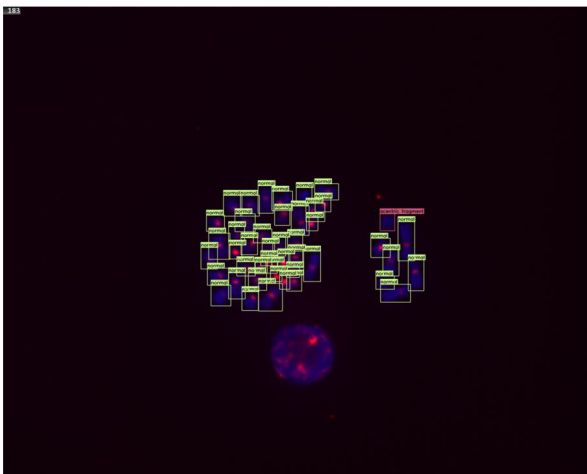
Ground truth



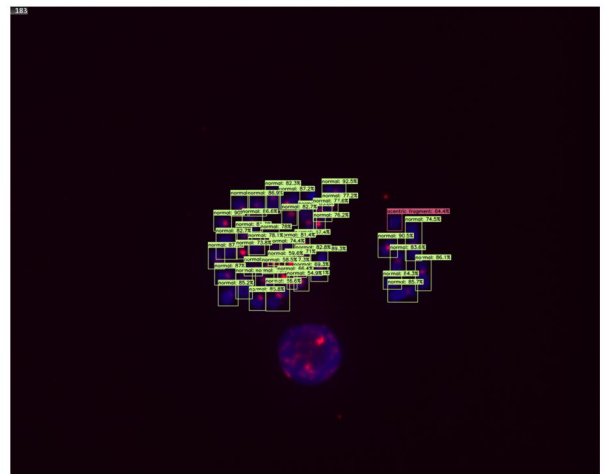
AI detection



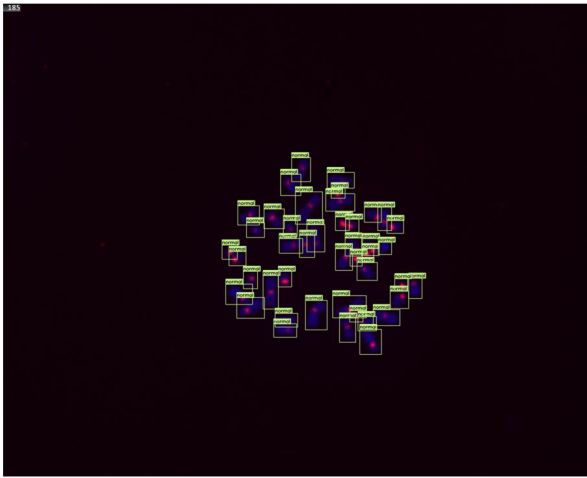
Ground truth



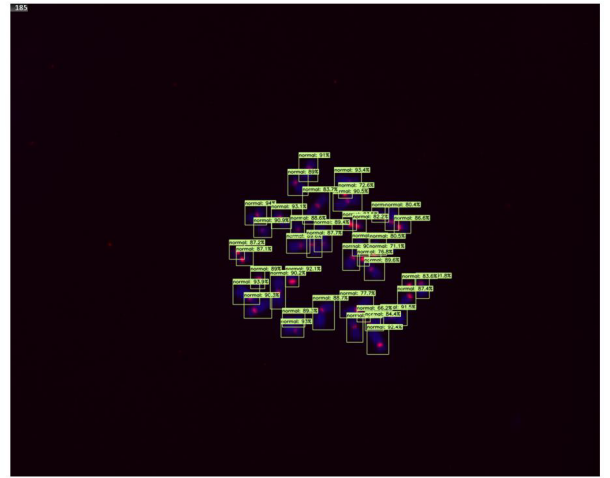
AI detection



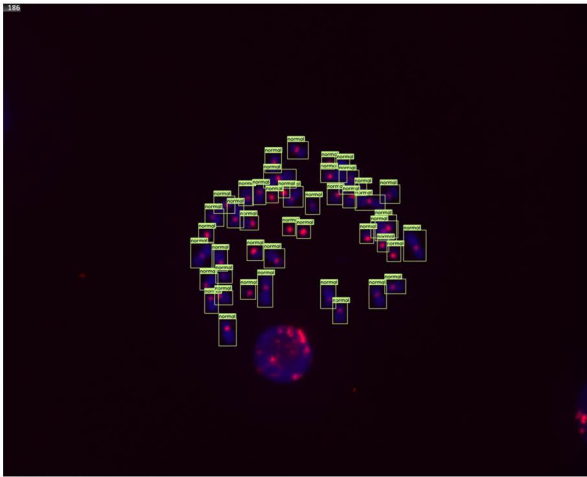
Ground truth



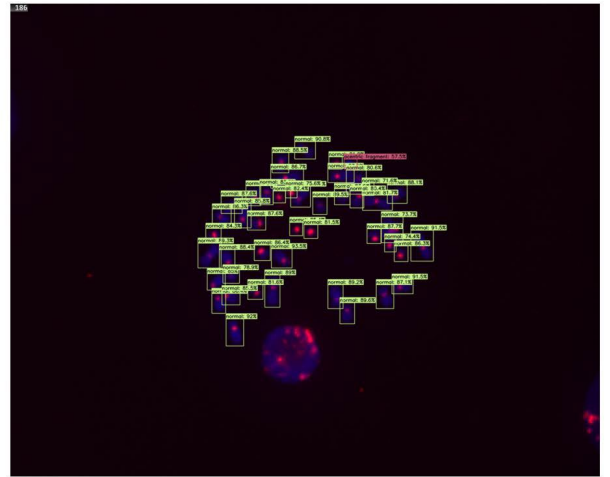
AI detection



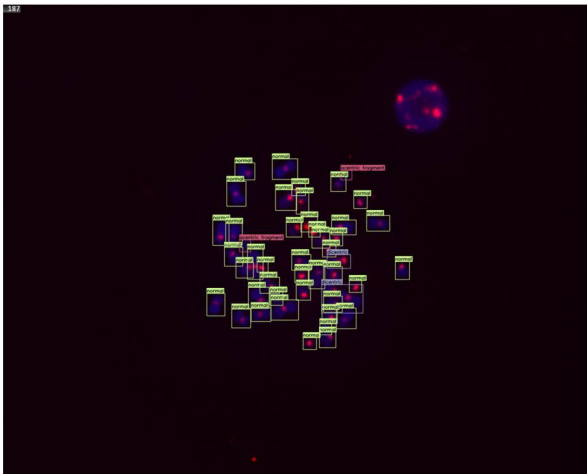
Ground truth



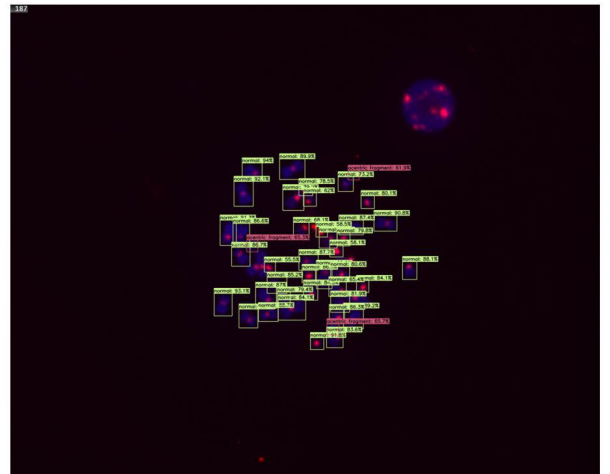
AI detection



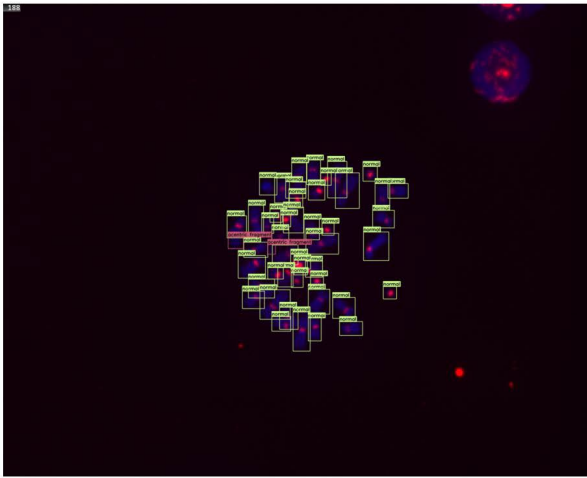
Ground truth



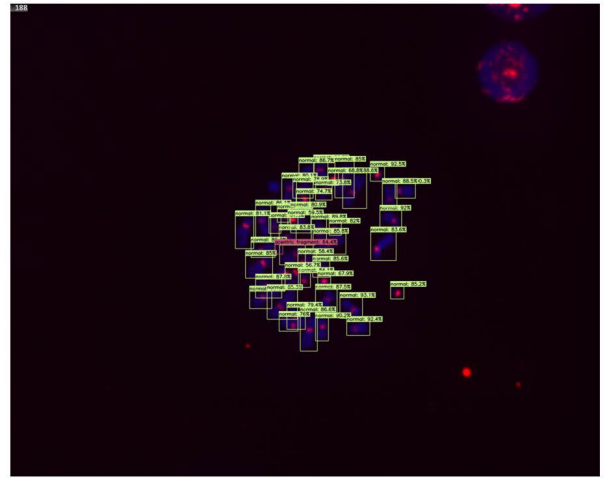
AI detection



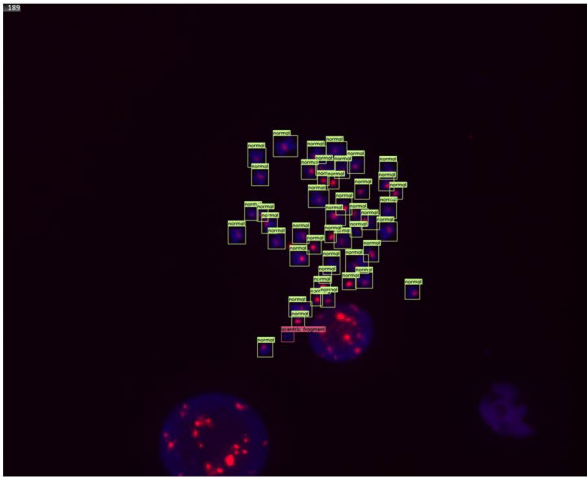
Ground truth



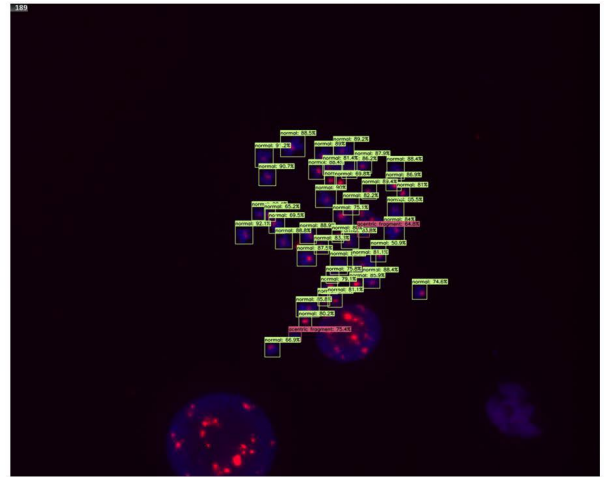
AI detection



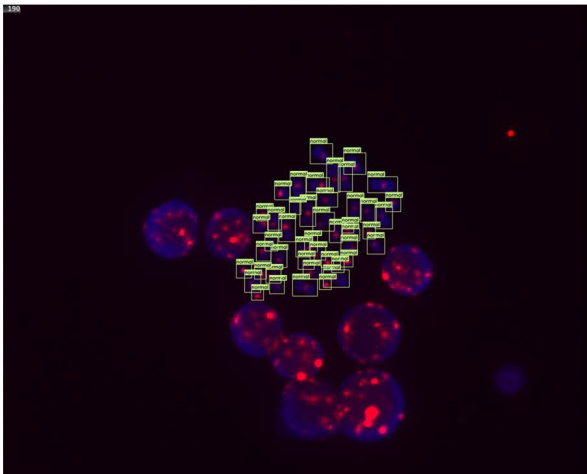
Ground truth



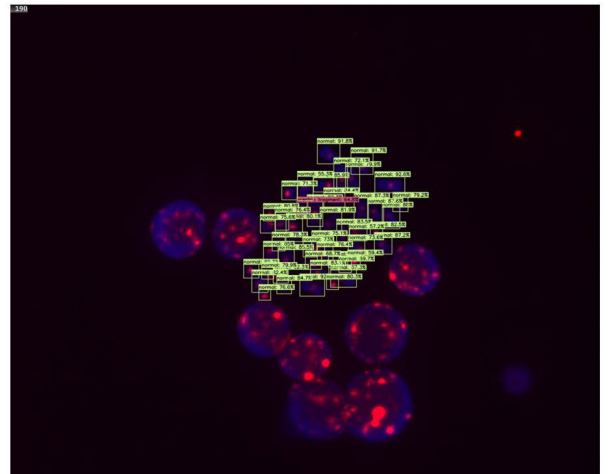
AI detection



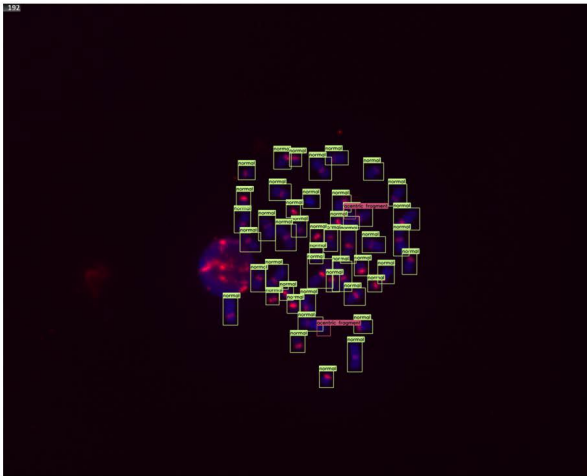
Ground truth



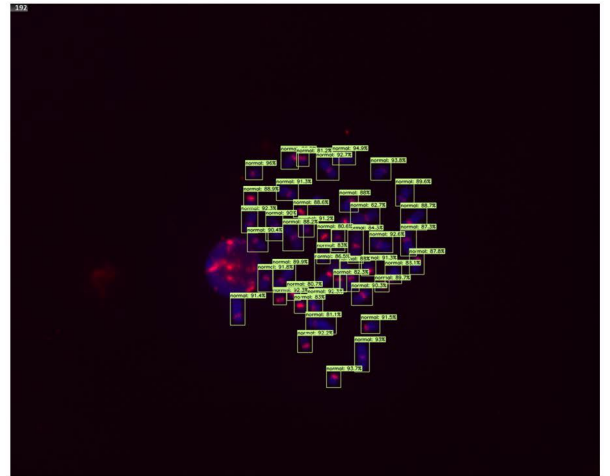
AI detection



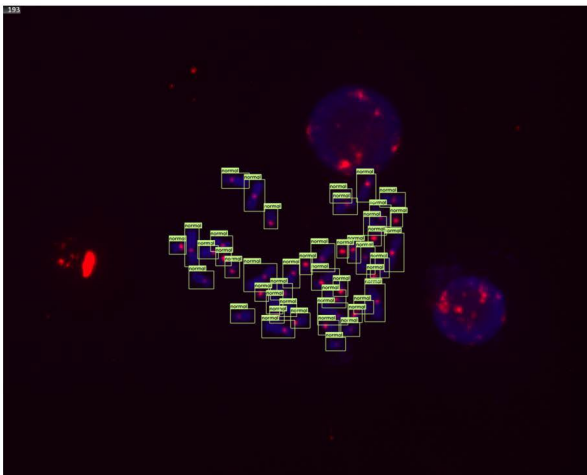
Ground truth



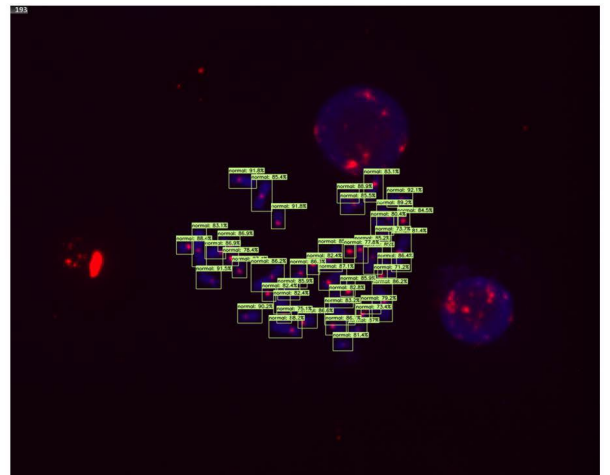
AI detection



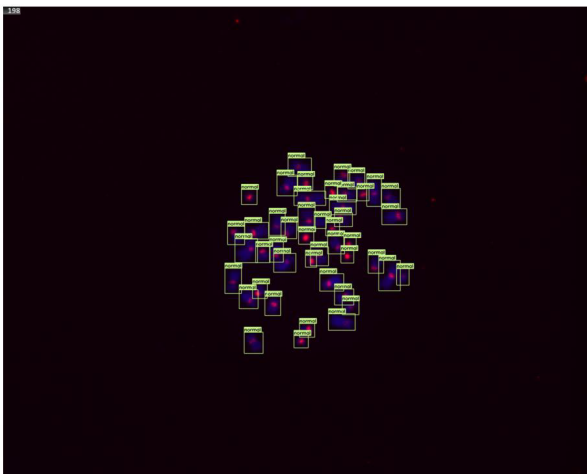
Ground truth



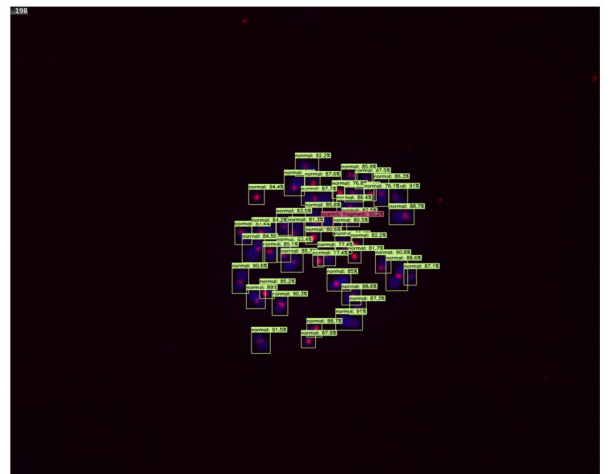
AI detection



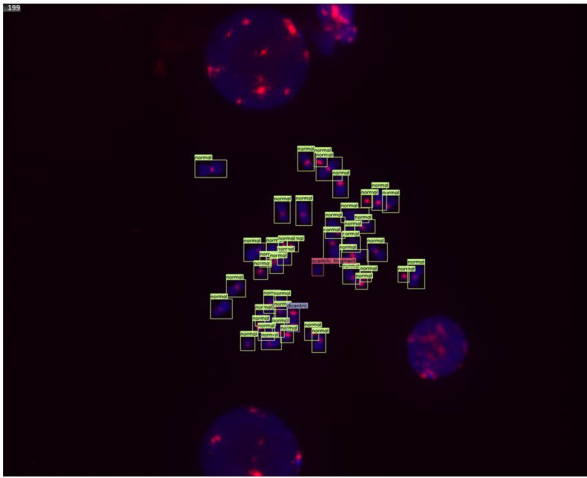
Ground truth



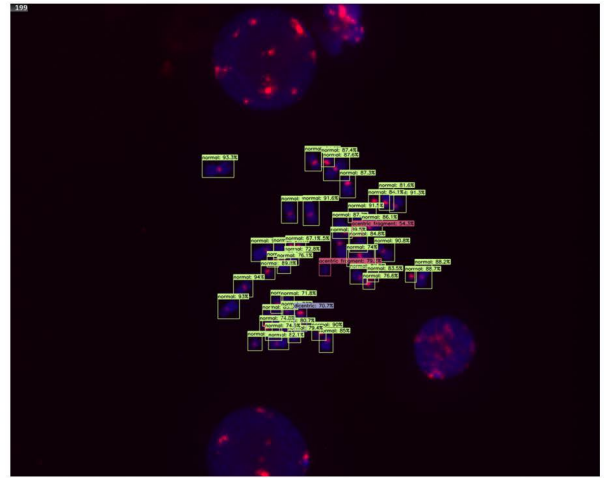
AI detection



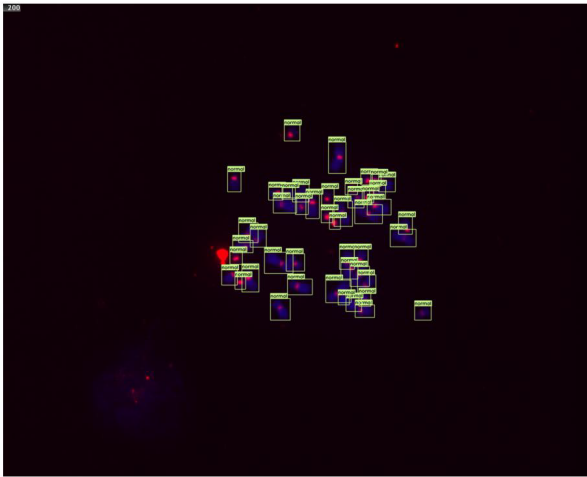
Ground truth



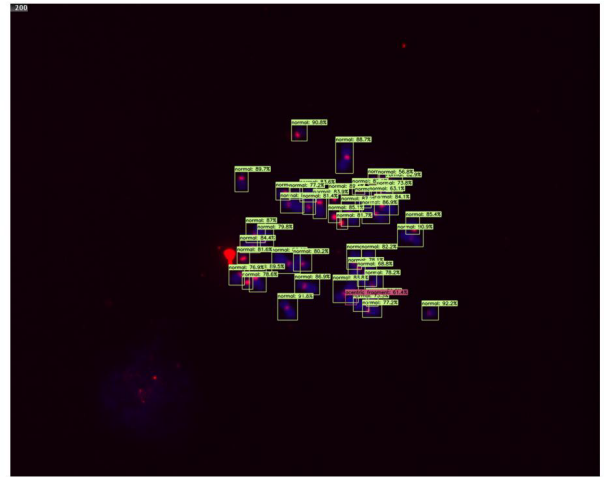
AI detection



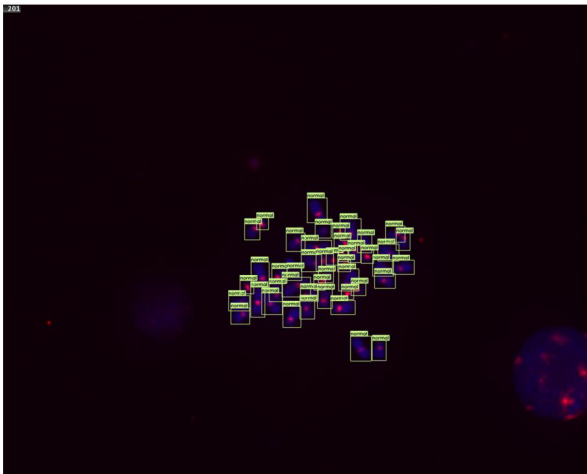
Ground truth



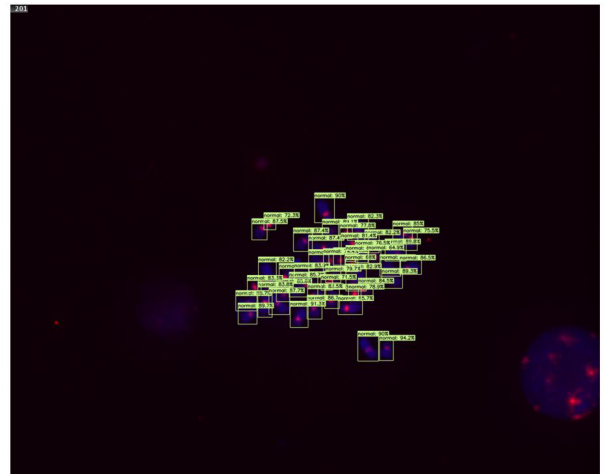
AI detection



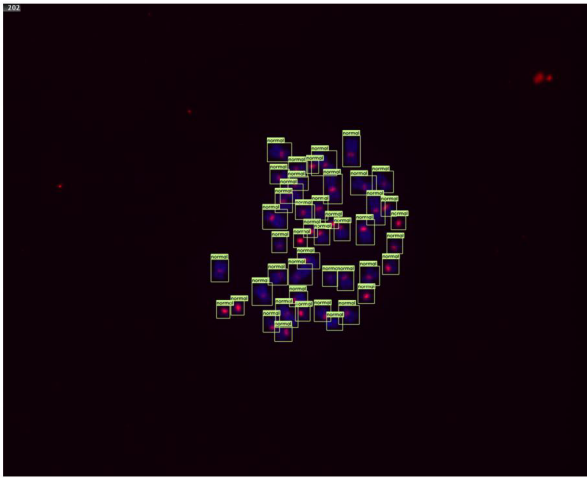
Ground truth



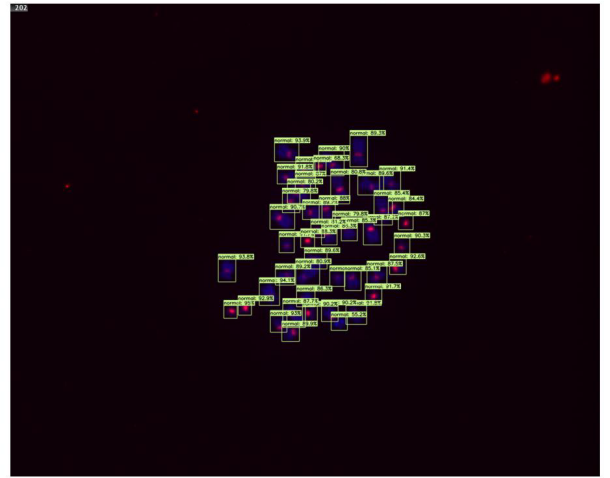
AI detection



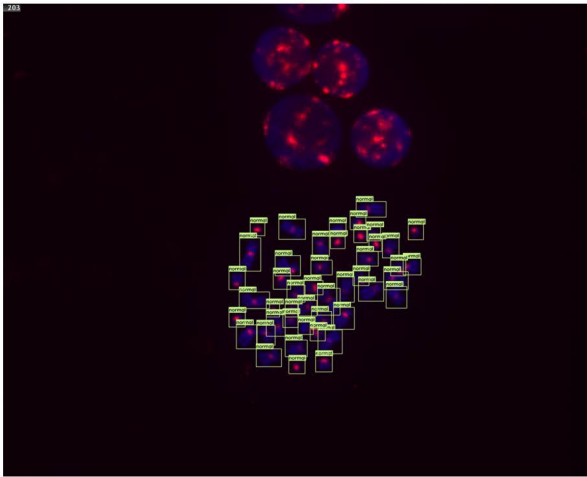
Ground truth



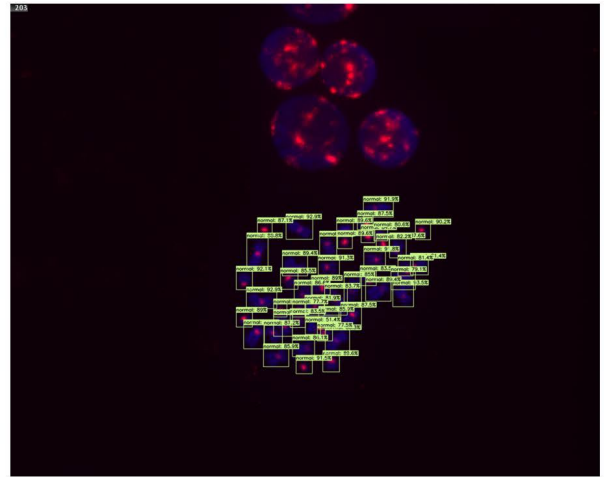
AI detection



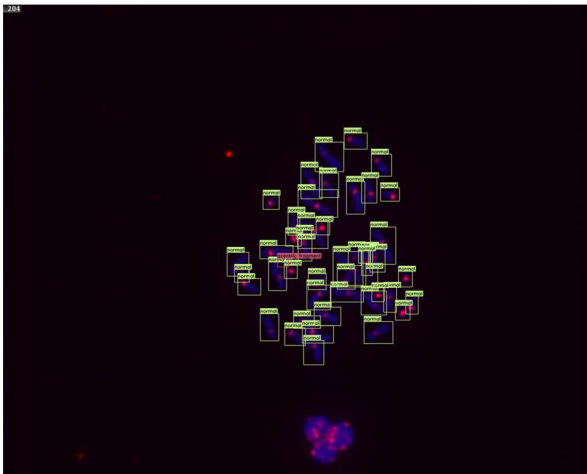
Ground truth



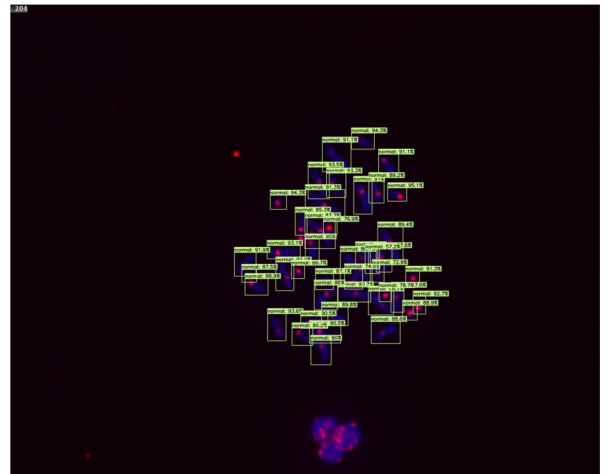
AI detection



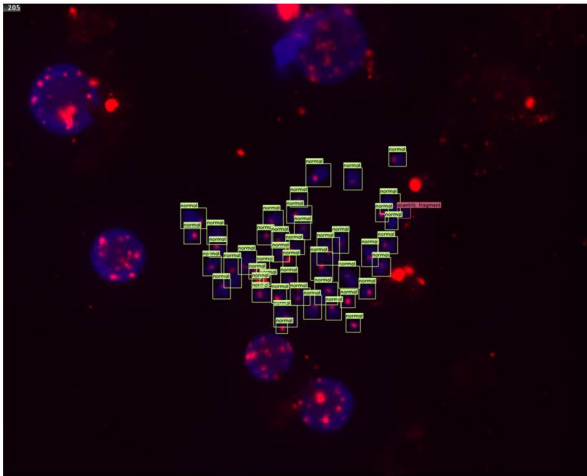
Ground truth



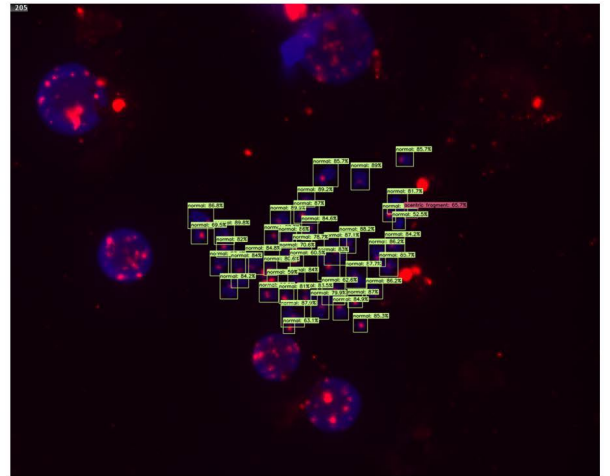
AI detection



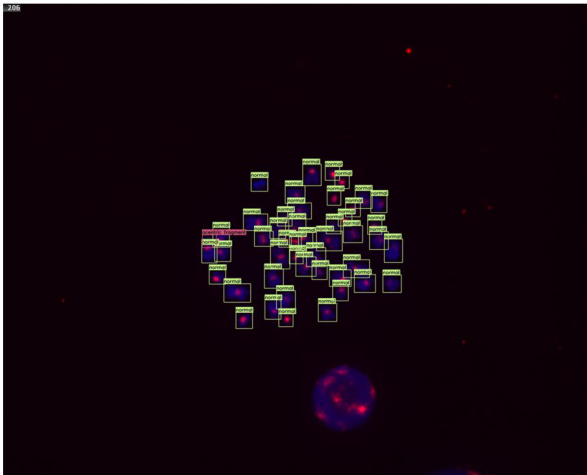
Ground truth



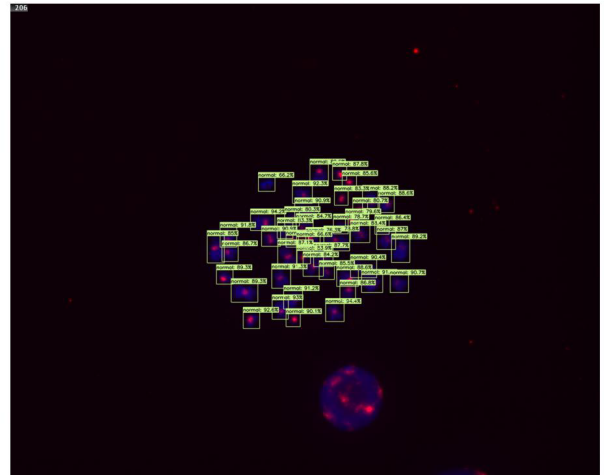
AI detection



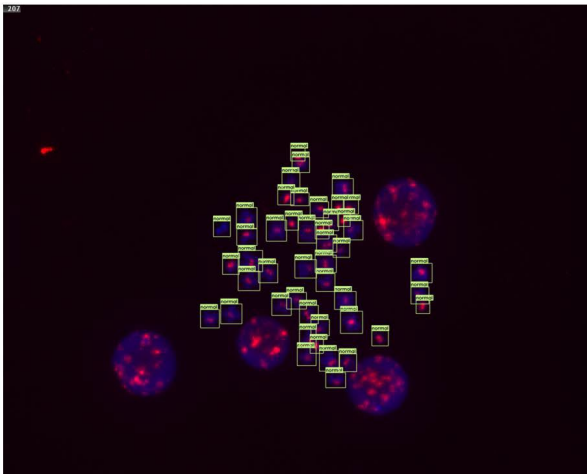
Ground truth



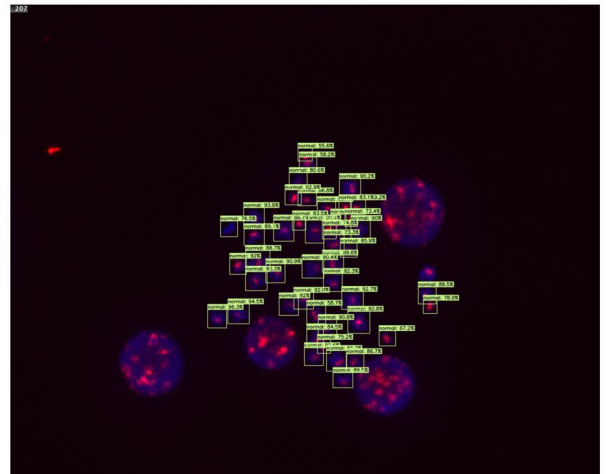
AI detection



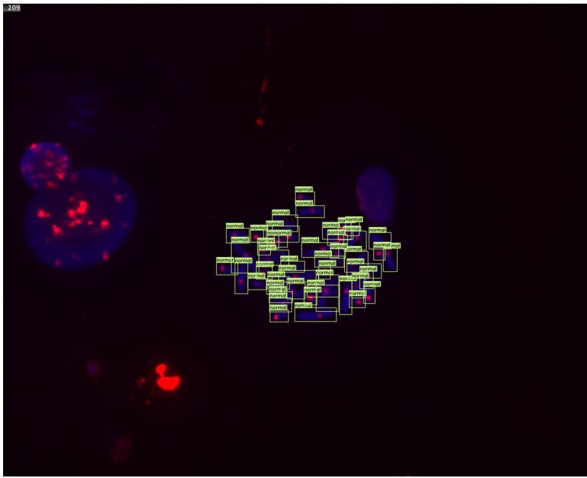
Ground truth



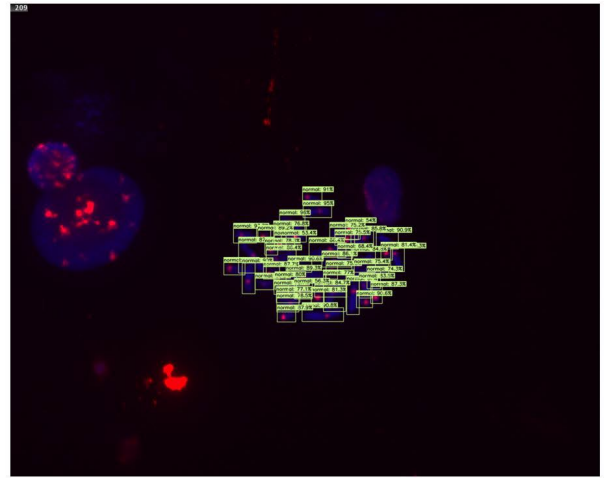
AI detection



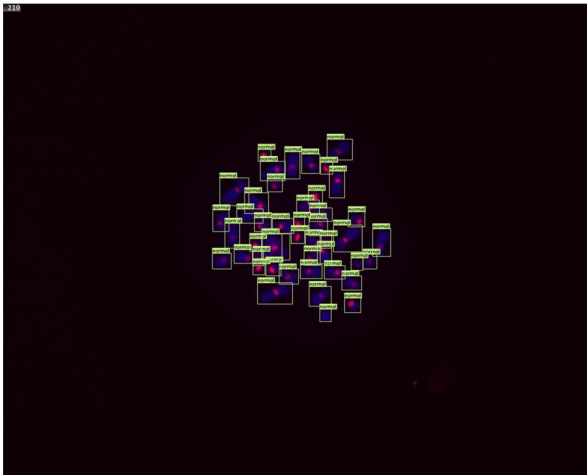
Ground truth



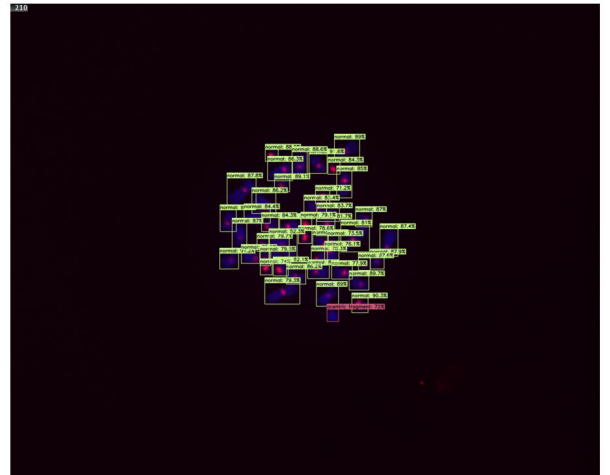
AI detection



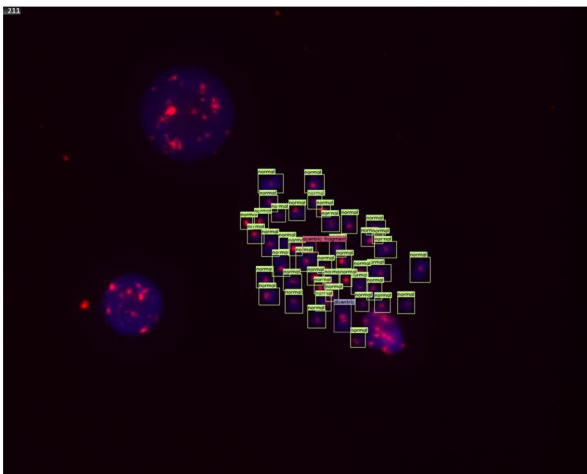
Ground truth



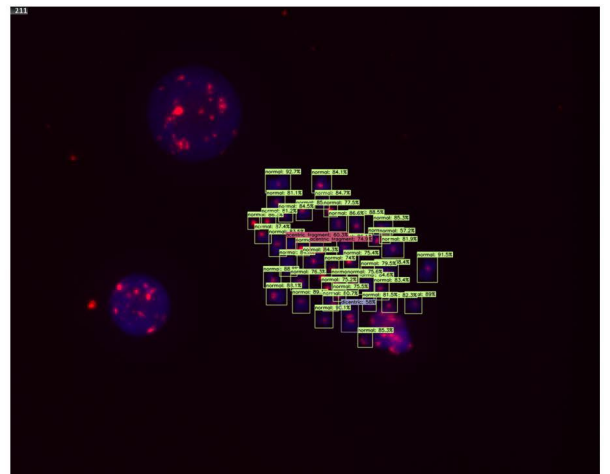
AI detection



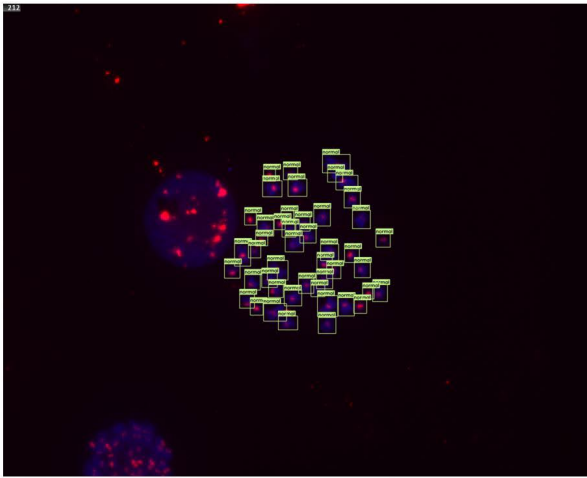
Ground truth



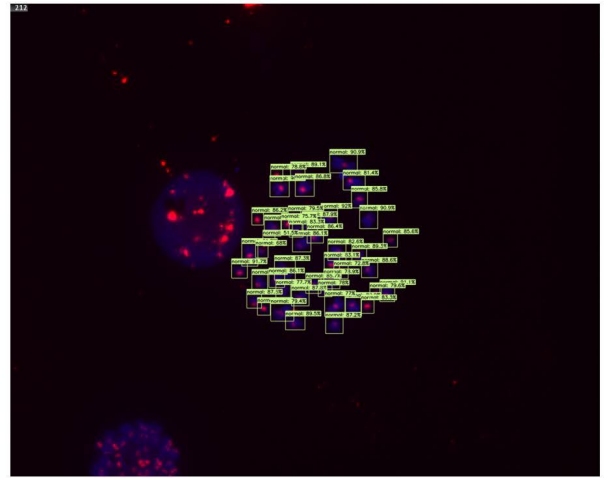
AI detection



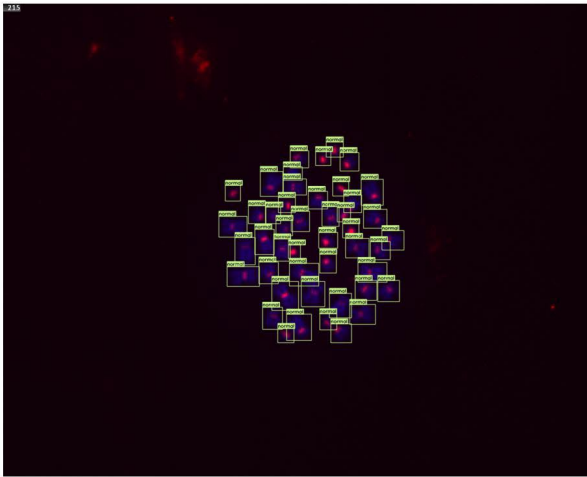
Ground truth



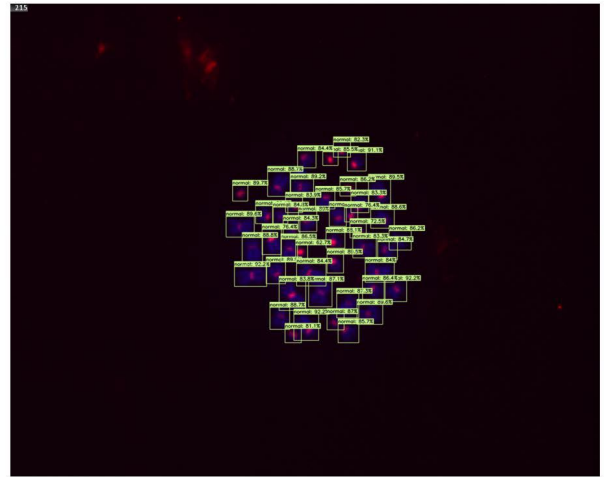
AI detection



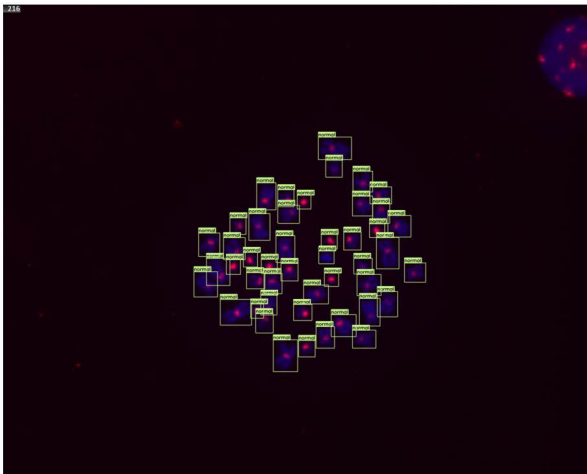
Ground truth



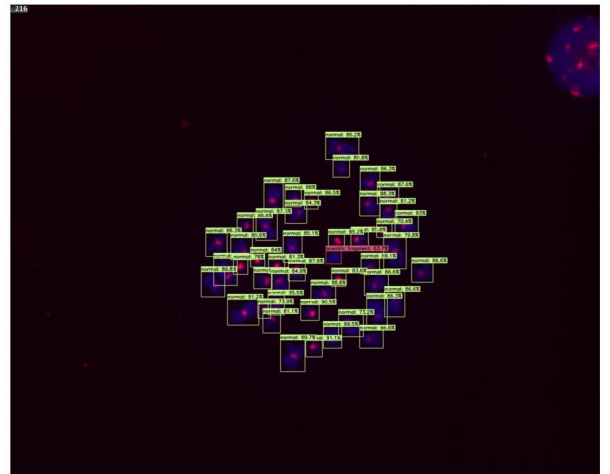
AI detection



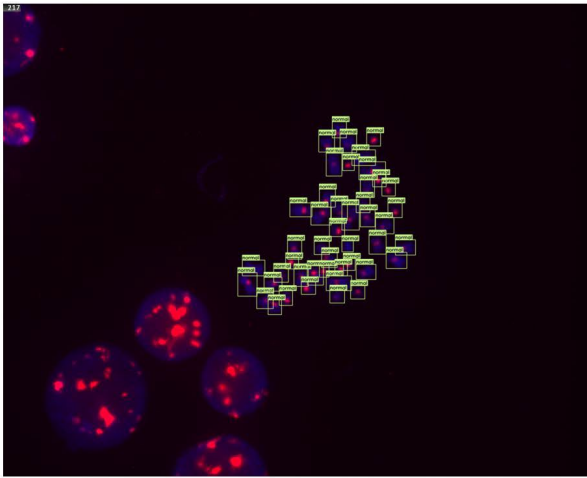
Ground truth



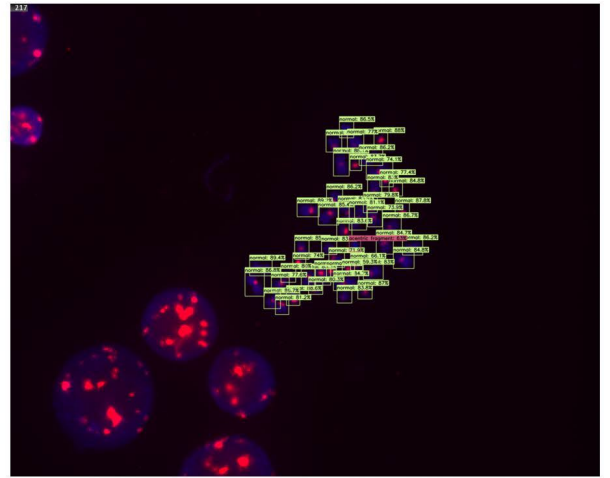
AI detection



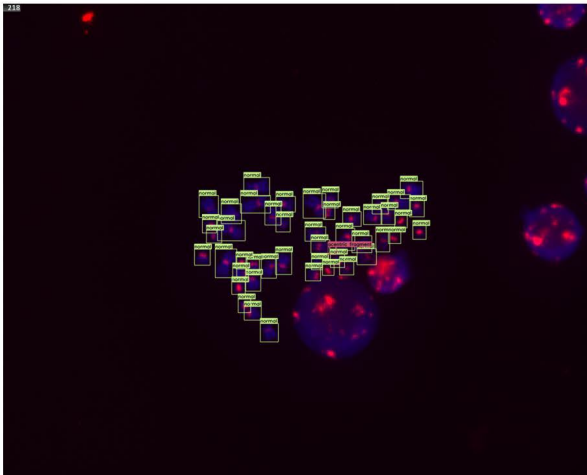
Ground truth



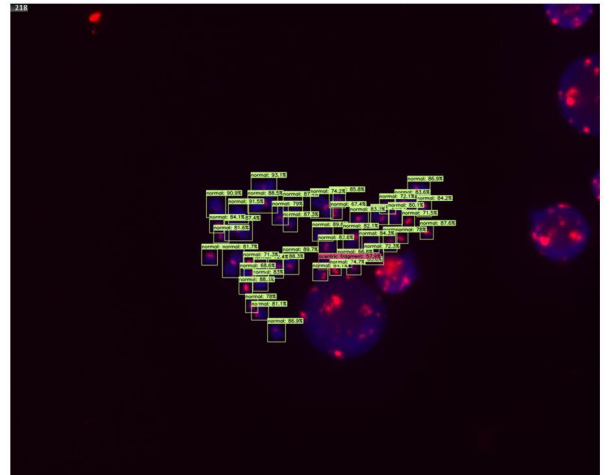
AI detection



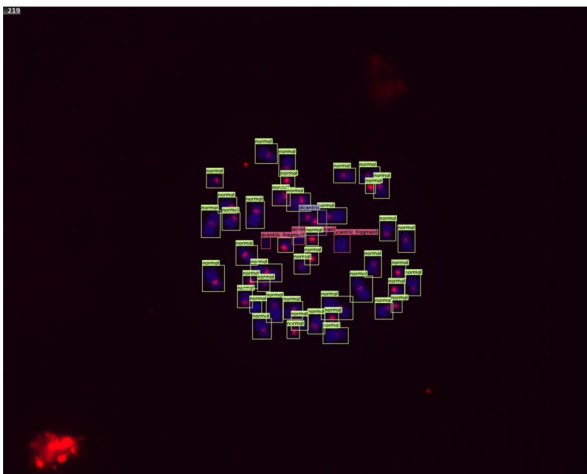
Ground truth



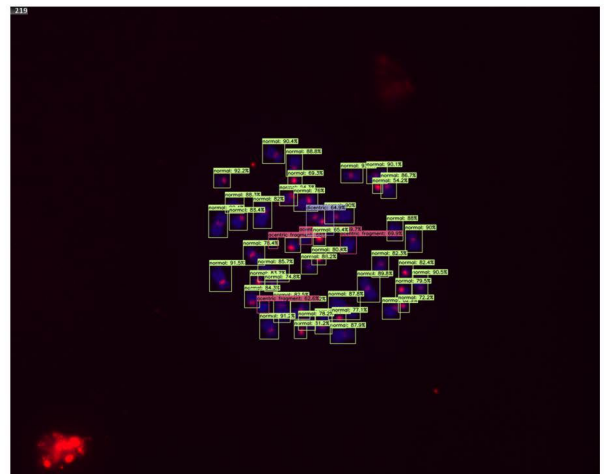
AI detection



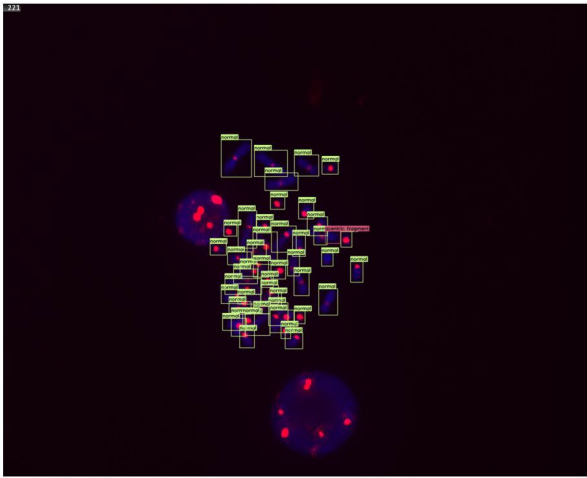
Ground truth



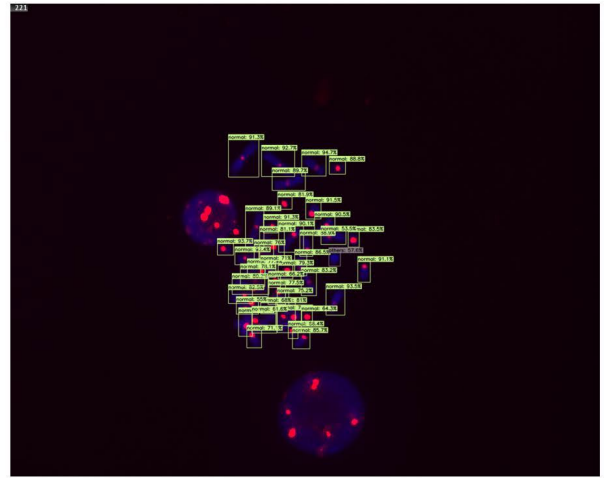
AI detection



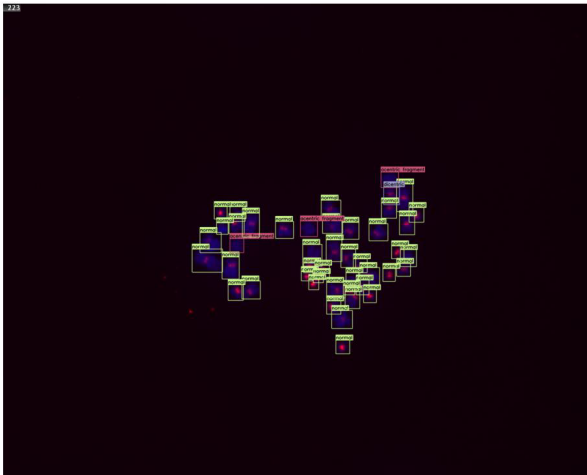
Ground truth



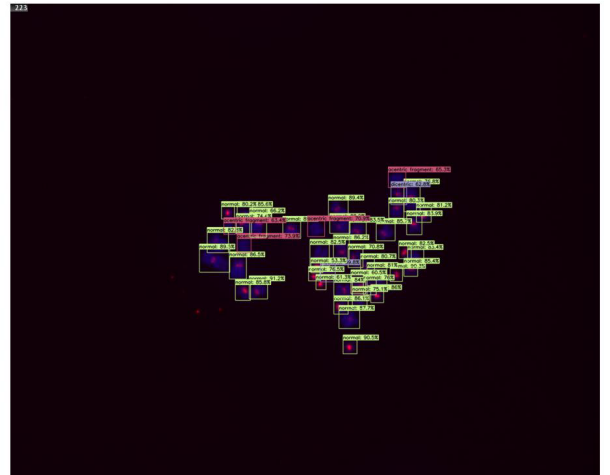
AI detection



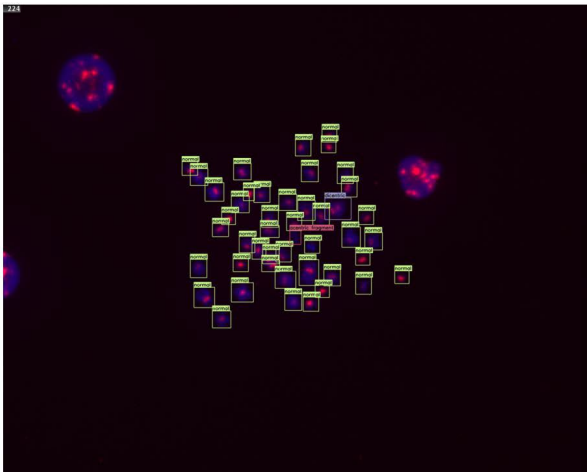
Ground truth



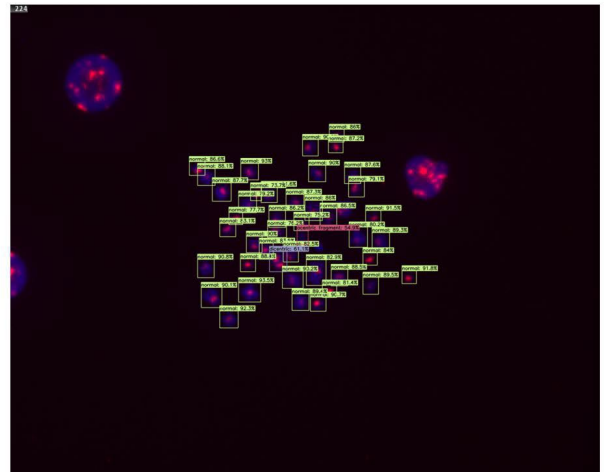
AI detection



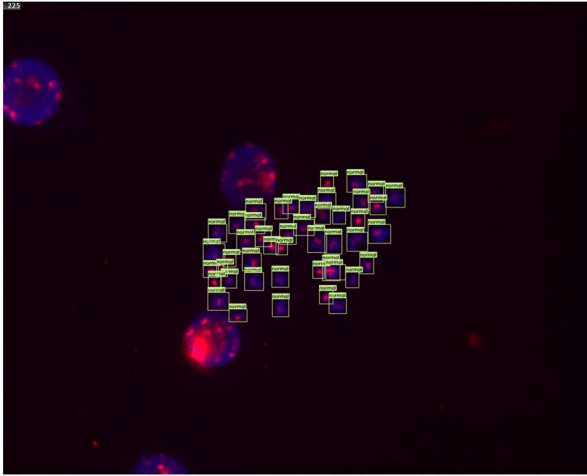
Ground truth



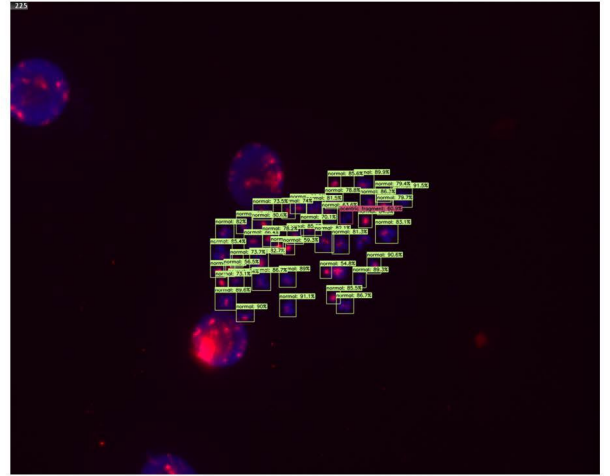
AI detection



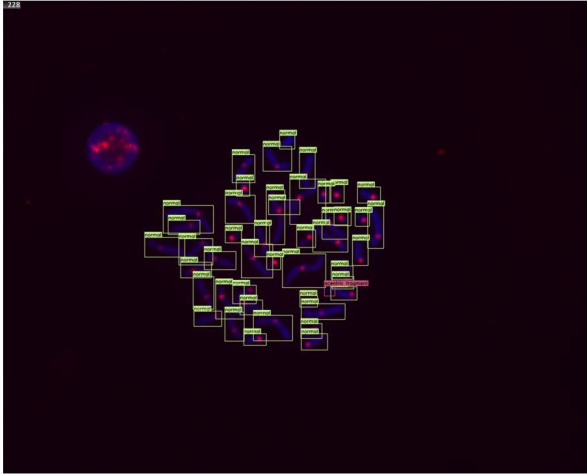
Ground truth



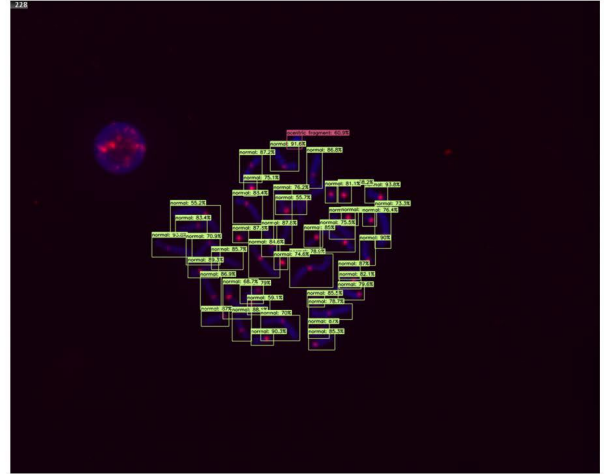
AI detection



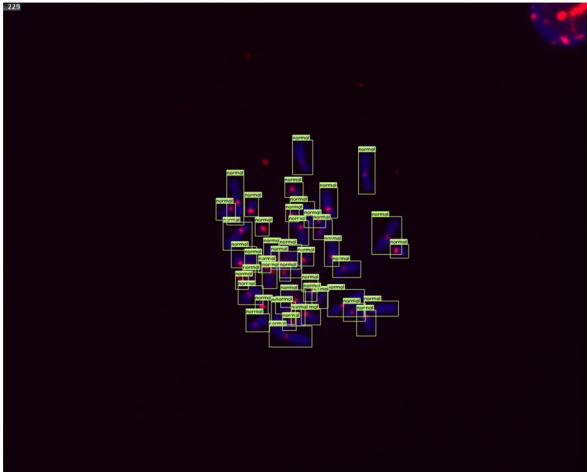
Ground truth



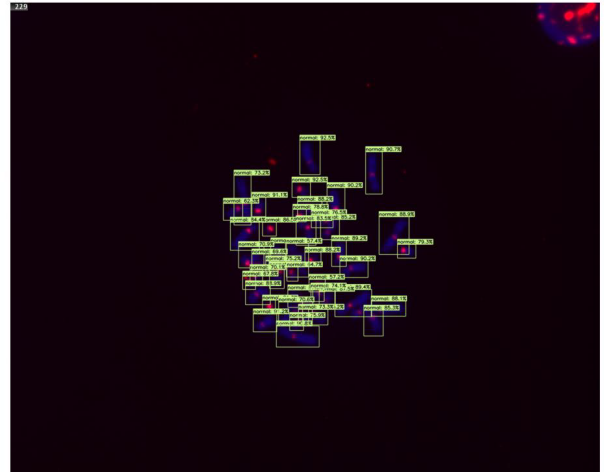
AI detection



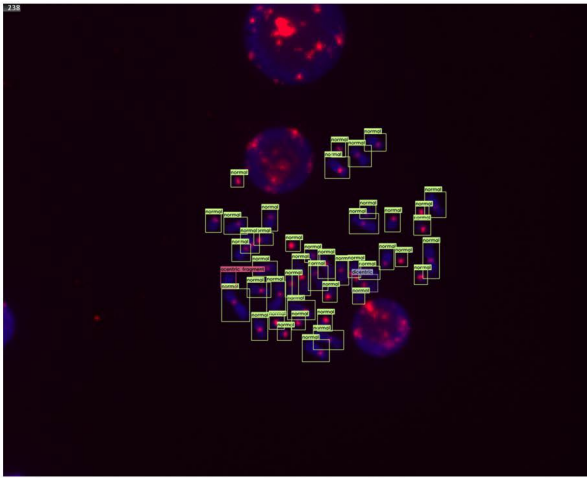
Ground truth



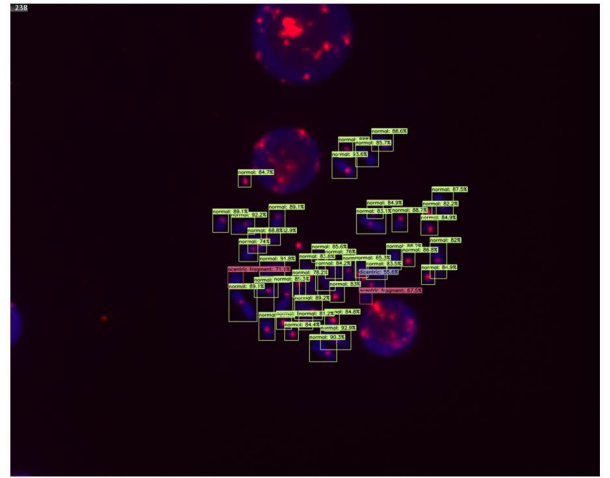
AI detection



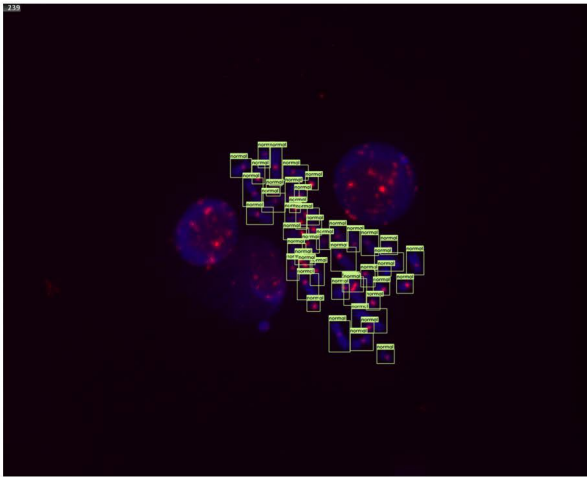
Ground truth



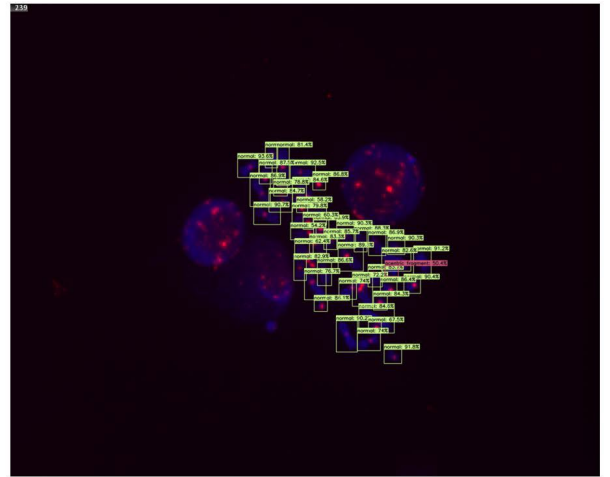
AI detection



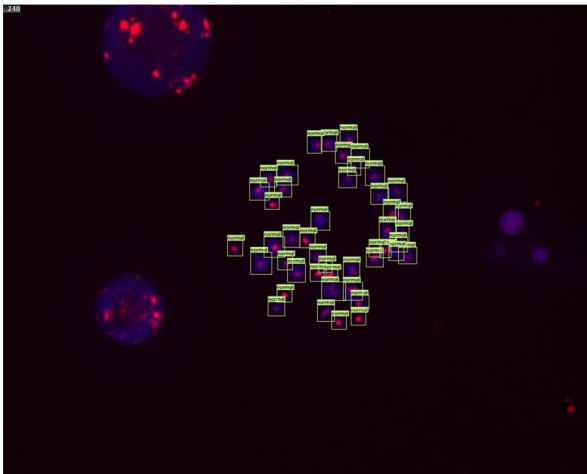
Ground truth



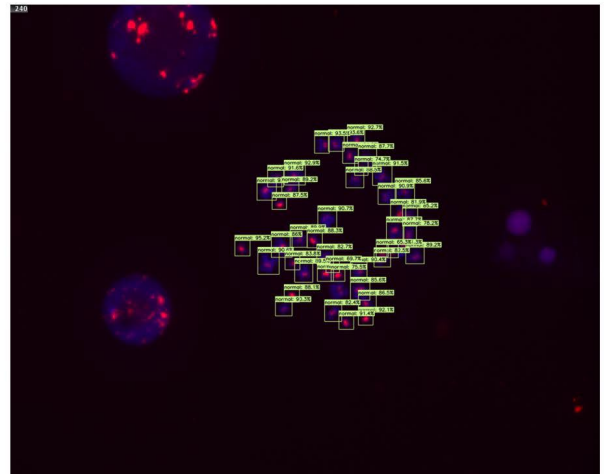
AI detection



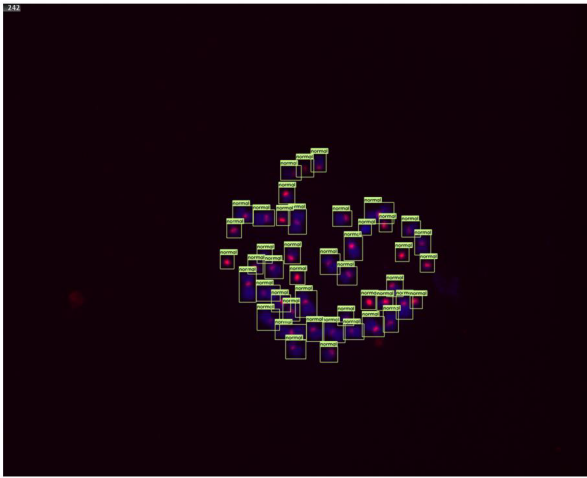
Ground truth



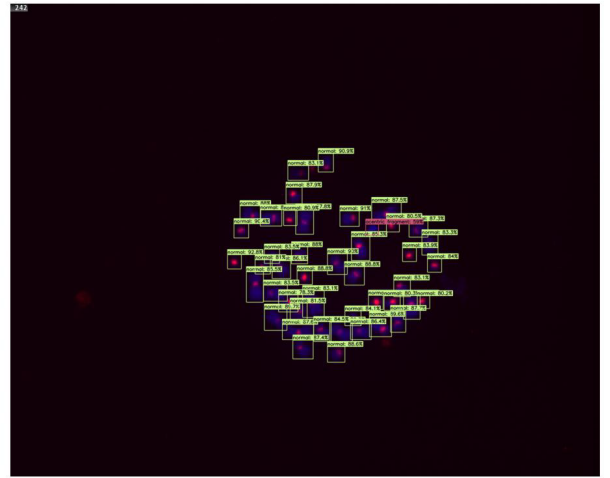
AI detection



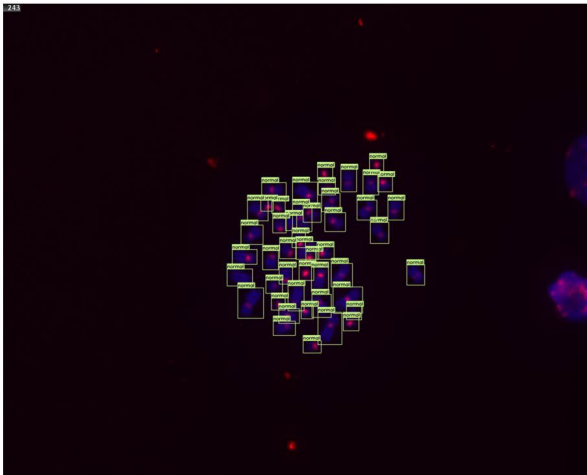
Ground truth



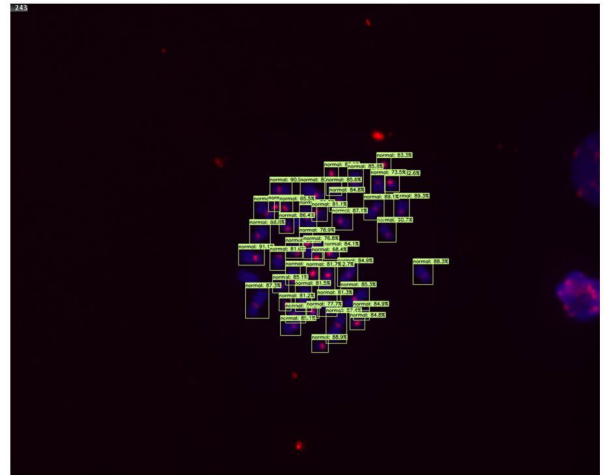
AI detection



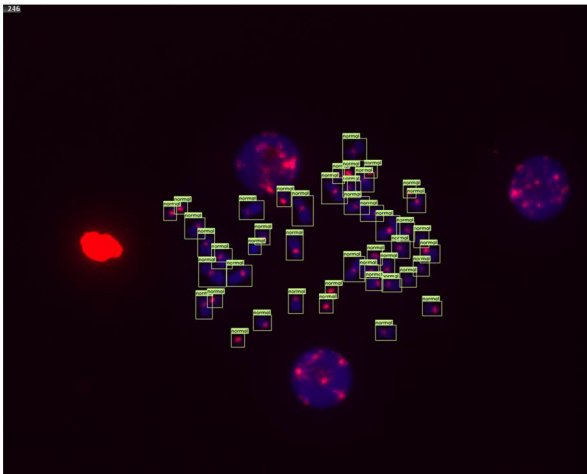
Ground truth



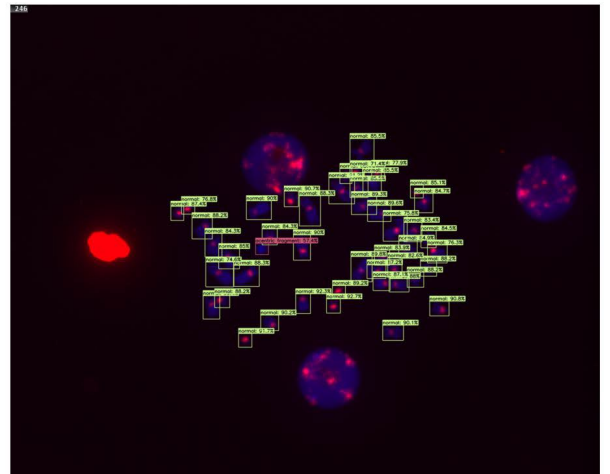
AI detection



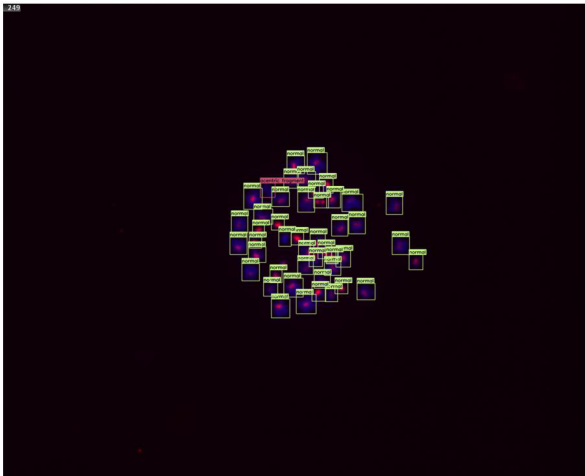
Ground truth



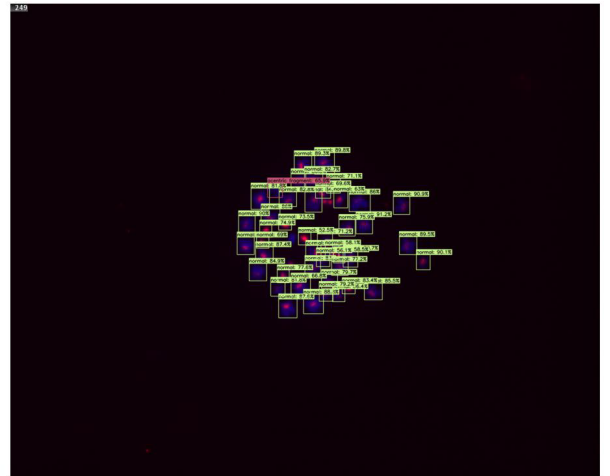
AI detection



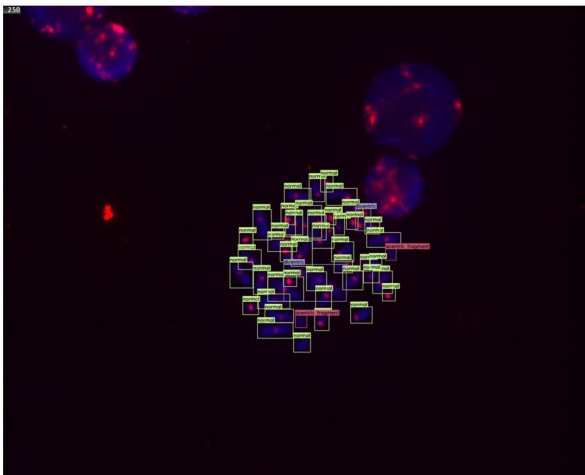
Ground truth



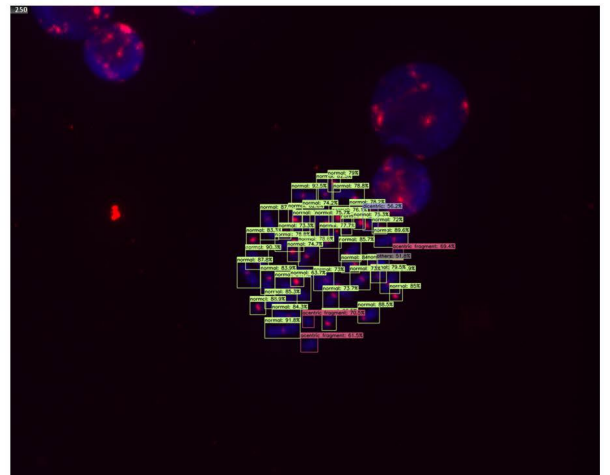
AI detection



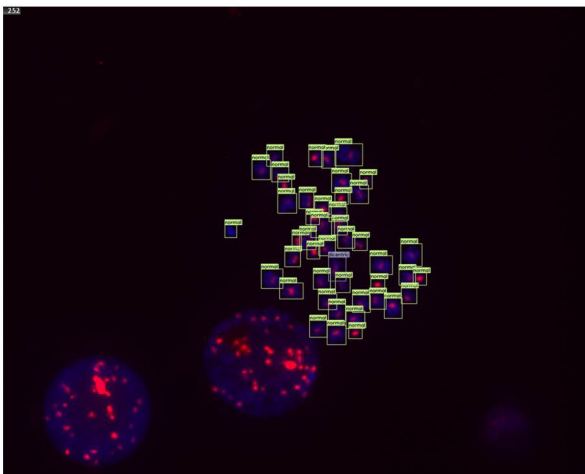
Ground truth



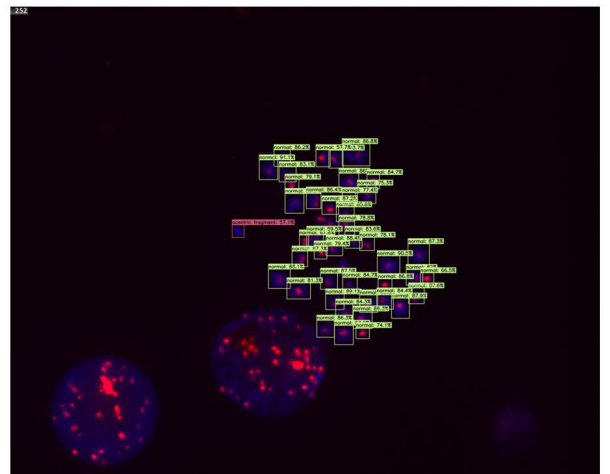
AI detection



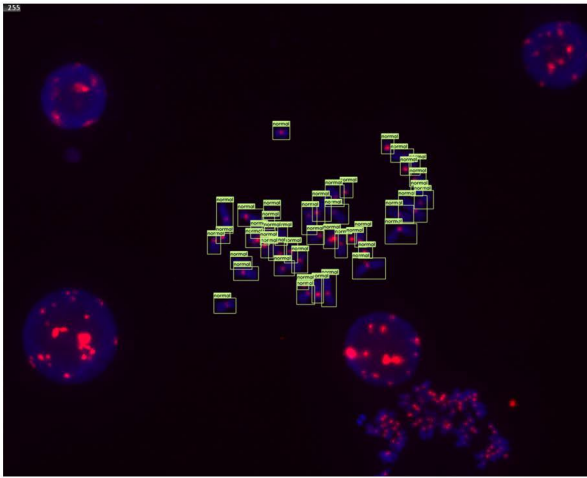
Ground truth



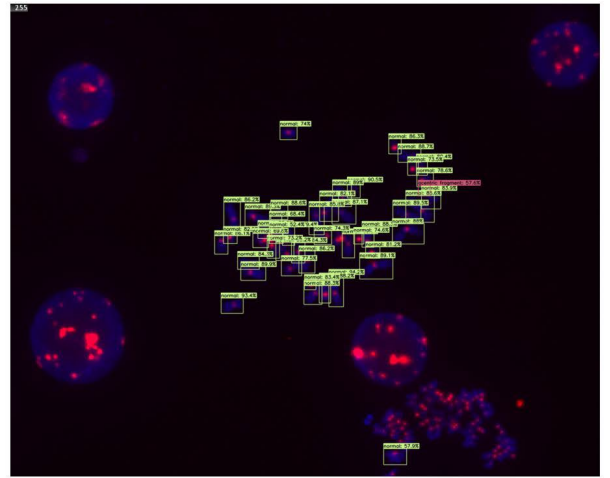
AI detection



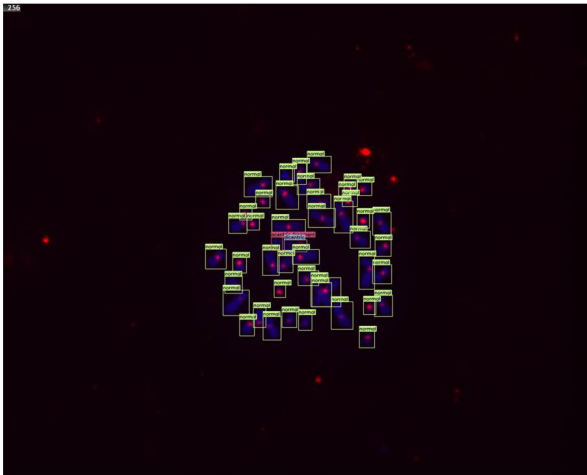
Ground truth



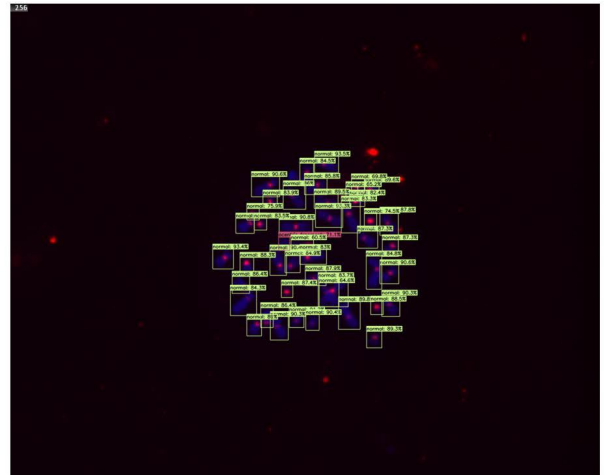
AI detection



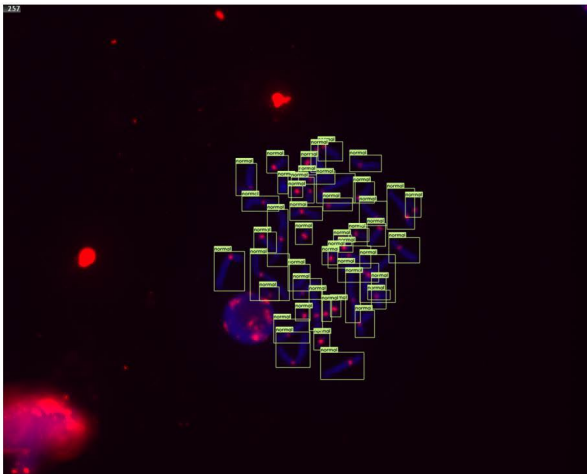
Ground truth



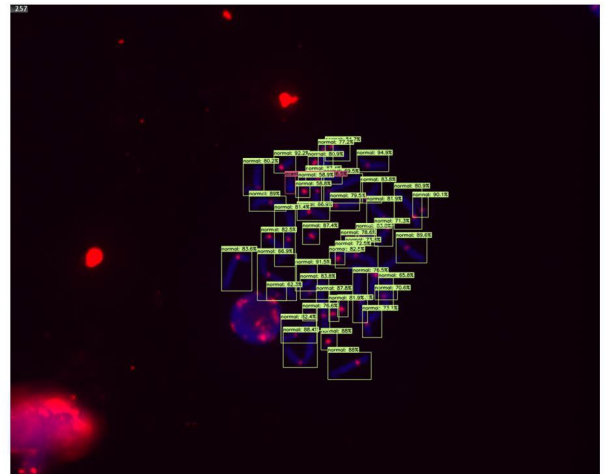
AI detection



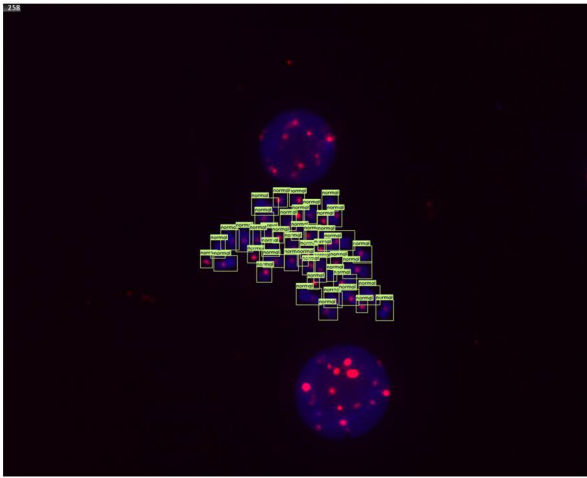
Ground truth



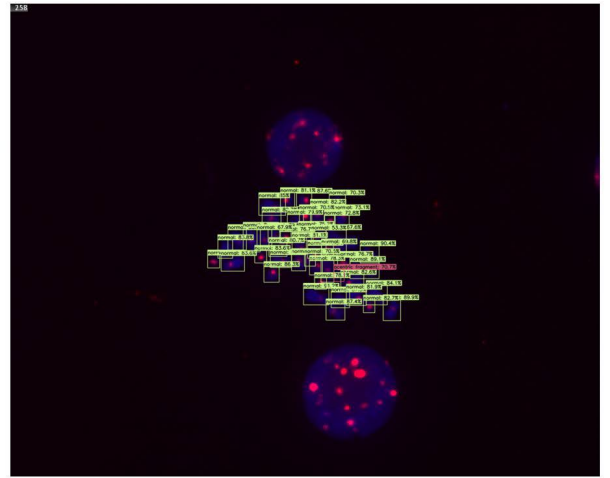
AI detection



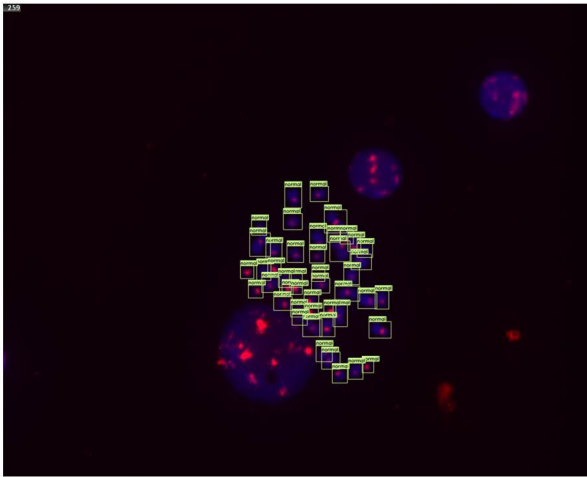
Ground truth



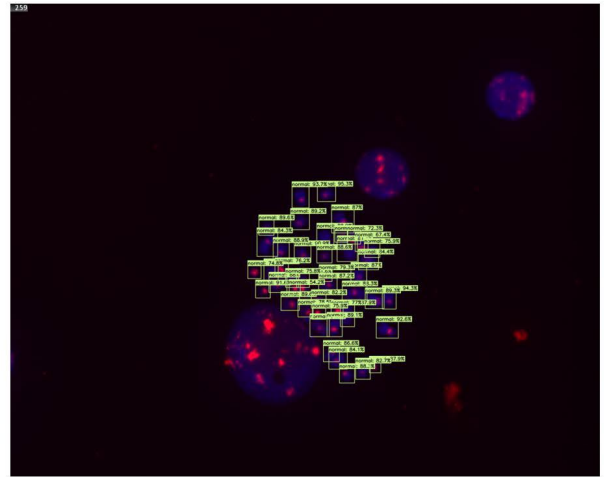
AI detection



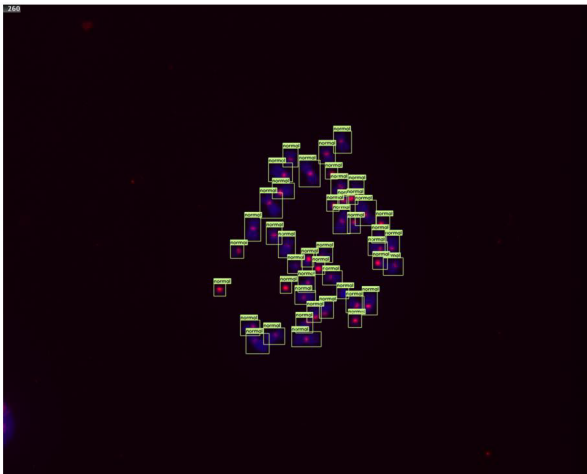
Ground truth



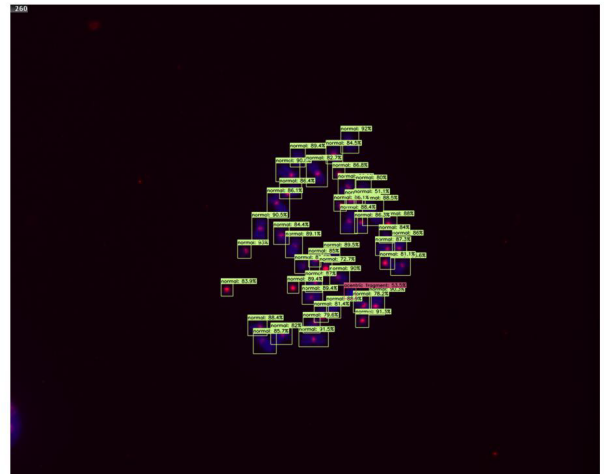
AI detection



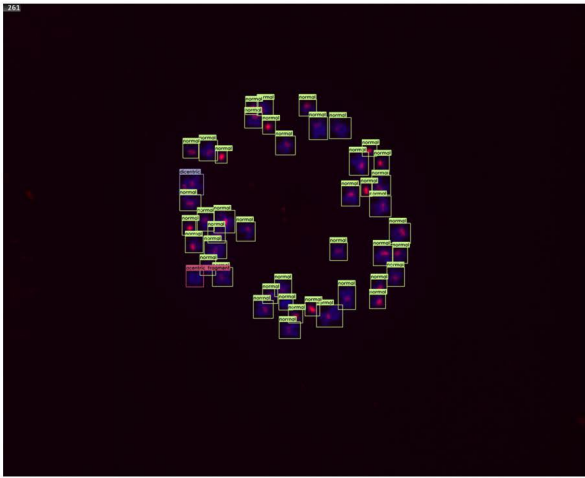
Ground truth



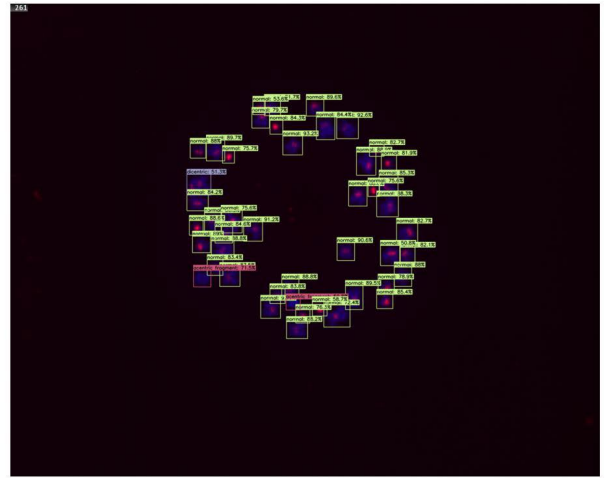
AI detection



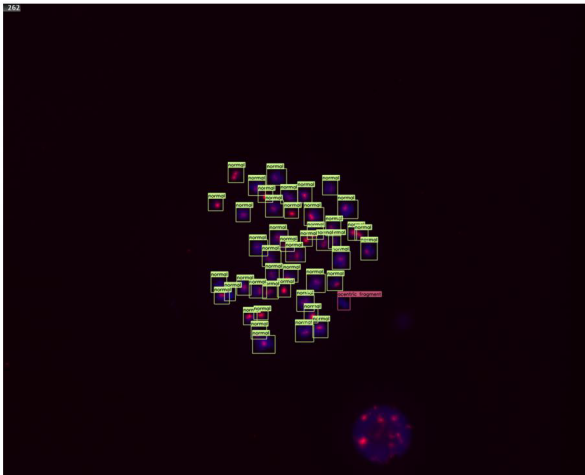
Ground truth



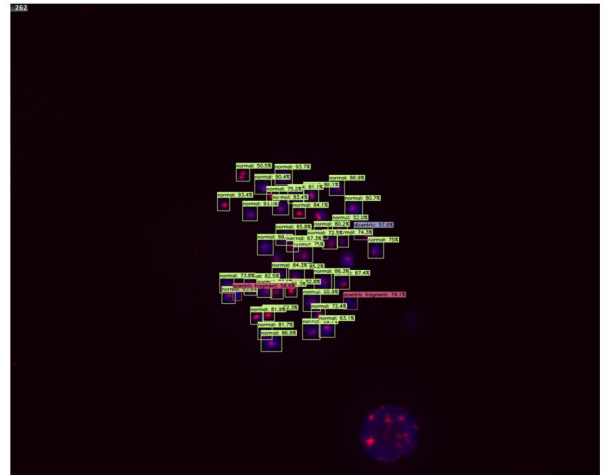
AI detection



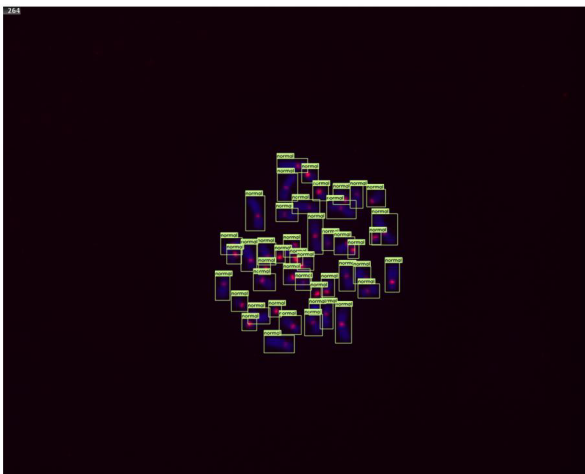
Ground truth



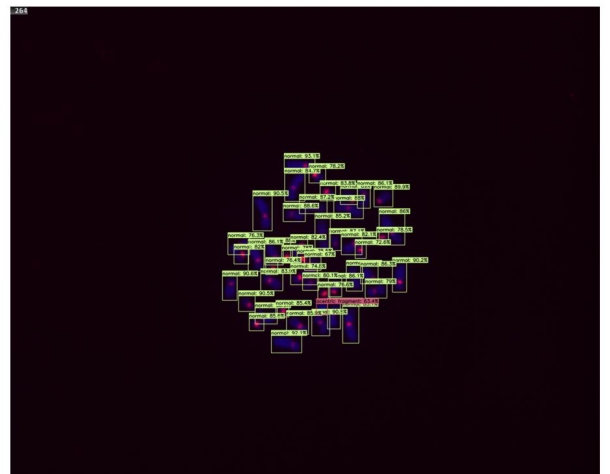
AI detection



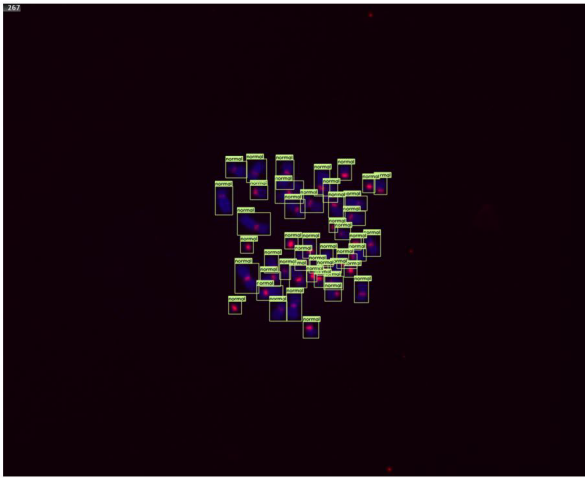
Ground truth



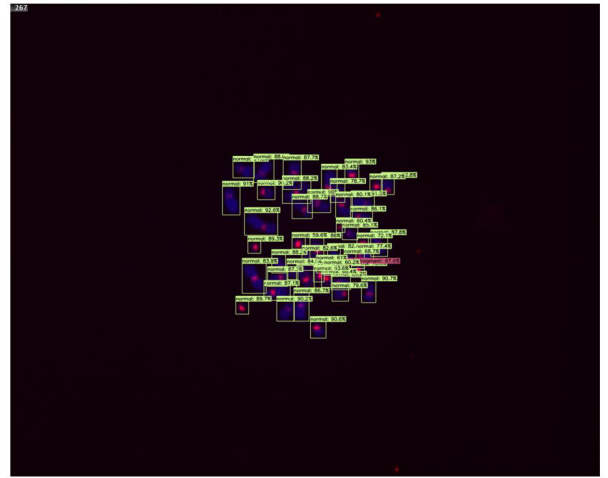
AI detection



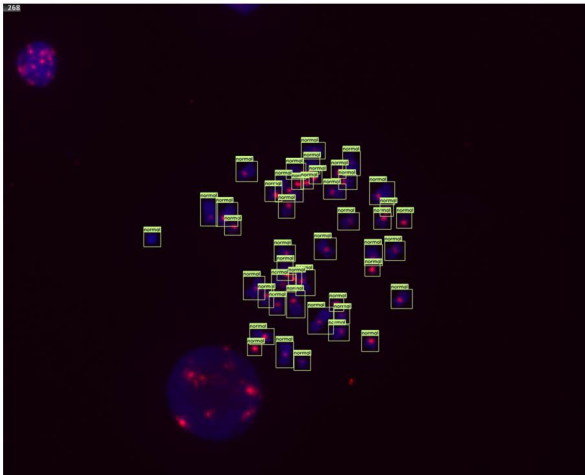
Ground truth



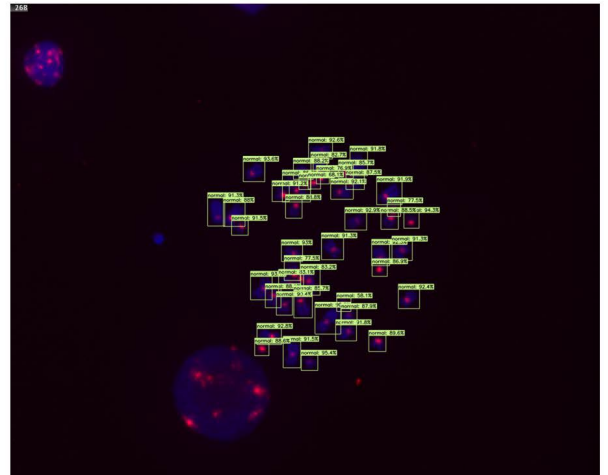
AI detection



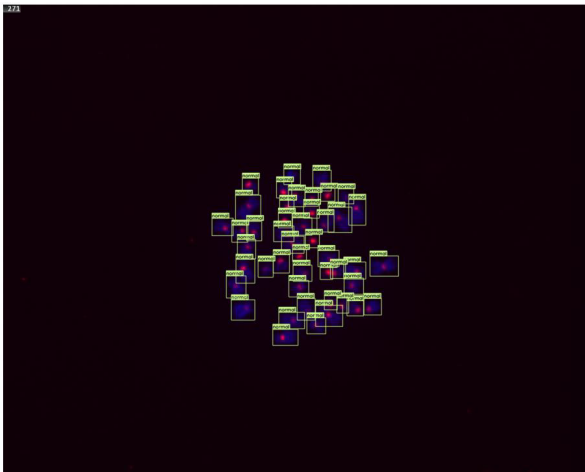
Ground truth



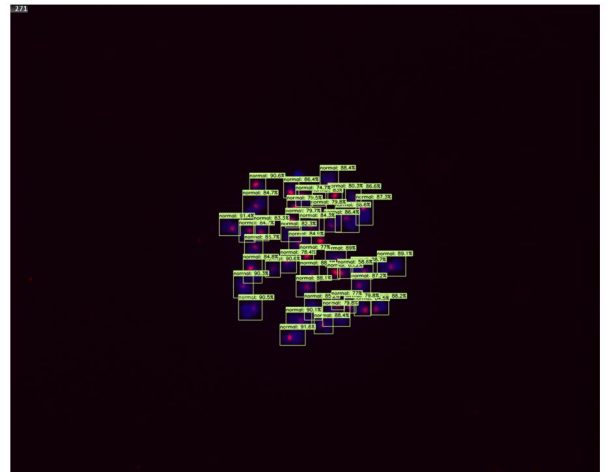
AI detection



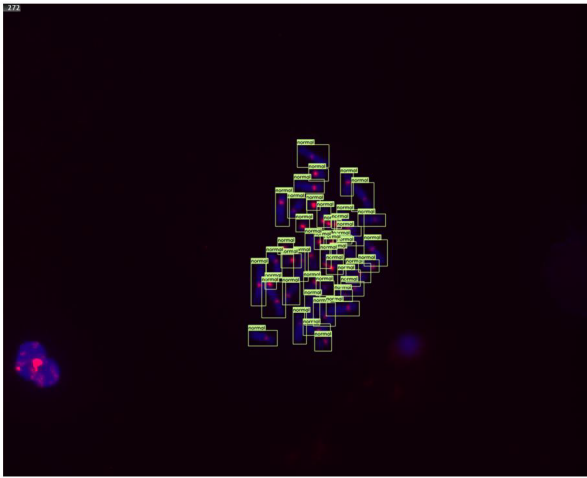
Ground truth



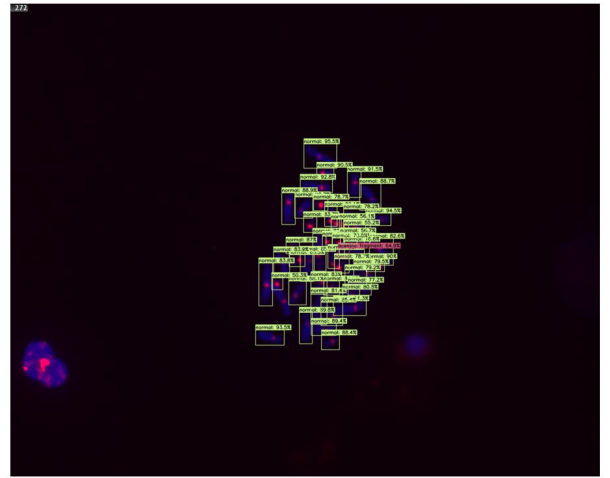
AI detection



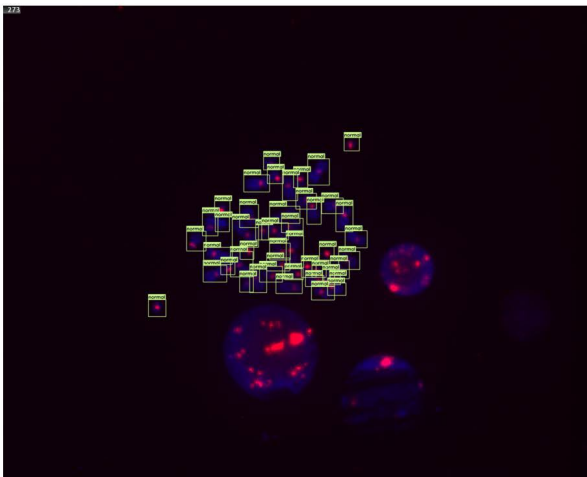
Ground truth



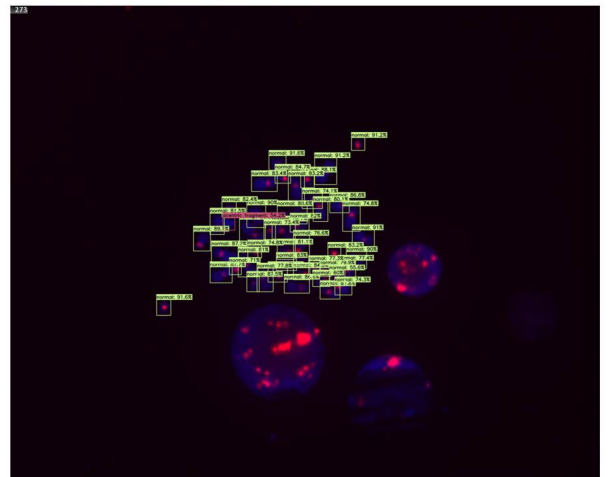
AI detection



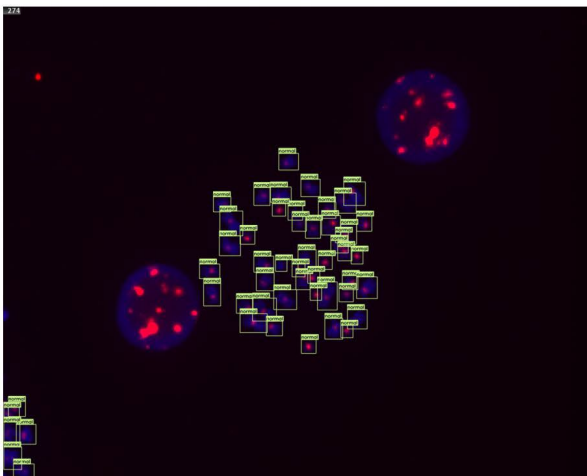
Ground truth



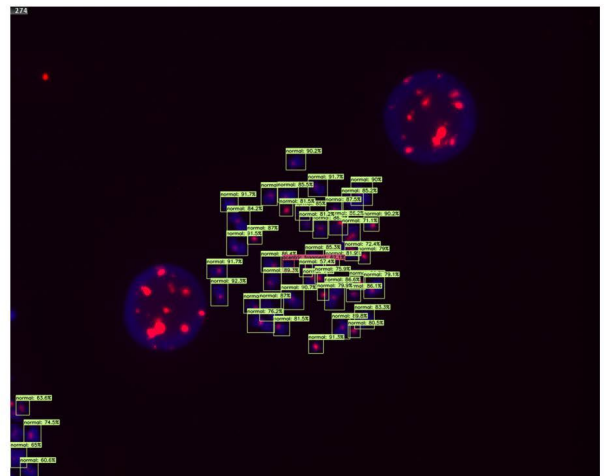
AI detection



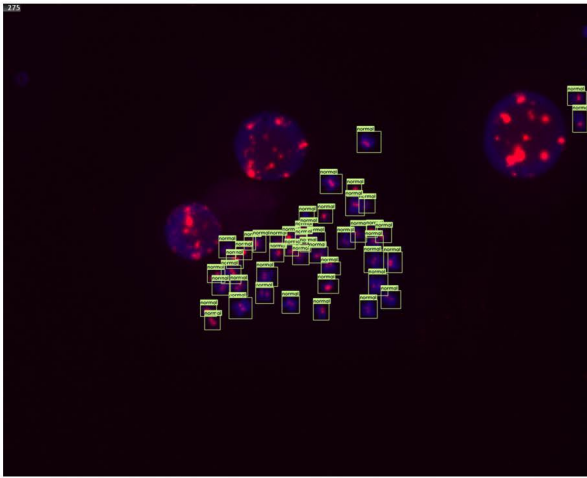
Ground truth



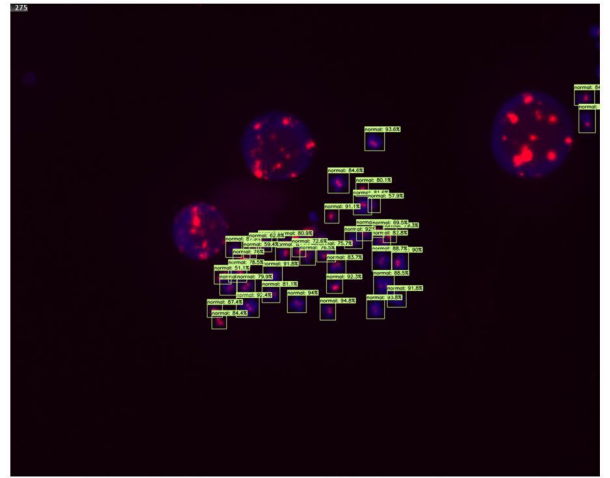
AI detection



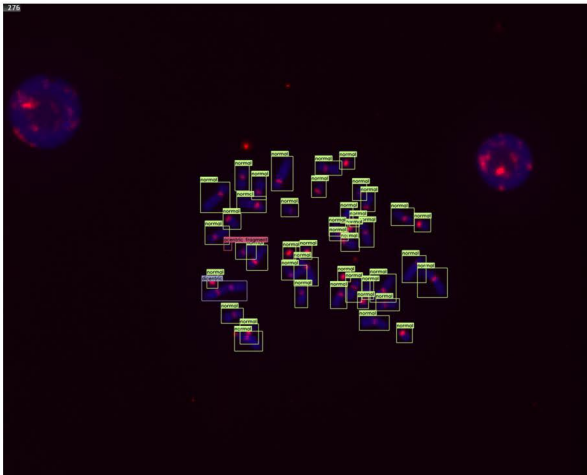
Ground truth



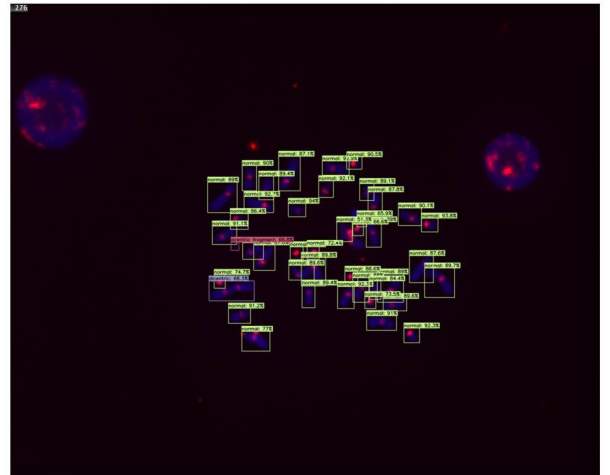
AI detection



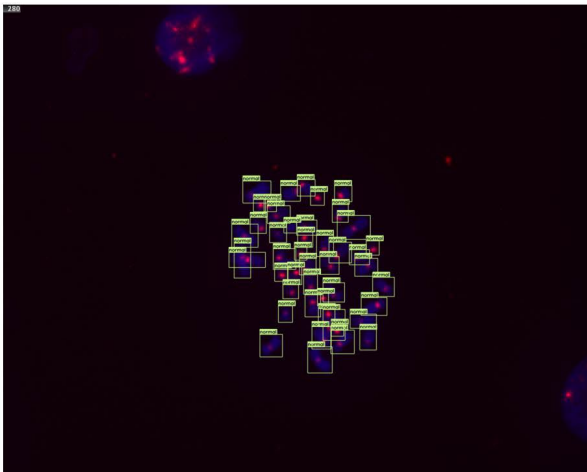
Ground truth



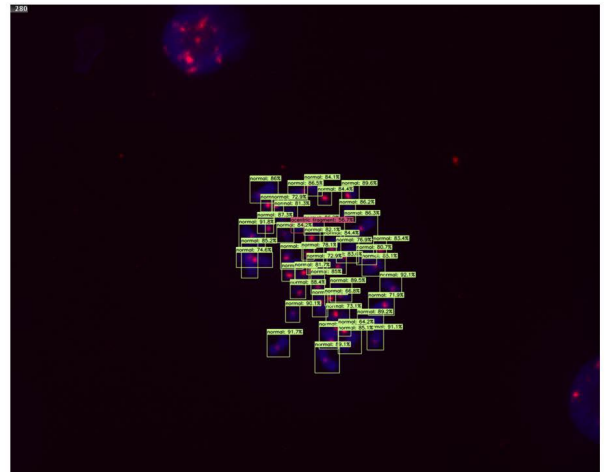
AI detection



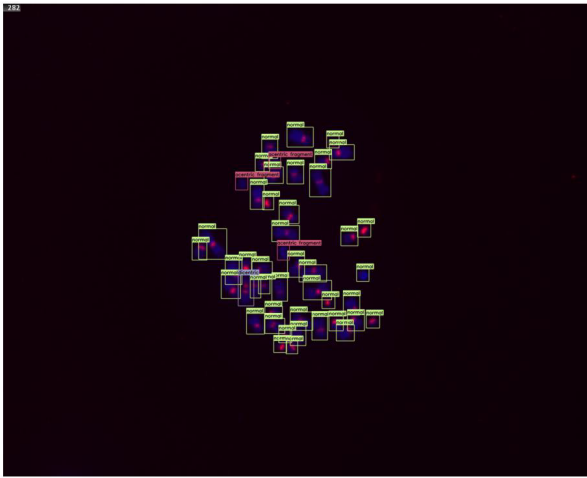
Ground truth



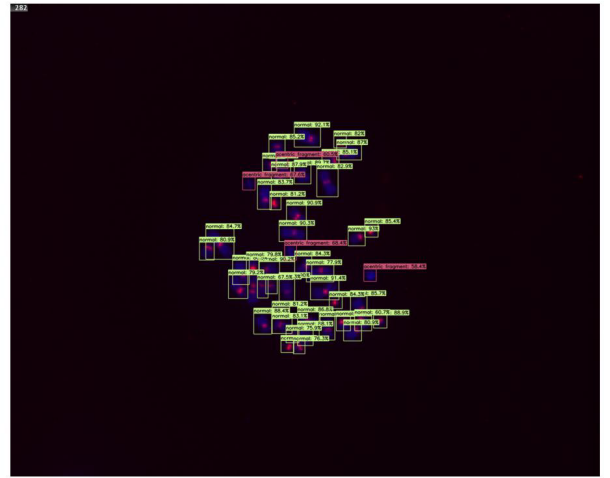
AI detection



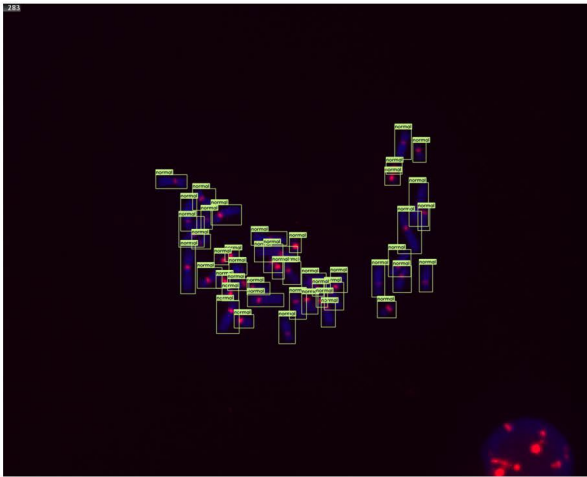
Ground truth



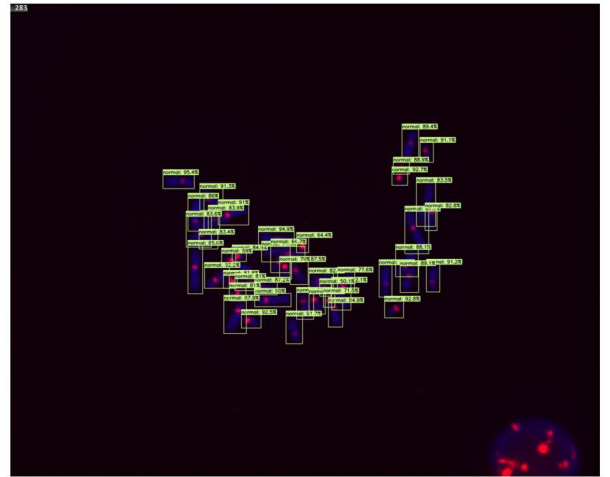
AI detection



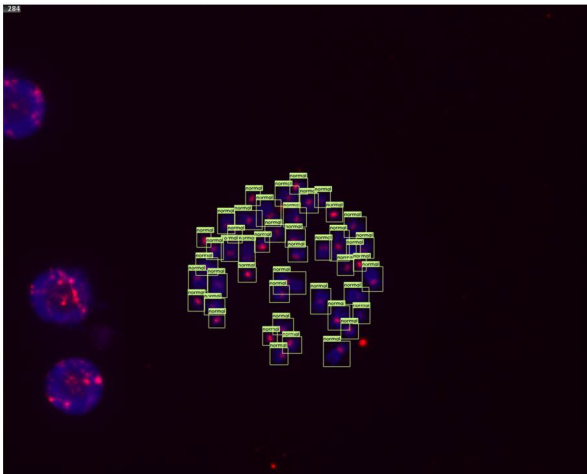
Ground truth



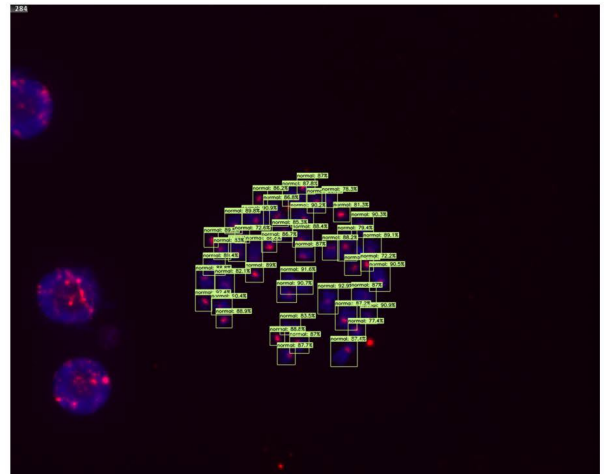
AI detection



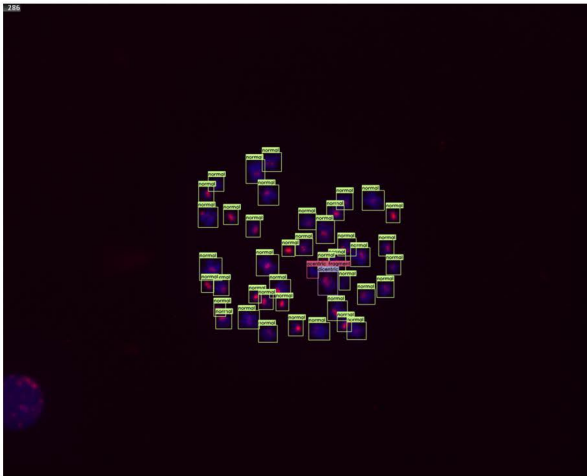
Ground truth



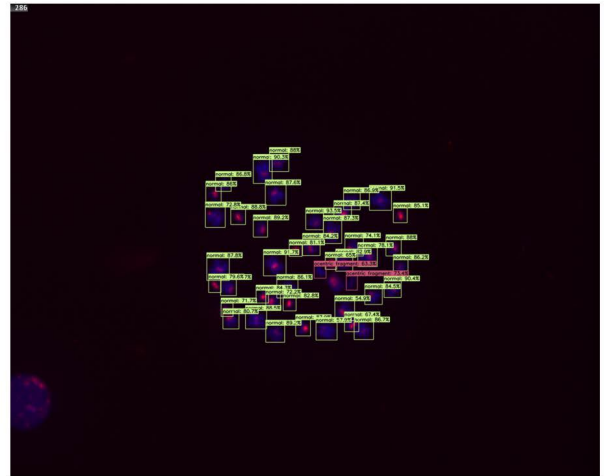
AI detection



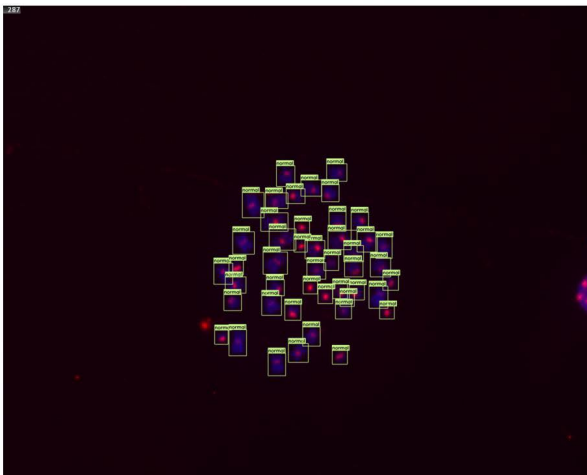
Ground truth



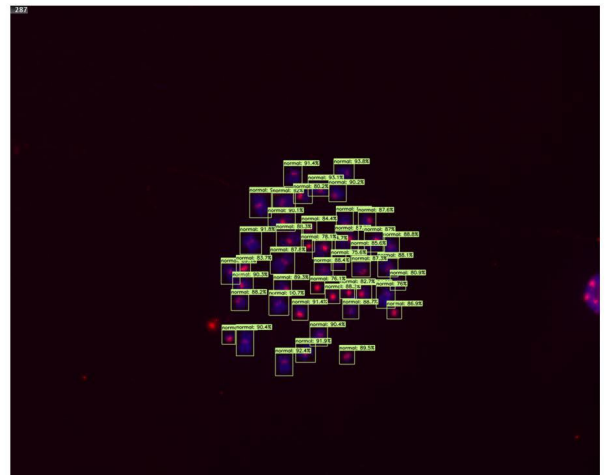
AI detection



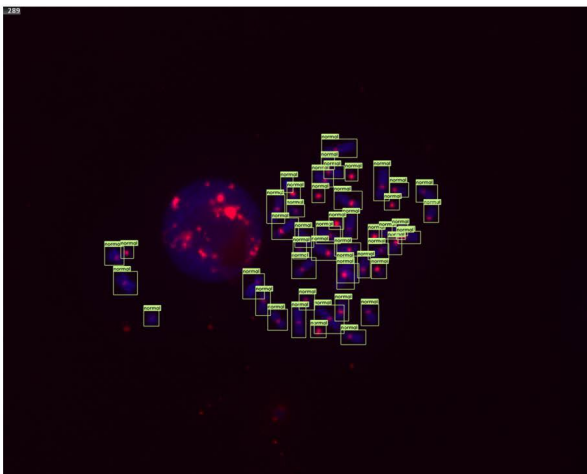
Ground truth



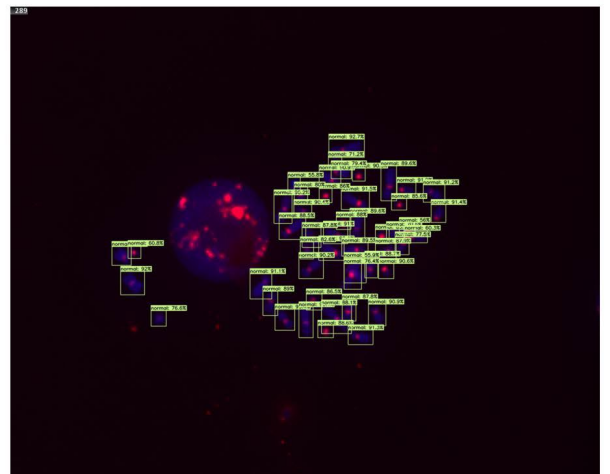
AI detection



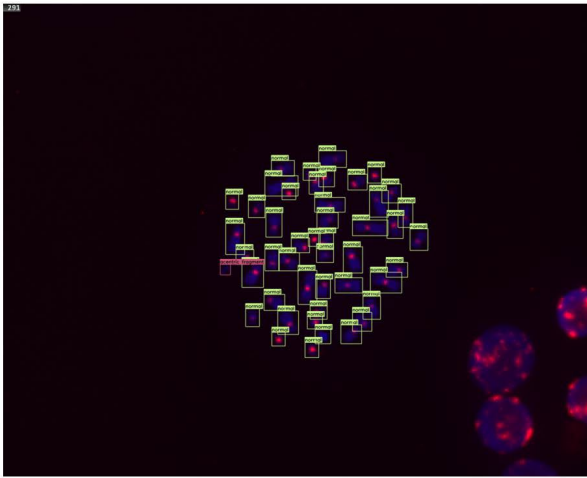
Ground truth



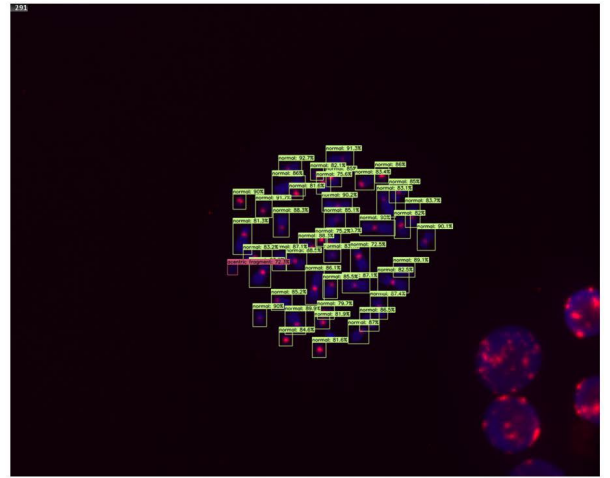
AI detection



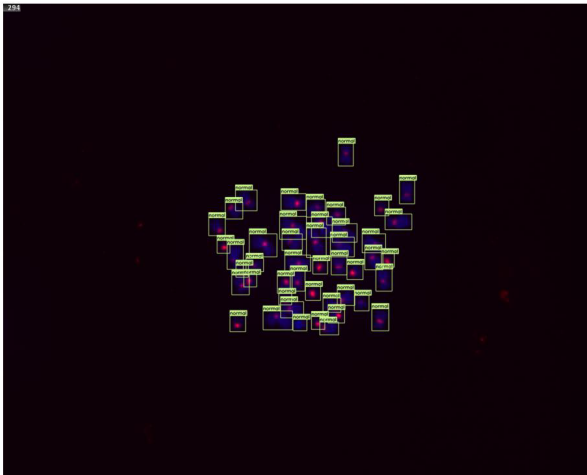
Ground truth



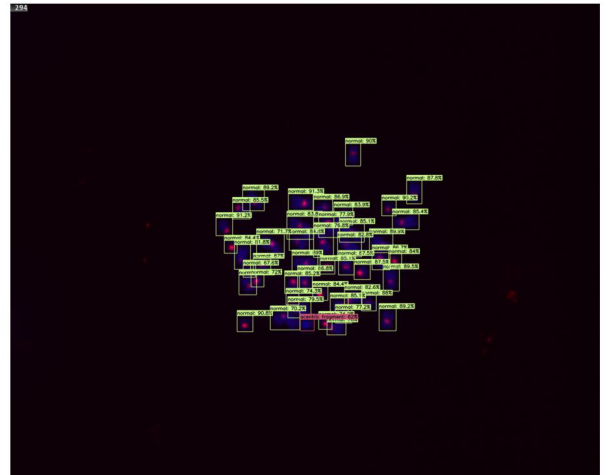
AI detection



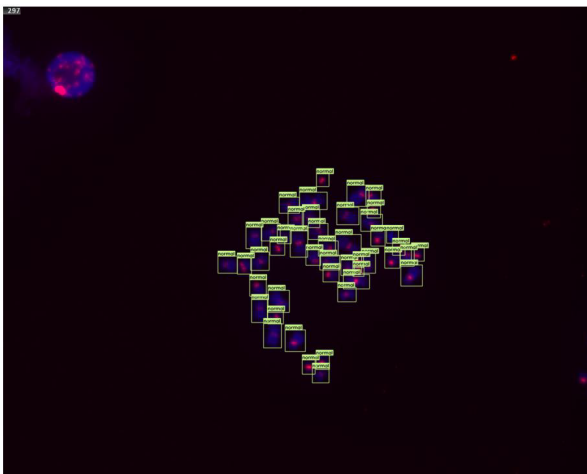
Ground truth



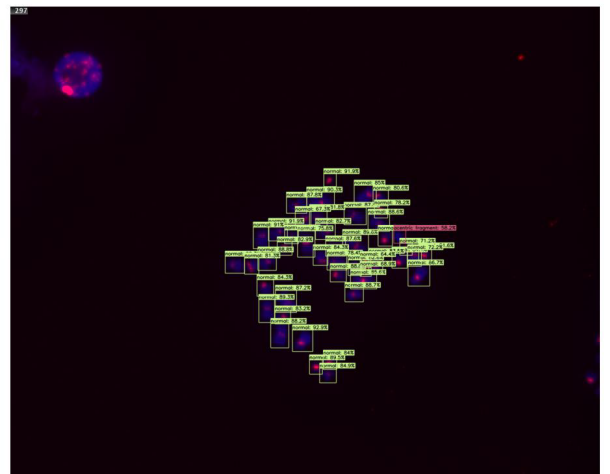
AI detection



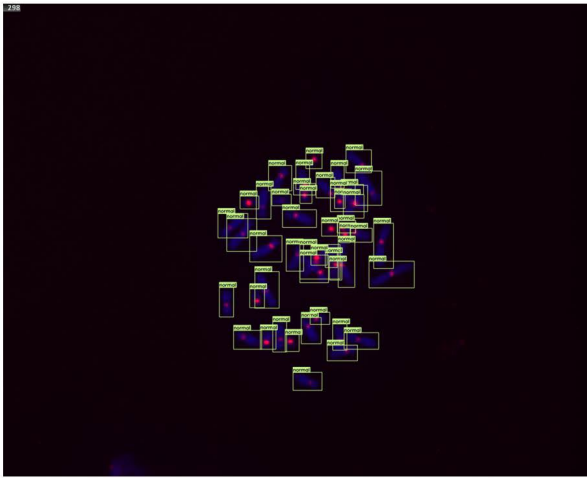
Ground truth



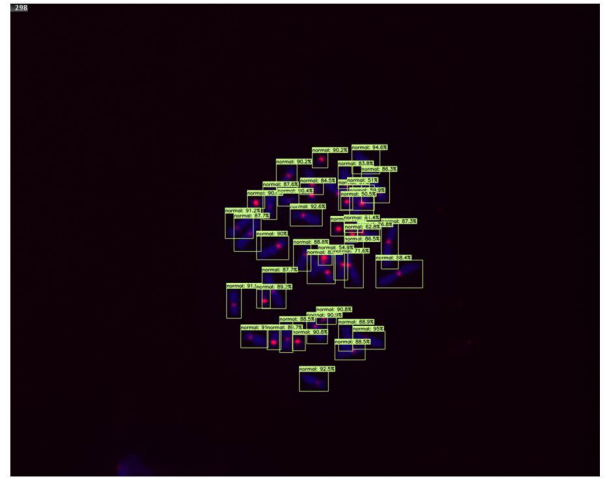
AI detection



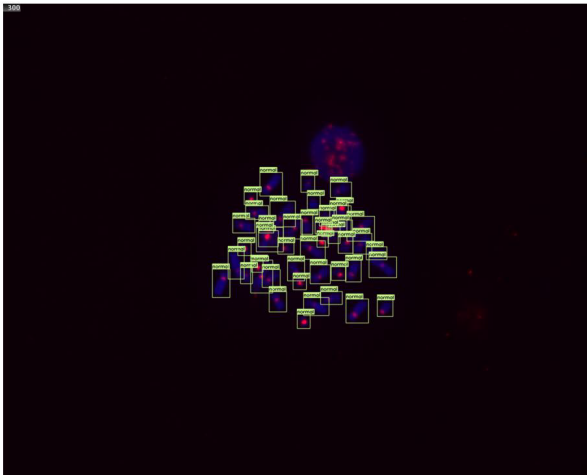
Ground truth



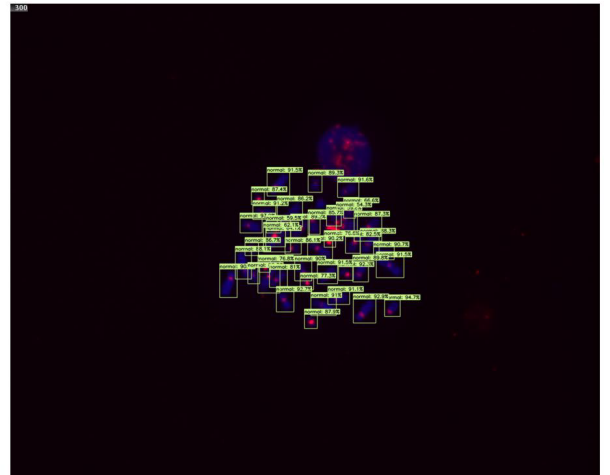
AI detection



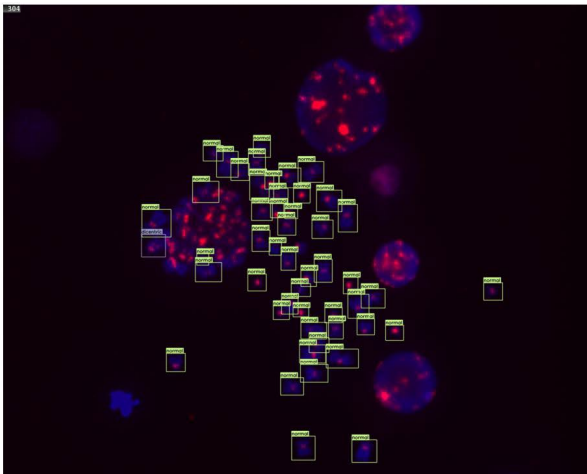
Ground truth



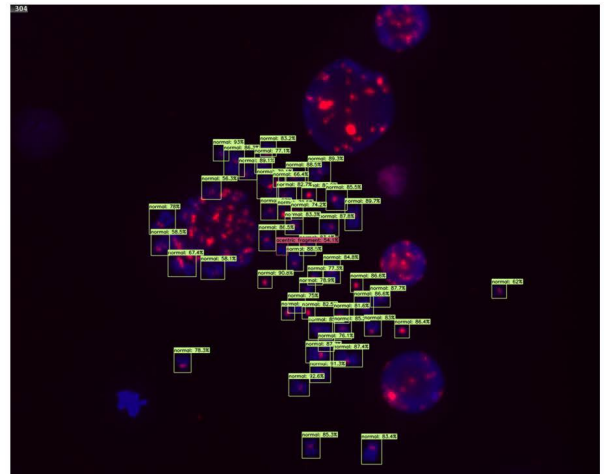
AI detection



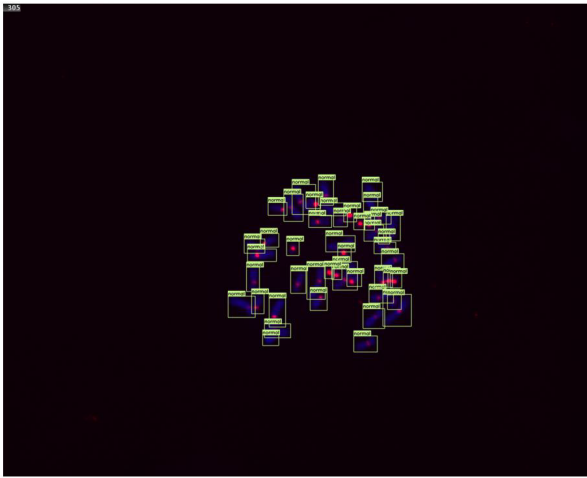
Ground truth



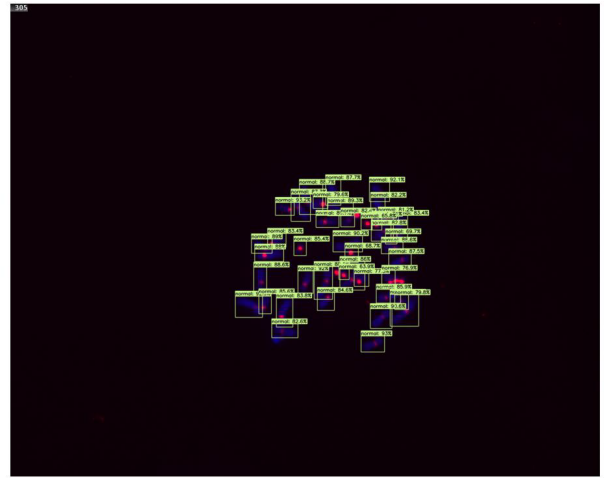
AI detection



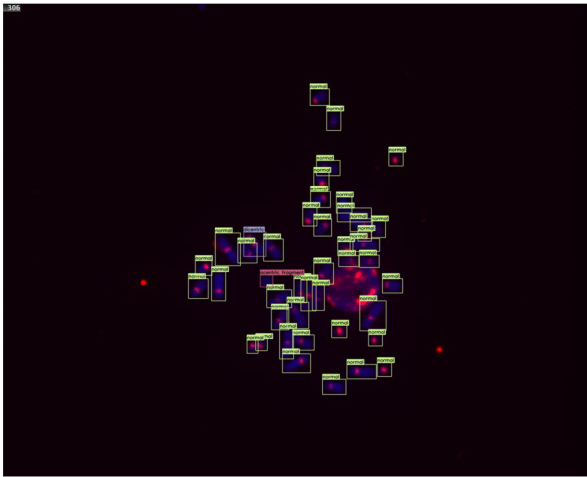
Ground truth



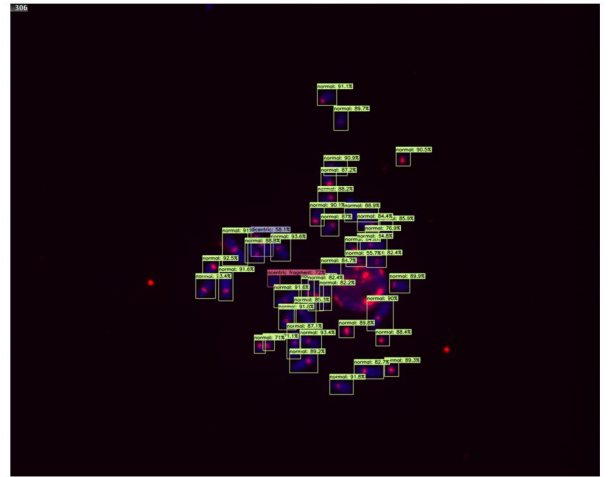
AI detection



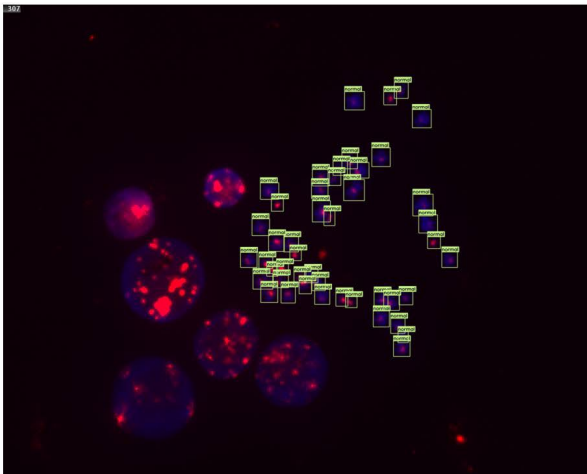
Ground truth



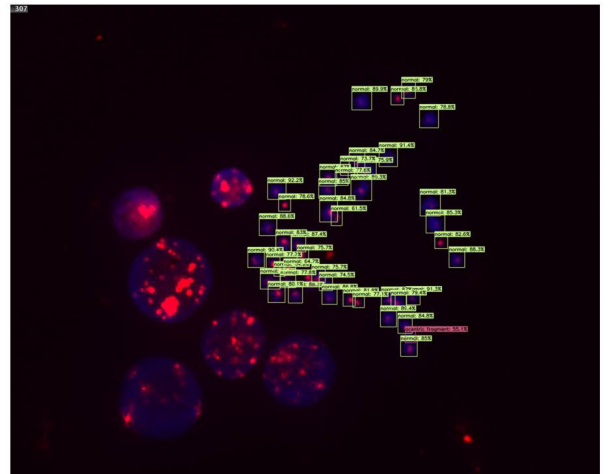
AI detection



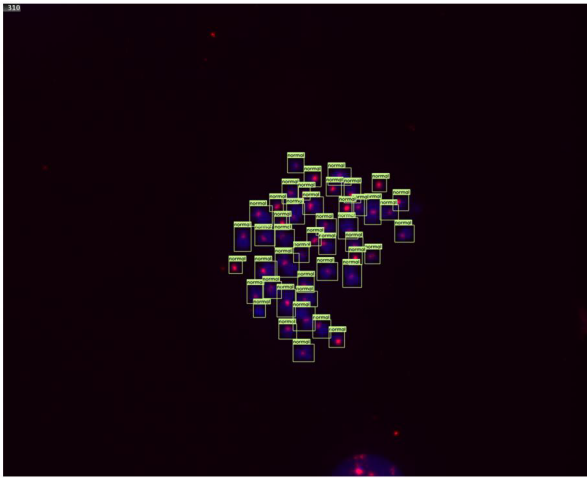
Ground truth



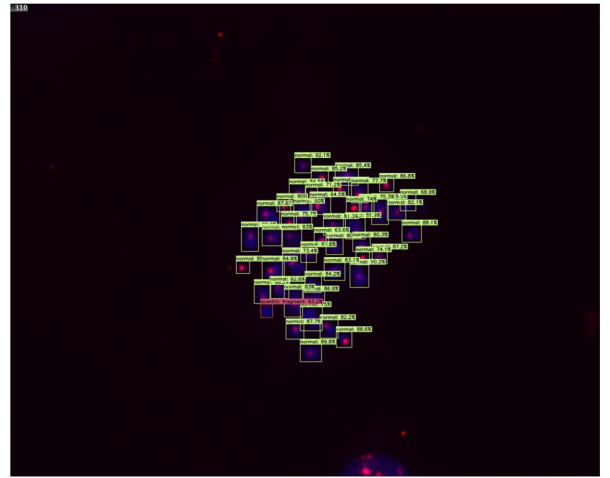
AI detection



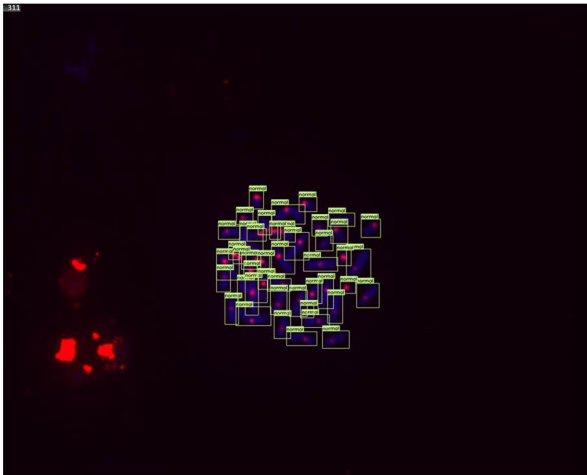
Ground truth



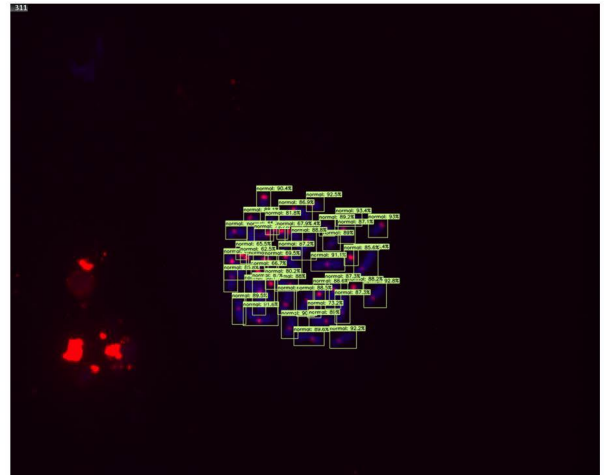
AI detection



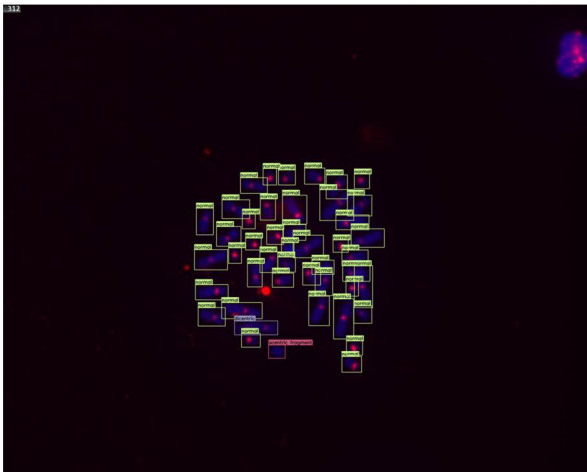
Ground truth



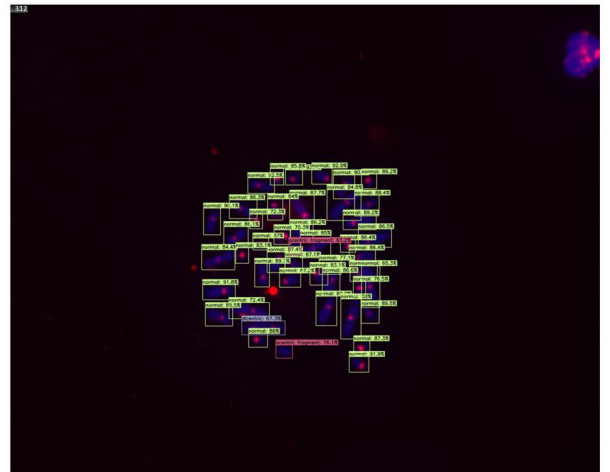
AI detection



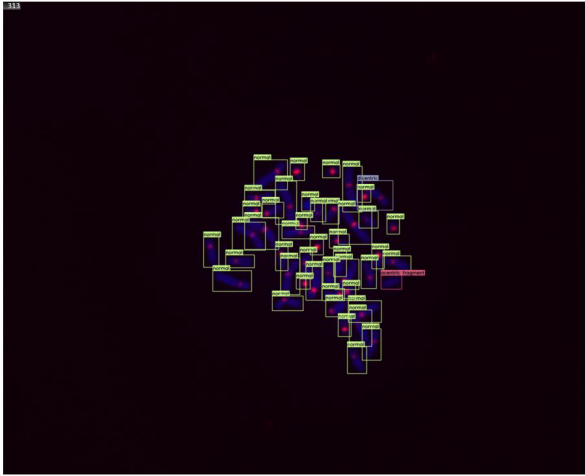
Ground truth



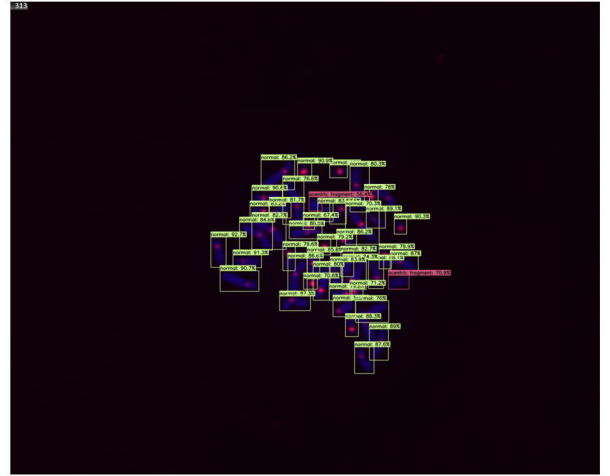
AI detection



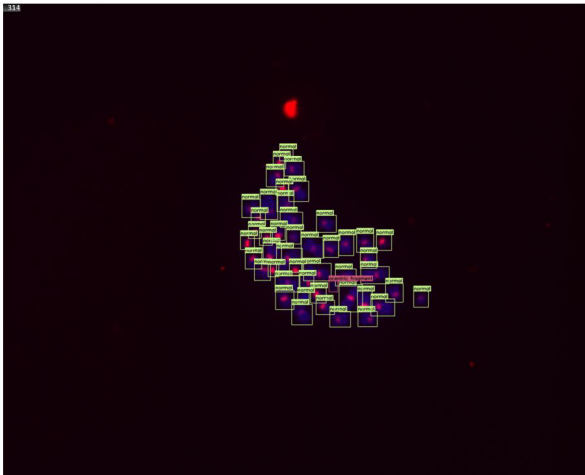
Ground truth



AI detection



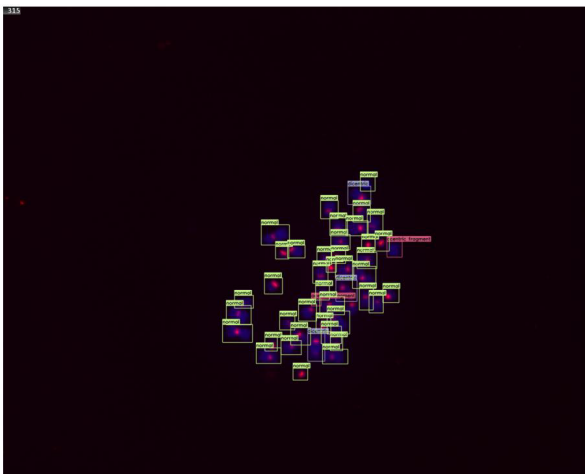
Ground truth



AI detection



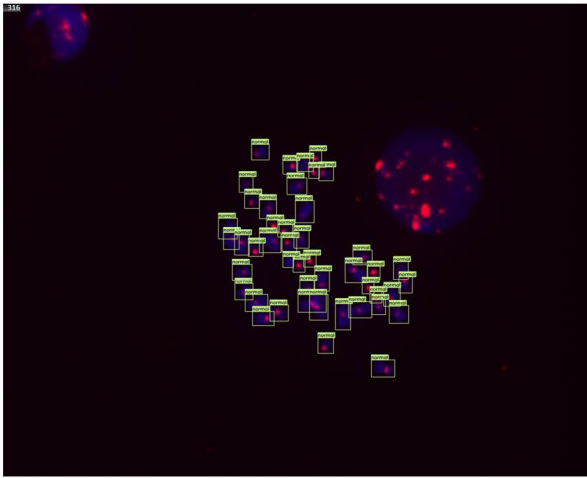
Ground truth



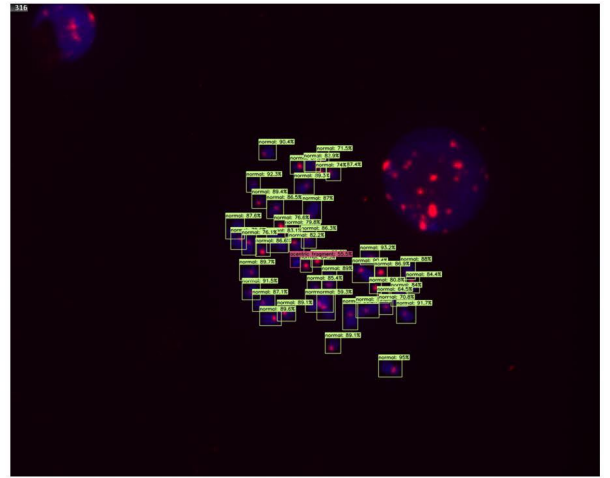
AI detection



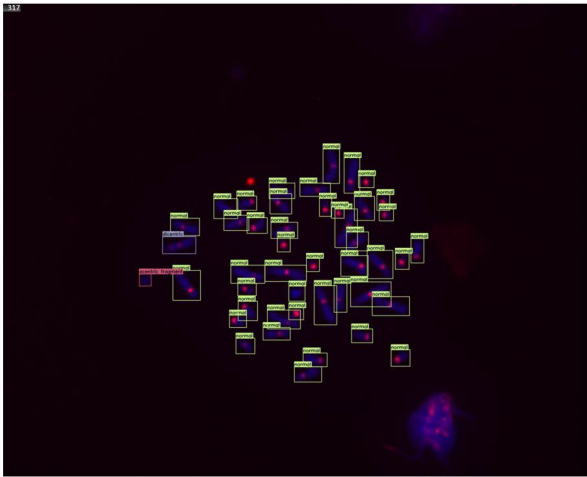
Ground truth



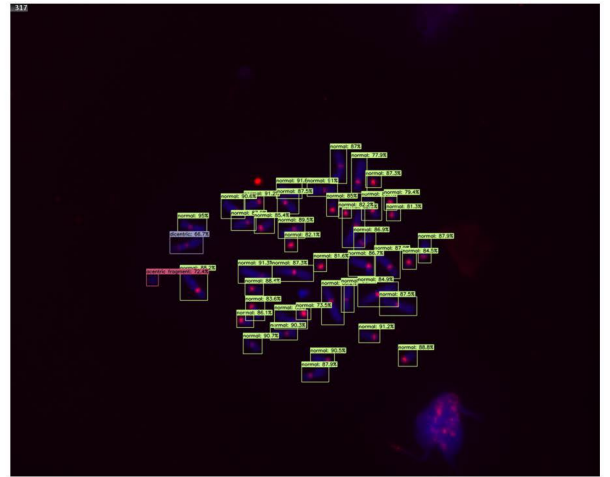
AI detection



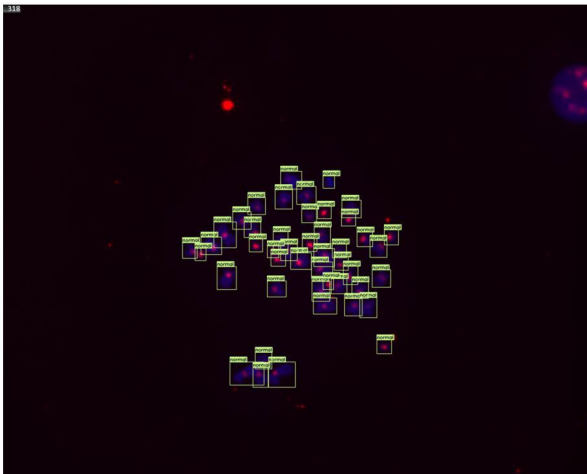
Ground truth



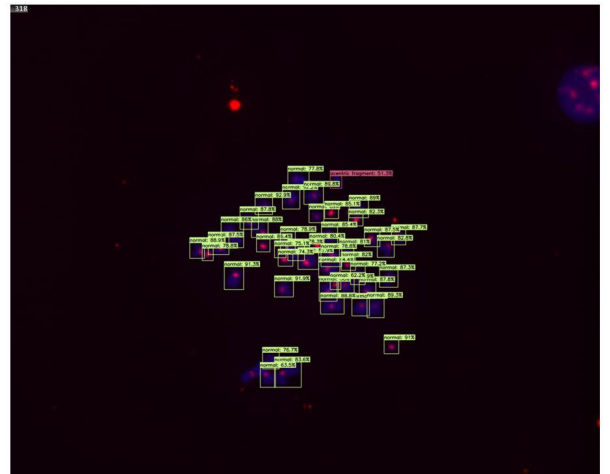
AI detection



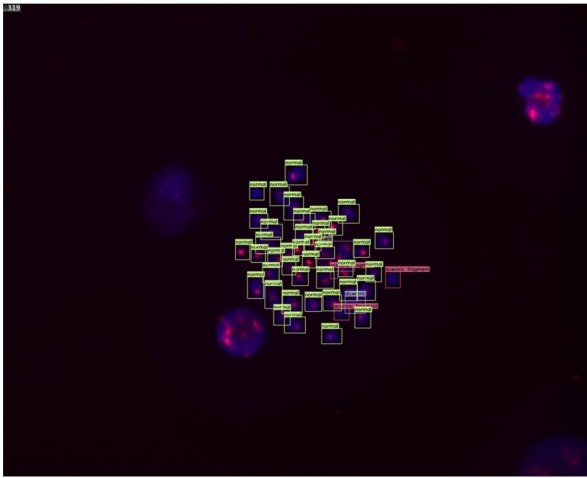
Ground truth



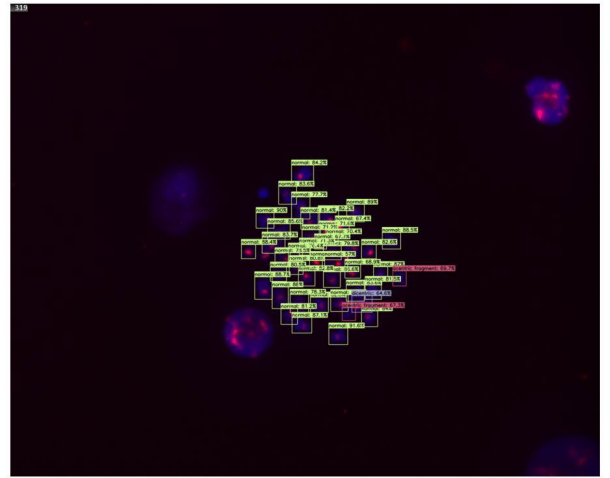
AI detection



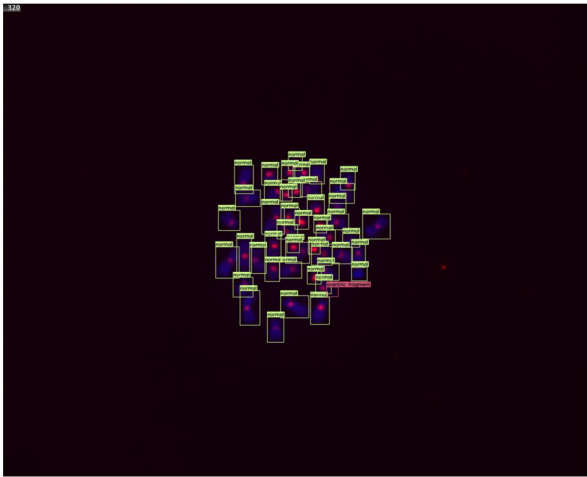
Ground truth



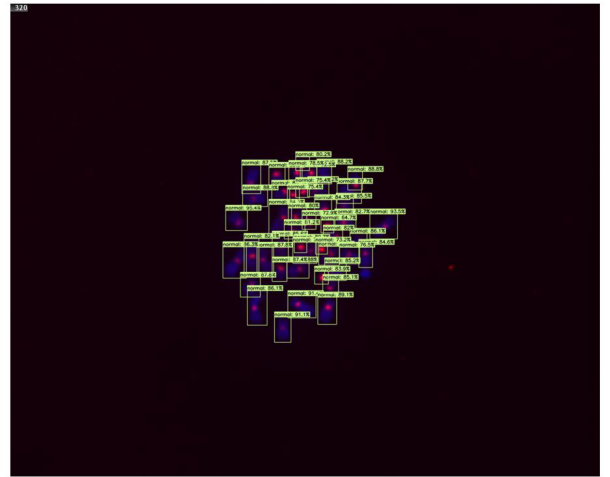
AI detection



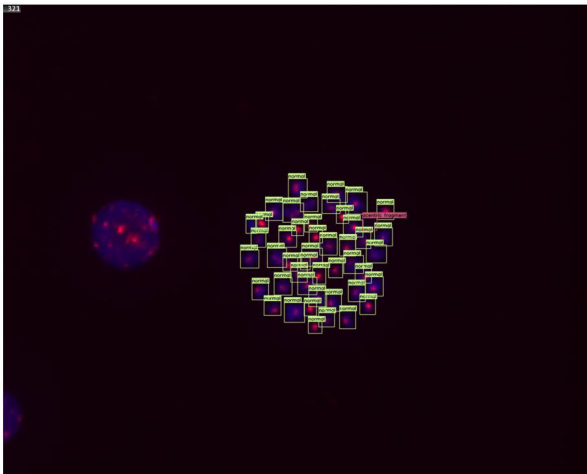
Ground truth



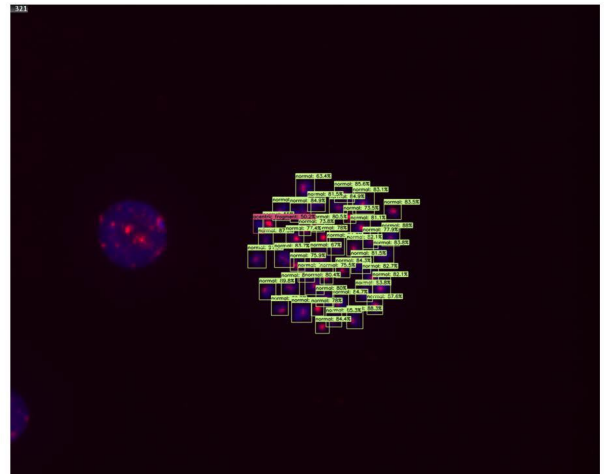
AI detection



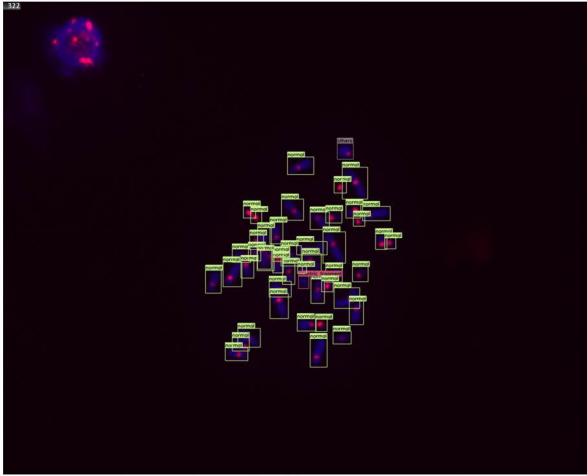
Ground truth



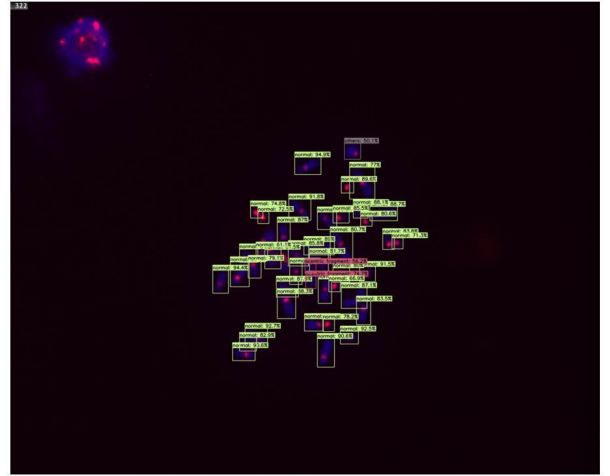
AI detection



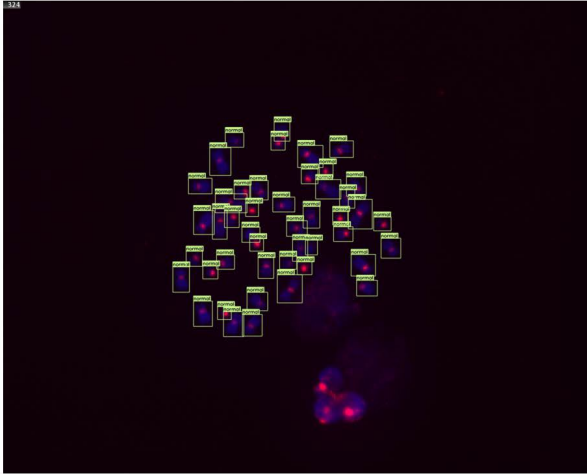
Ground truth



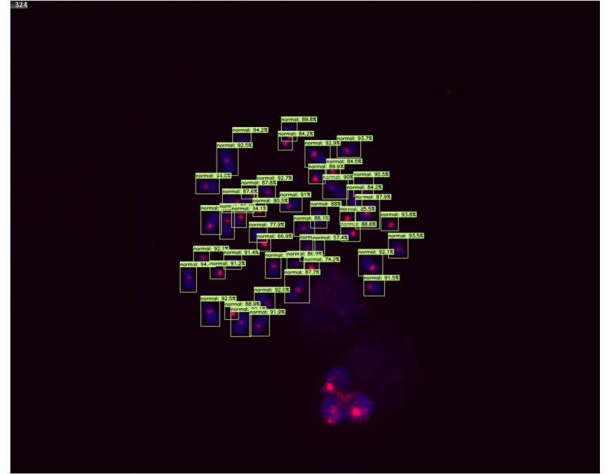
AI detection



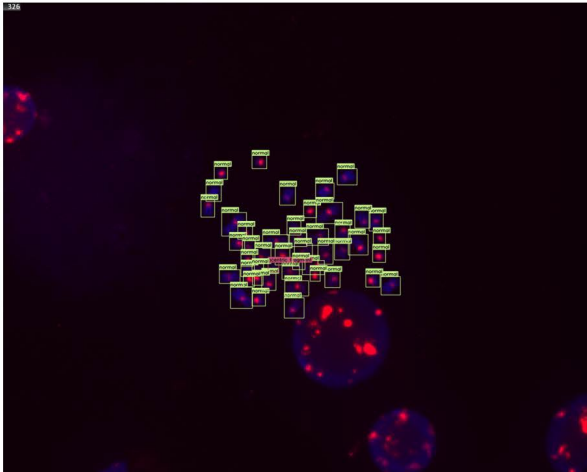
Ground truth



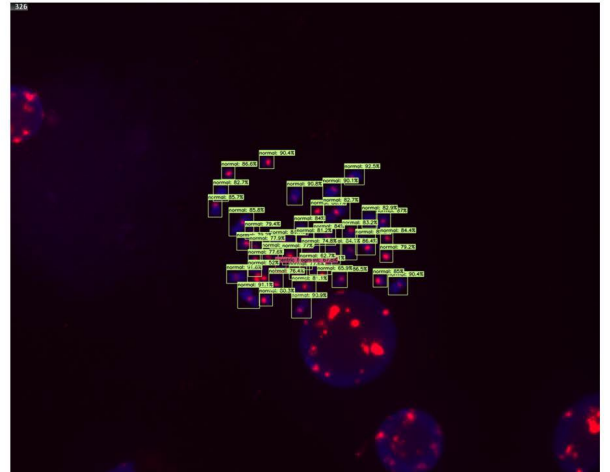
AI detection



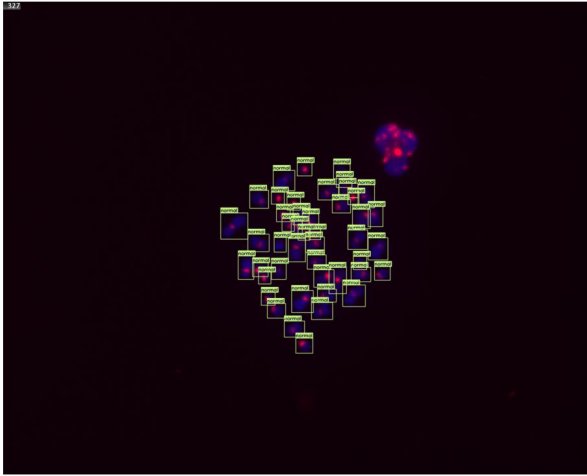
Ground truth



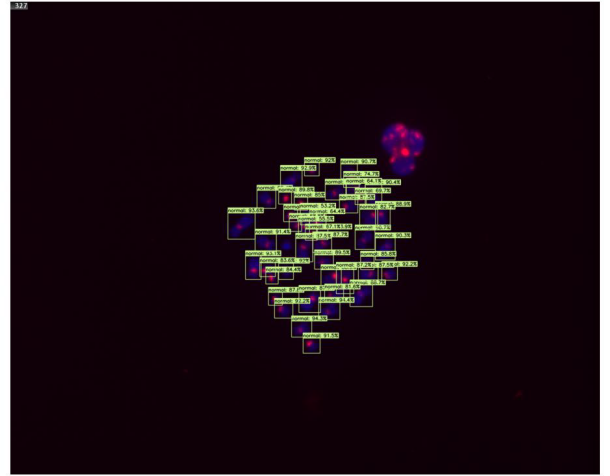
AI detection



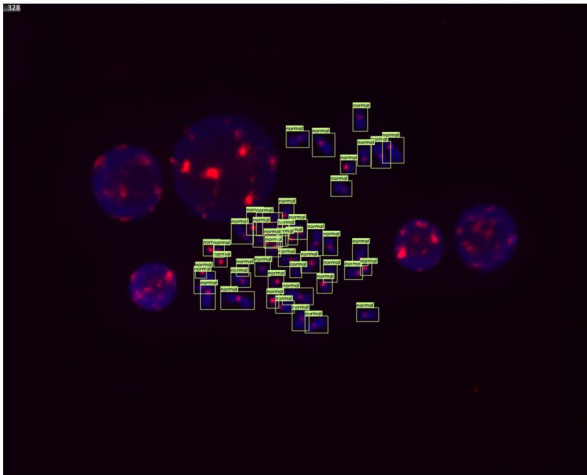
Ground truth



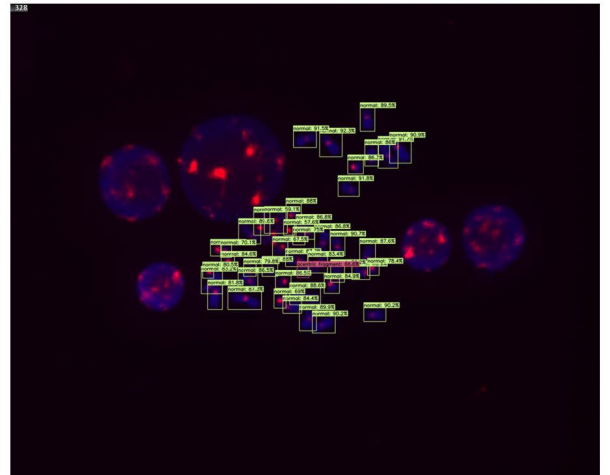
AI detection



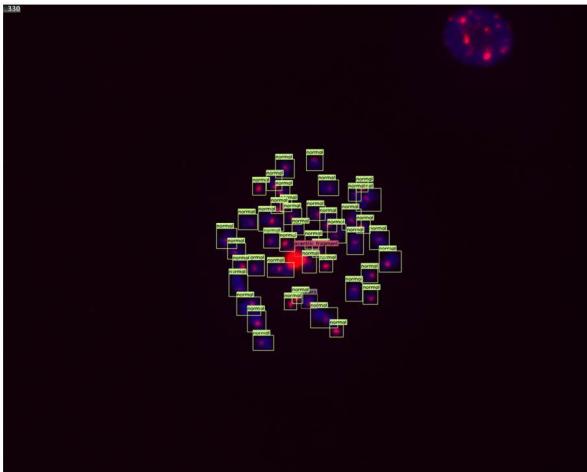
Ground truth



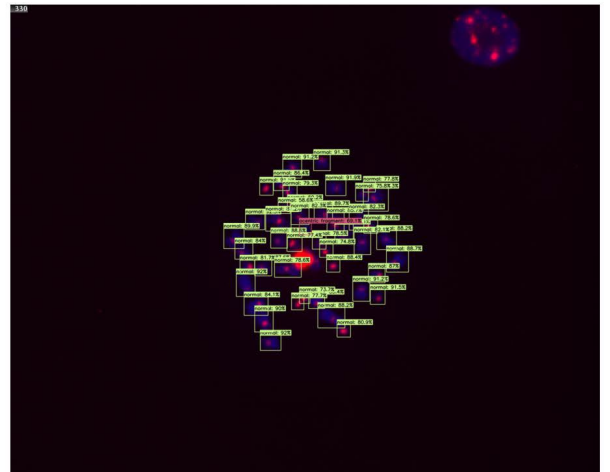
AI detection



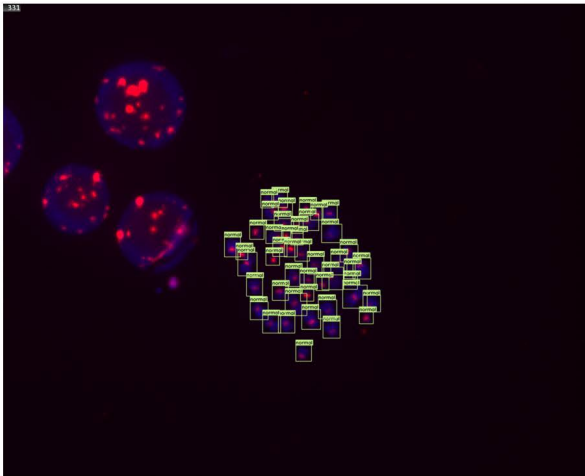
Ground truth



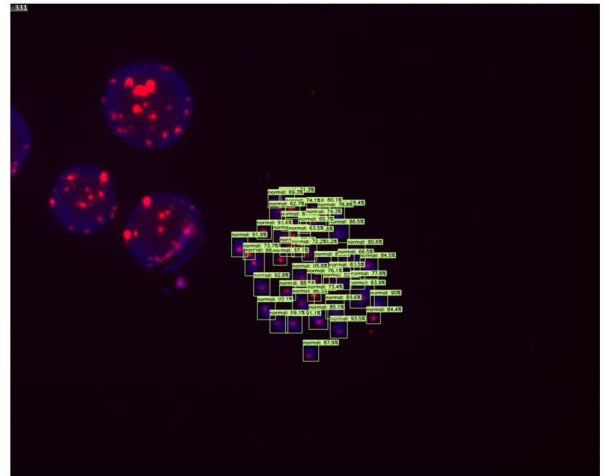
AI detection



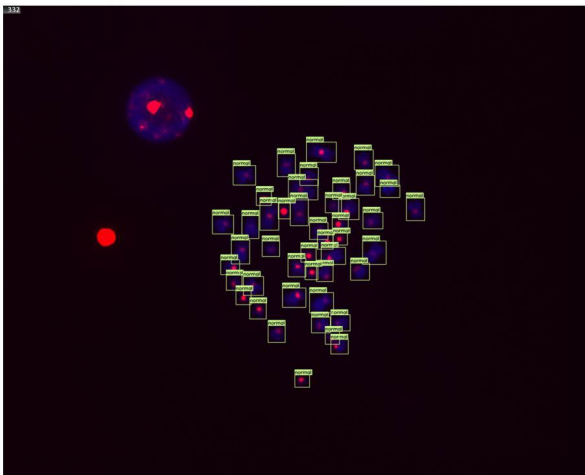
Ground truth



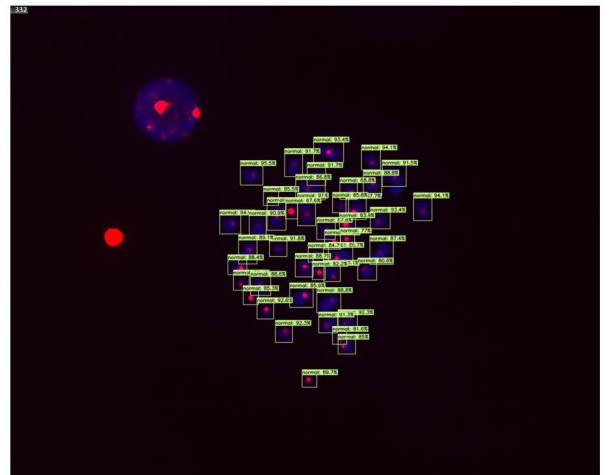
AI detection



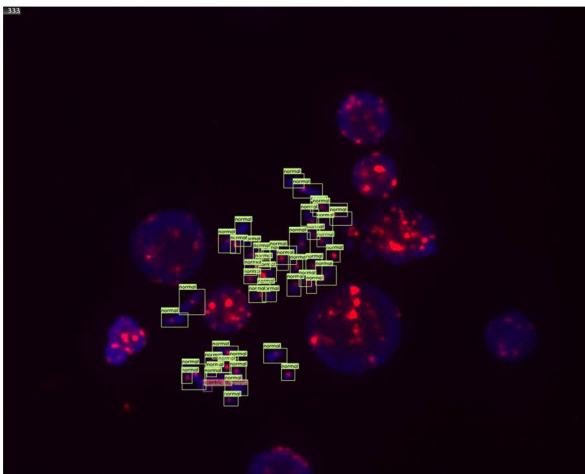
Ground truth



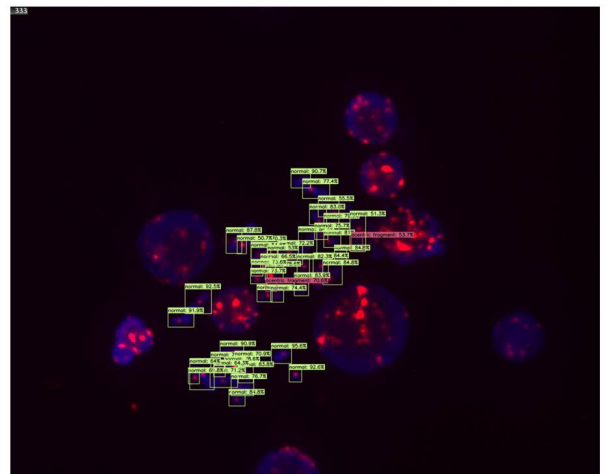
AI detection



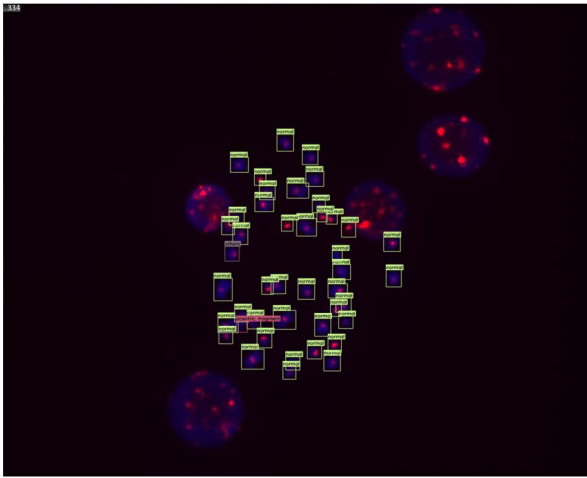
Ground truth



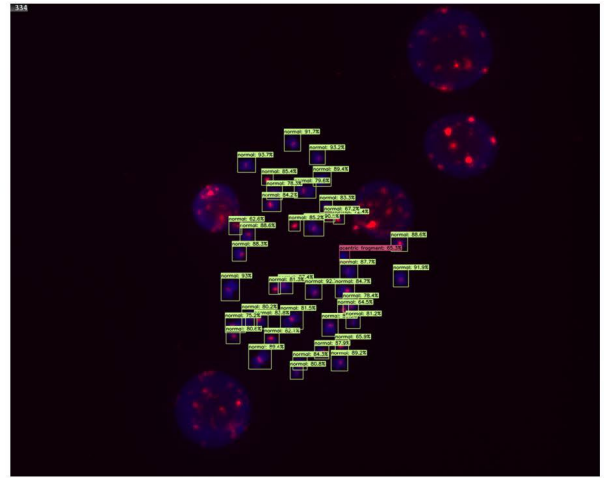
AI detection



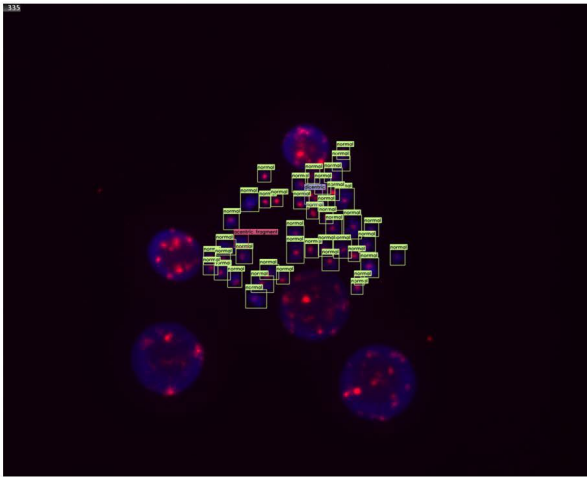
Ground truth



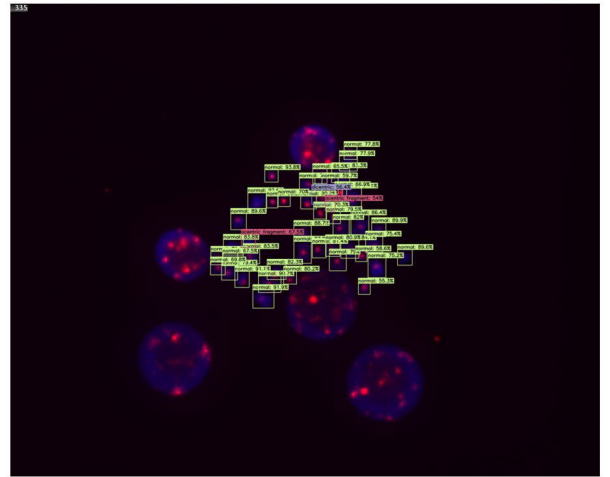
AI detection



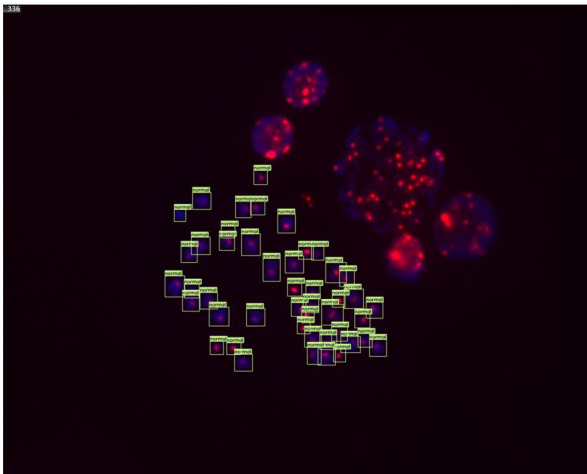
Ground truth



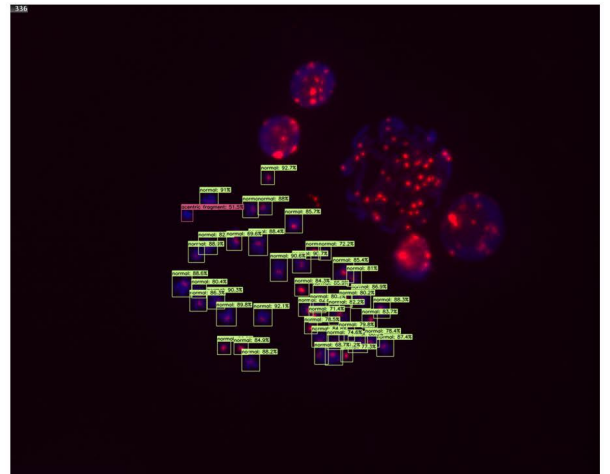
AI detection



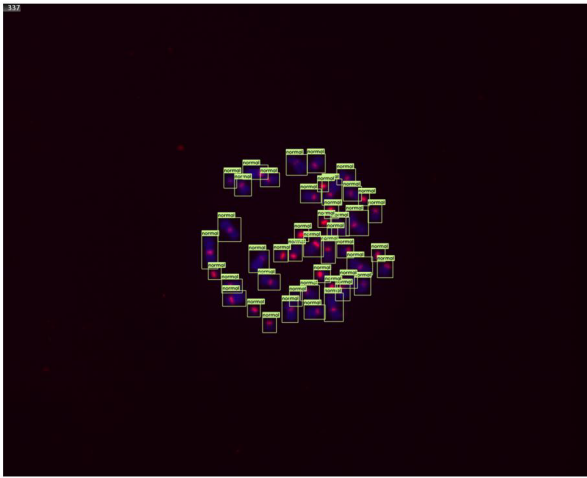
Ground truth



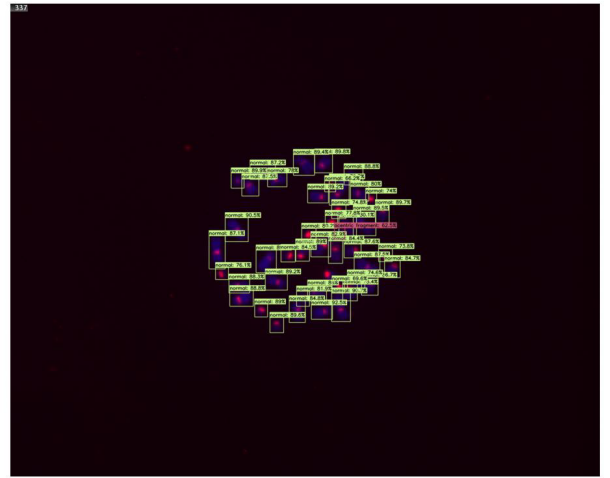
AI detection



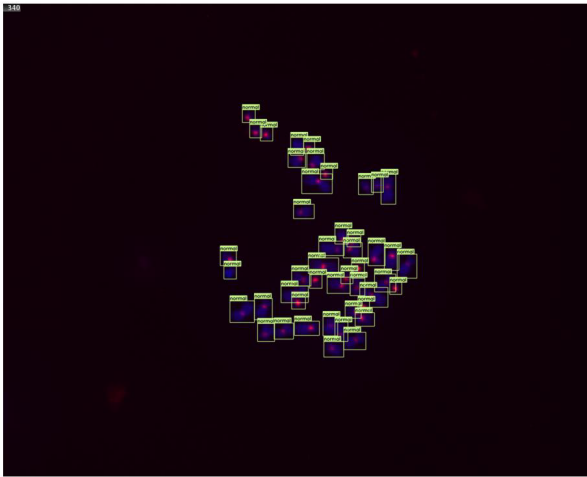
Ground truth



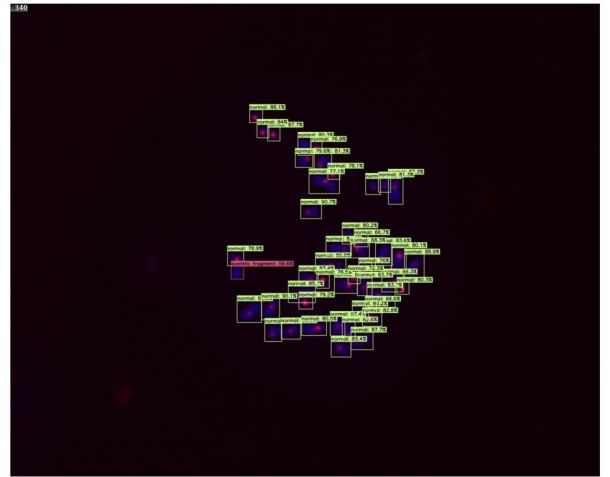
AI detection



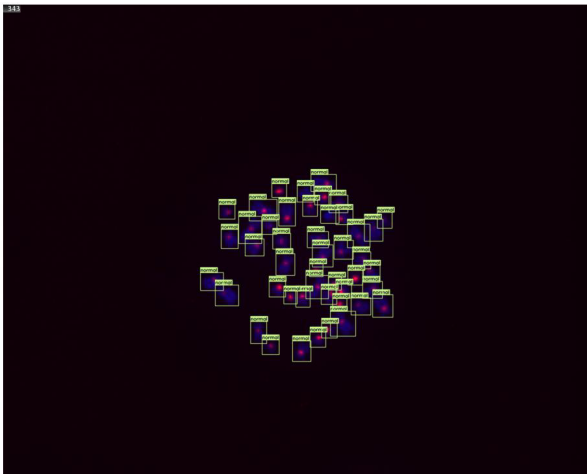
Ground truth



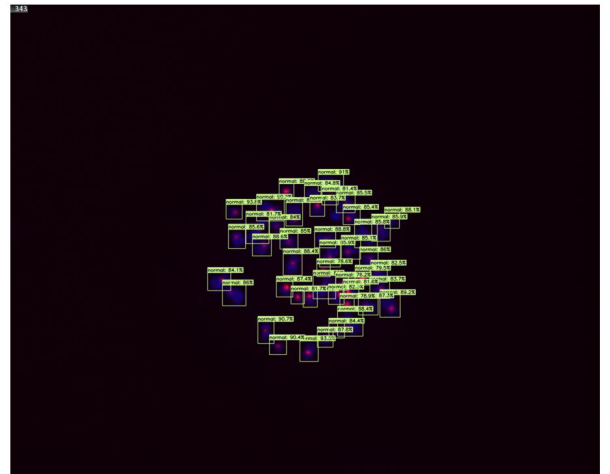
AI detection



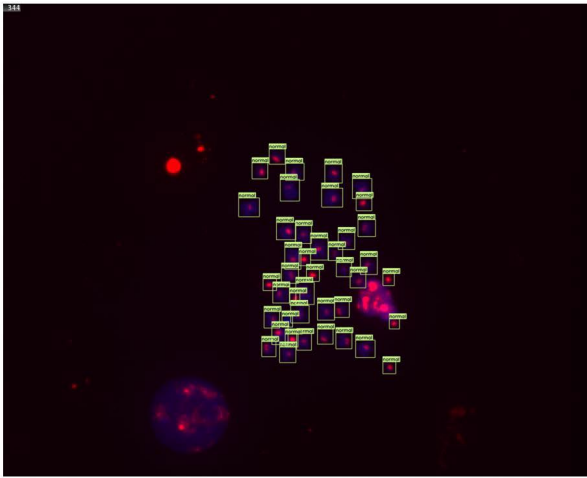
Ground truth



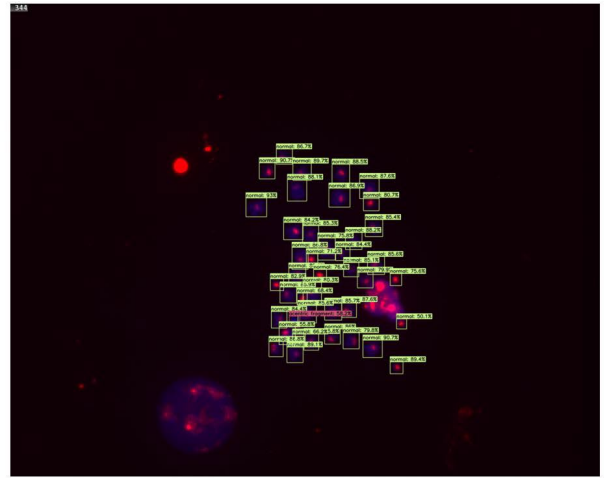
AI detection



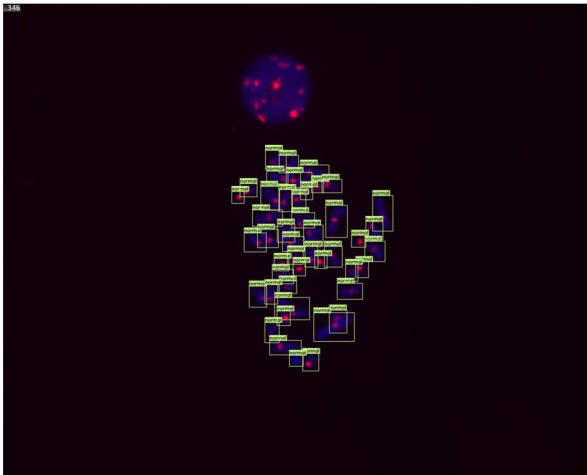
Ground truth



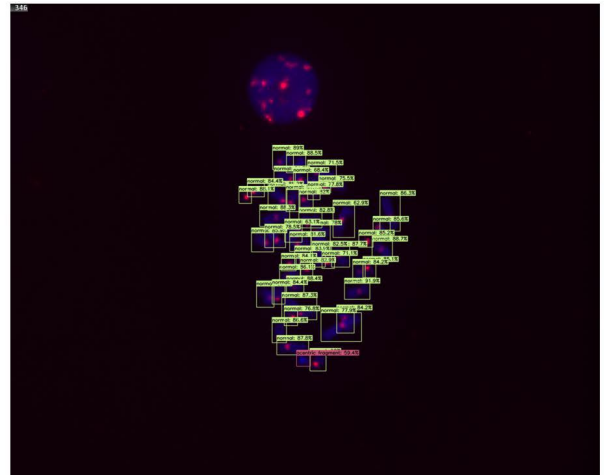
AI detection



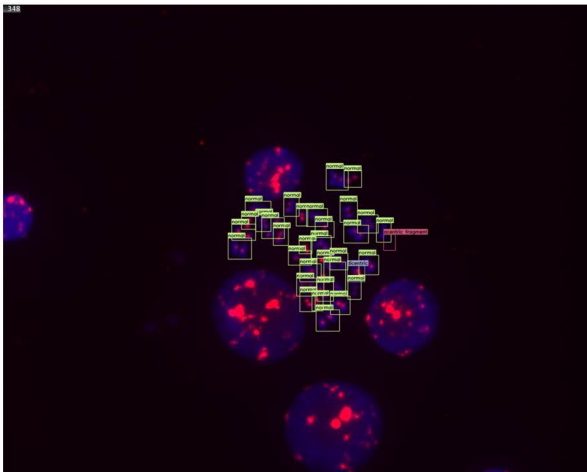
Ground truth



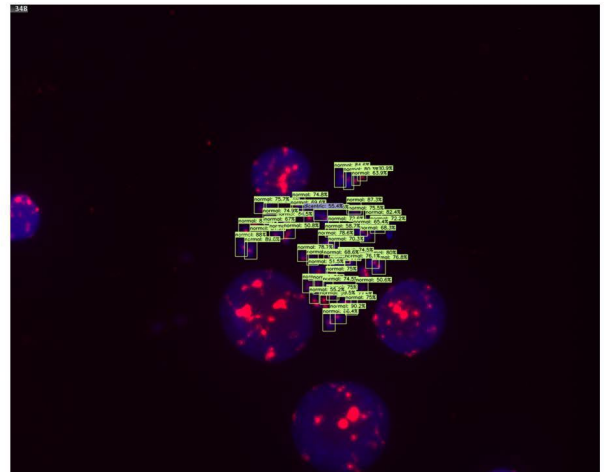
AI detection



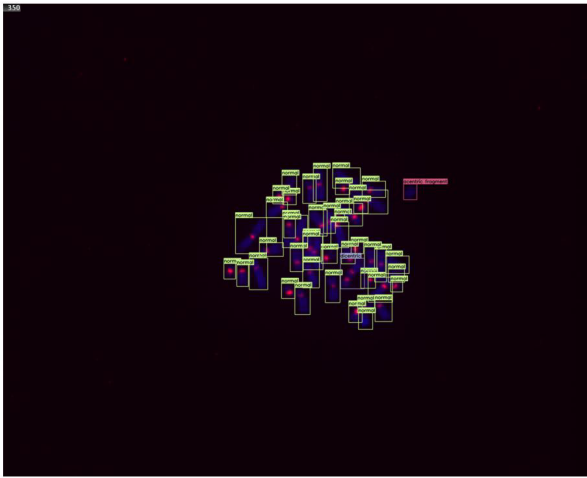
Ground truth



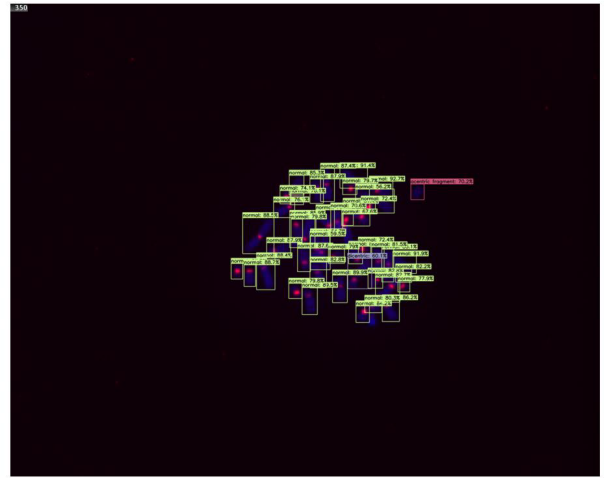
AI detection



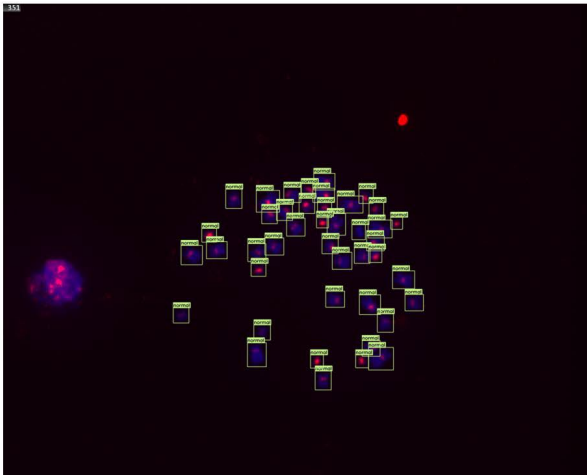
Ground truth



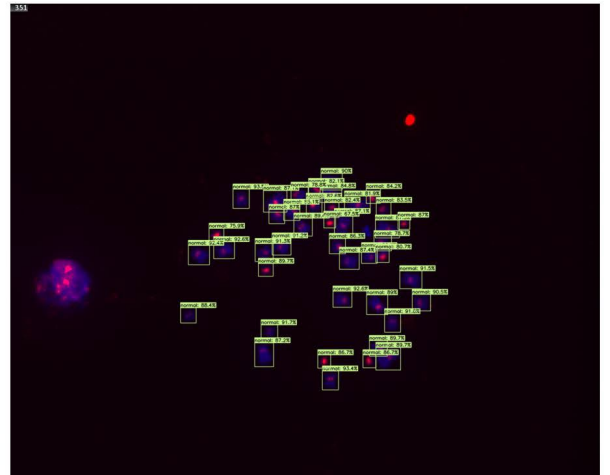
AI detection



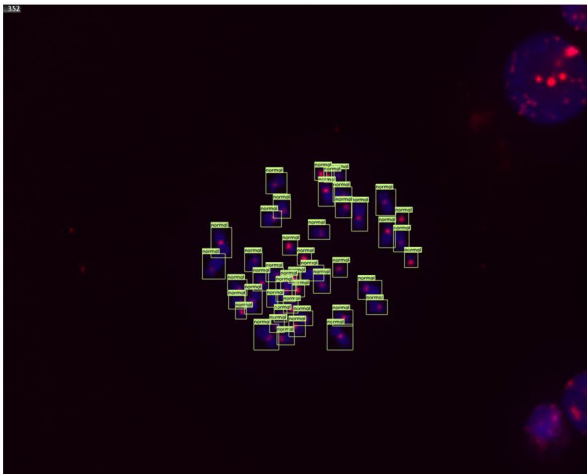
Ground truth



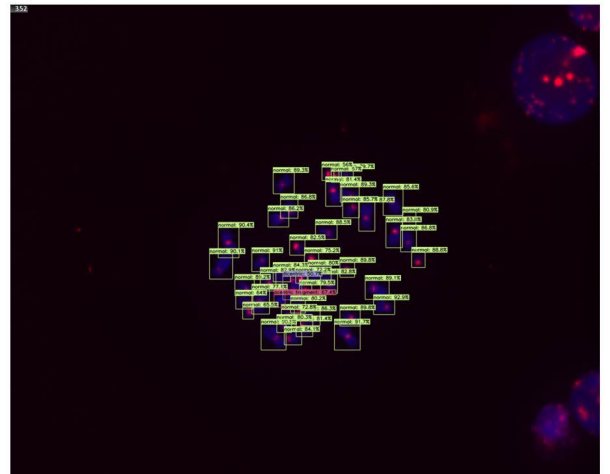
AI detection



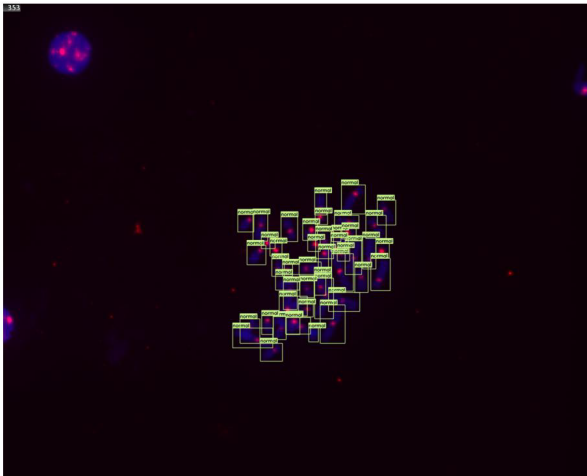
Ground truth



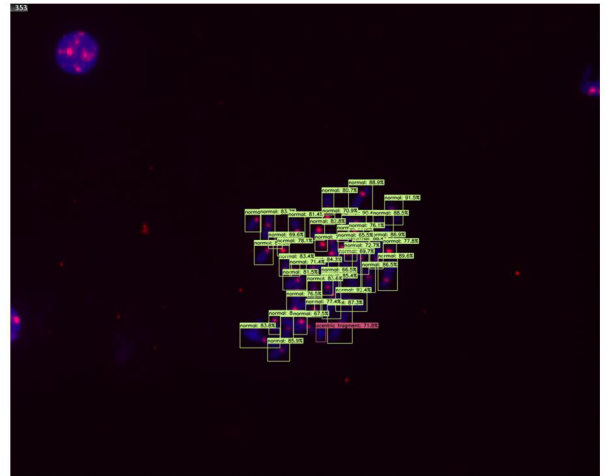
AI detection



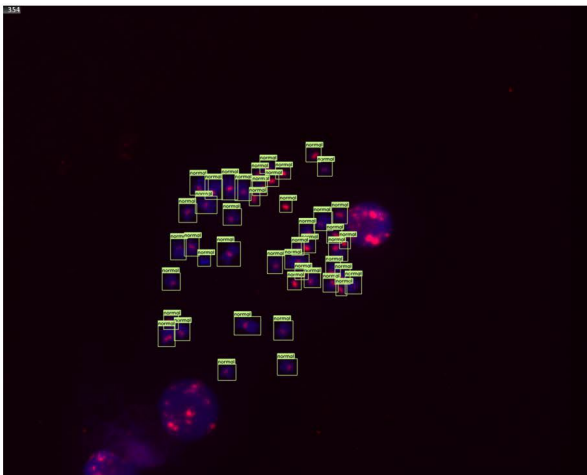
Ground truth



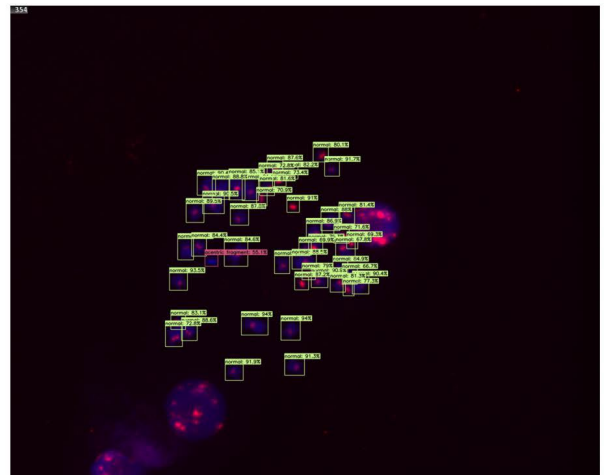
AI detection



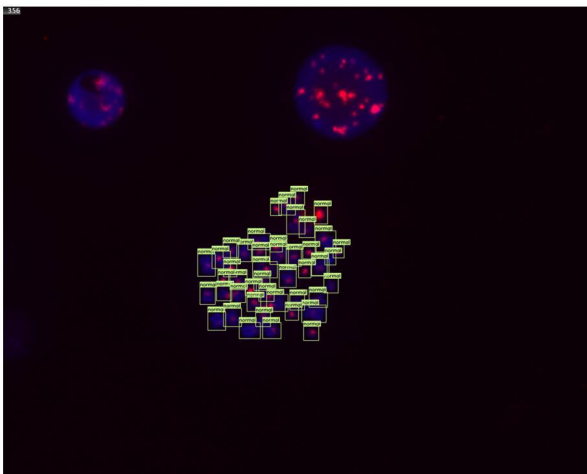
Ground truth



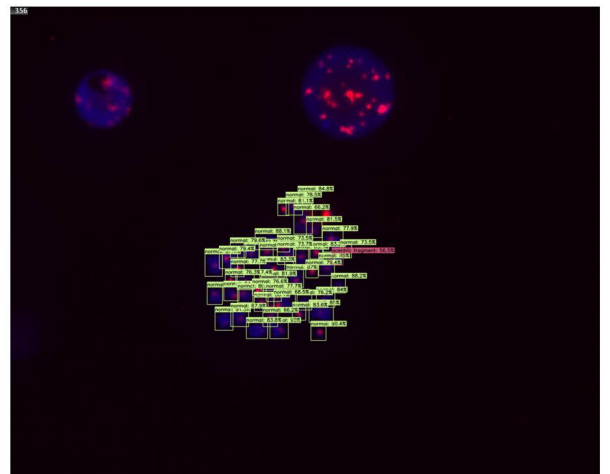
AI detection



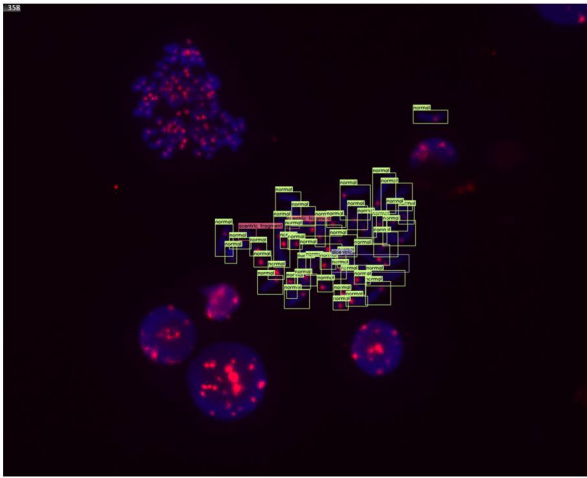
Ground truth



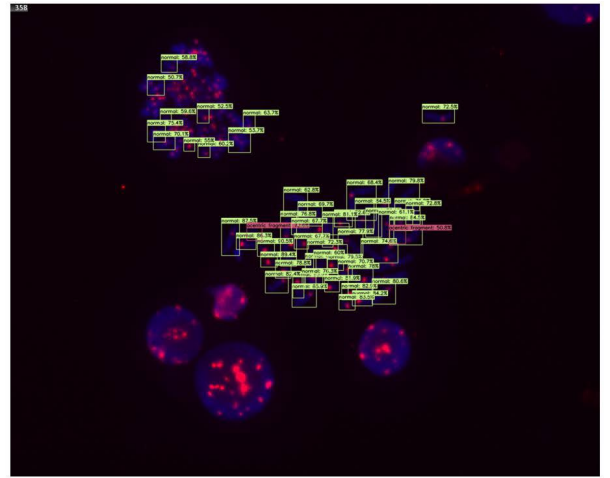
AI detection



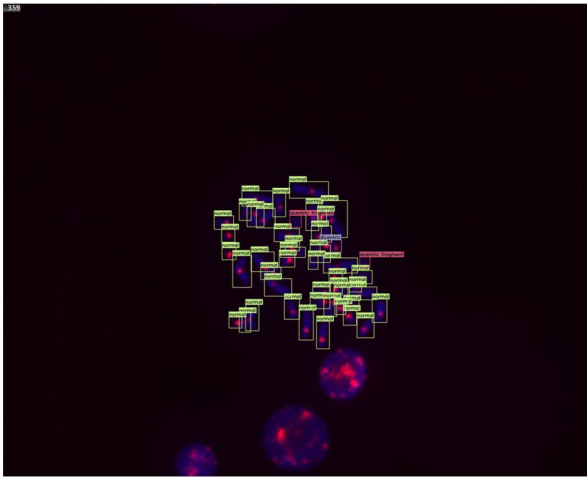
Ground truth



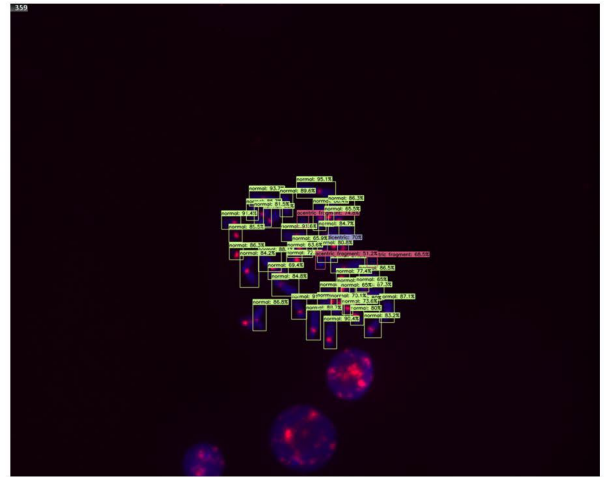
AI detection



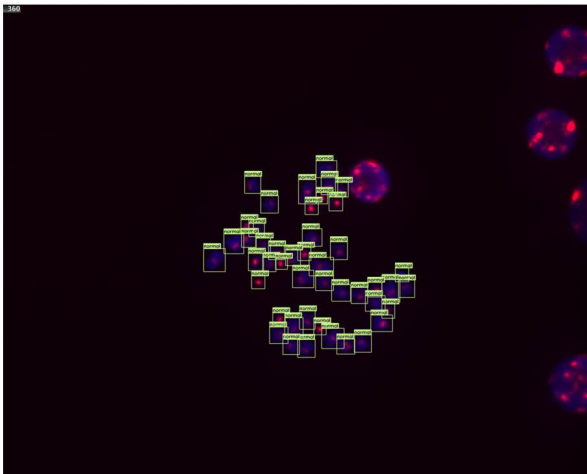
Ground truth



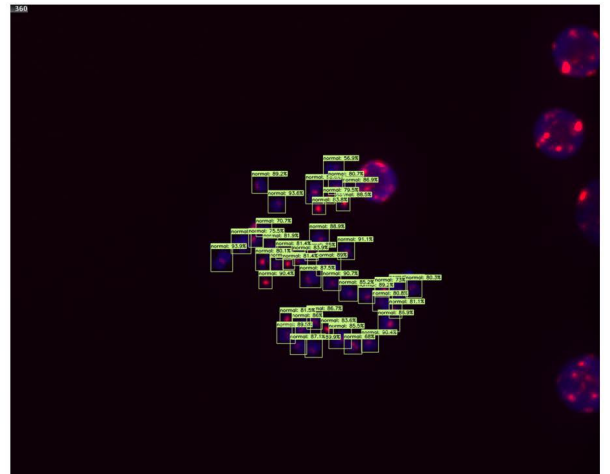
AI detection



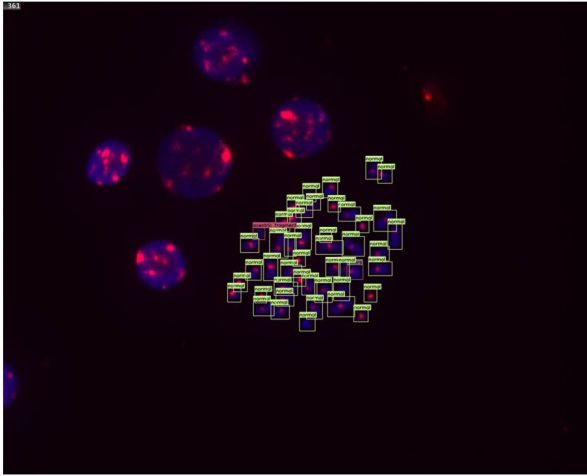
Ground truth



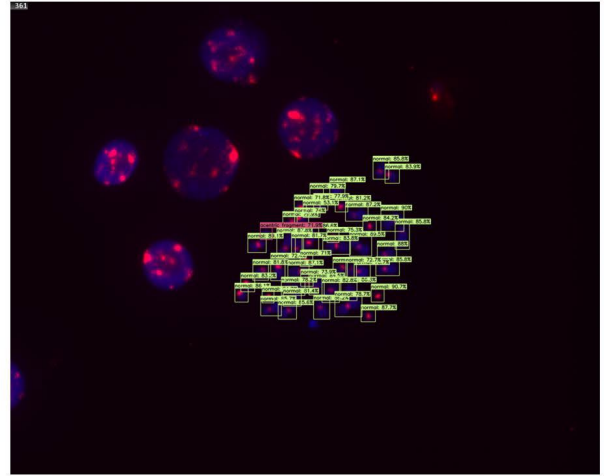
AI detection



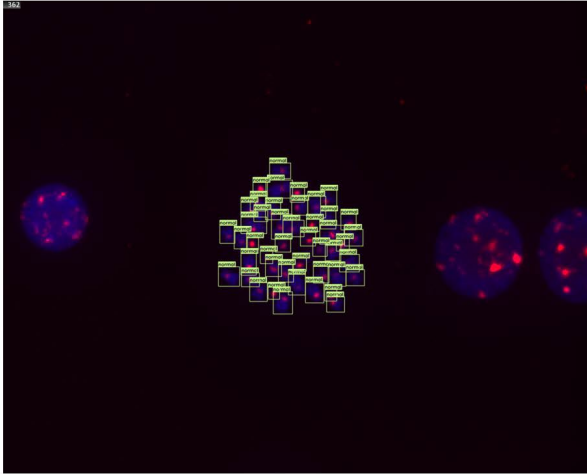
Ground truth



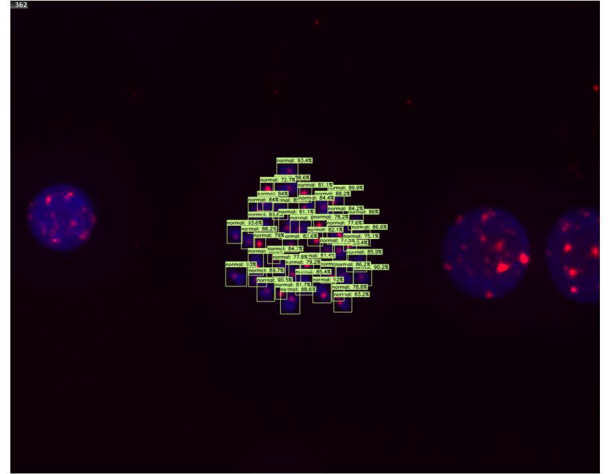
AI detection



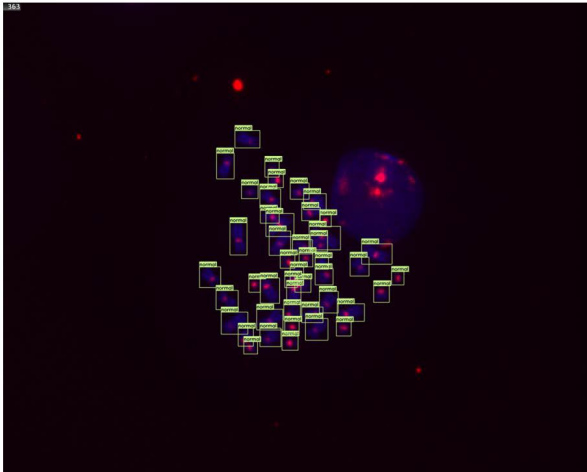
Ground truth



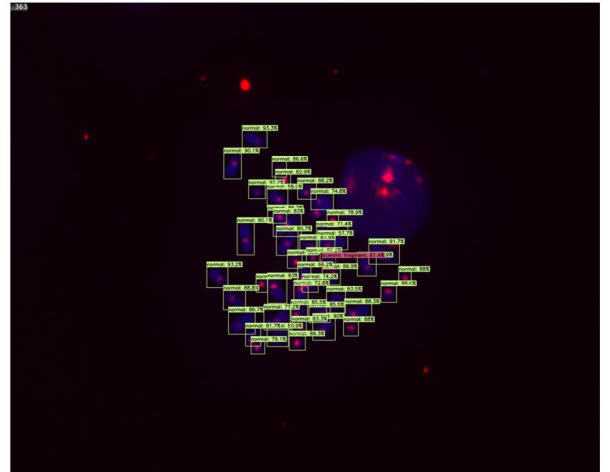
AI detection



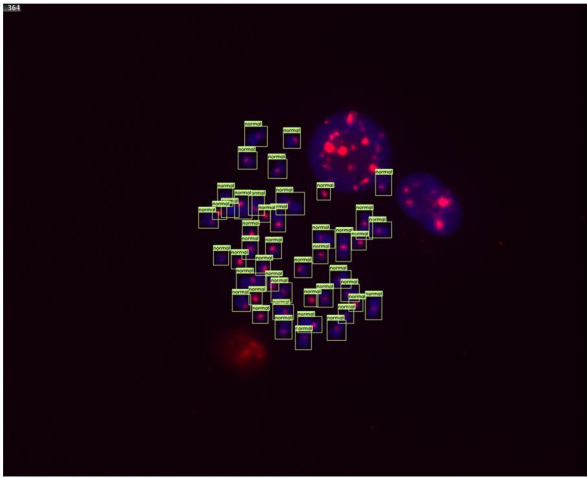
Ground truth



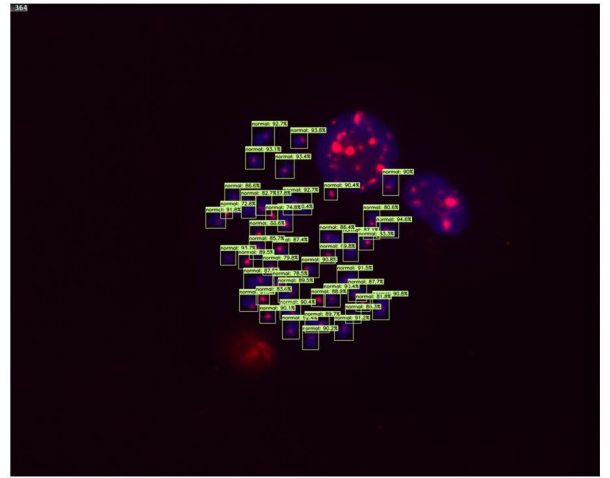
AI detection



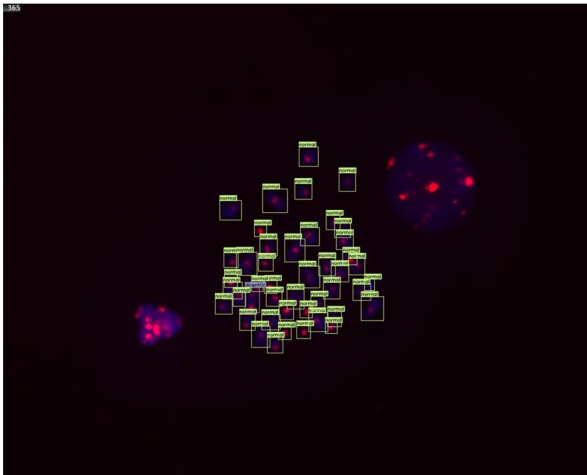
Ground truth



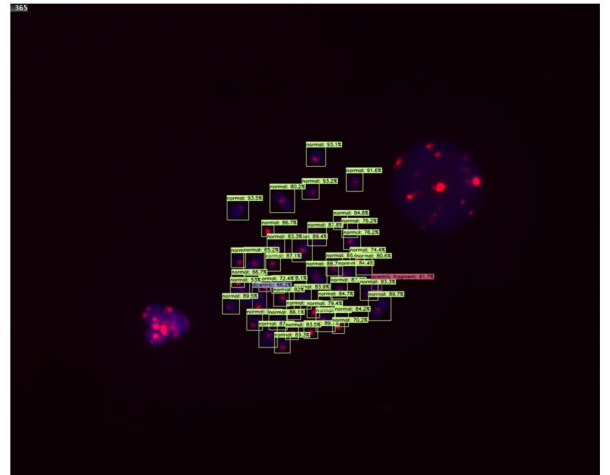
AI detection



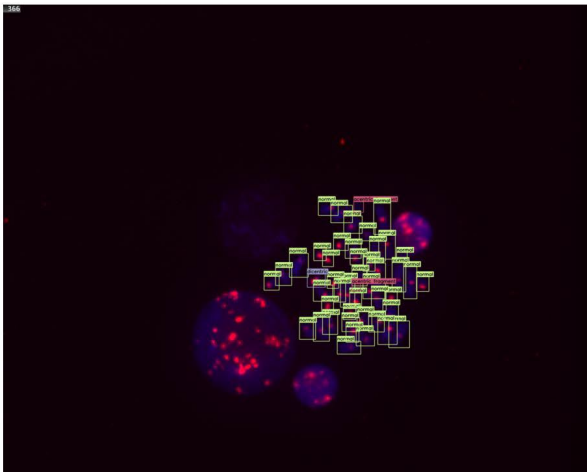
Ground truth



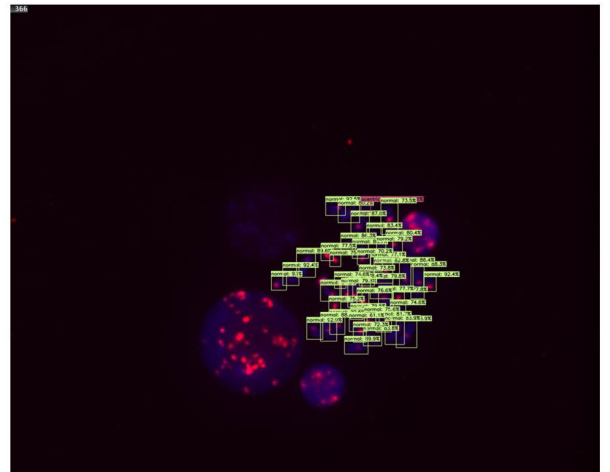
AI detection



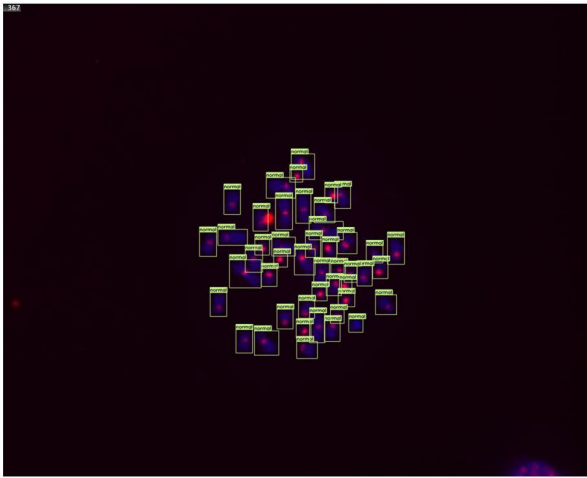
Ground truth



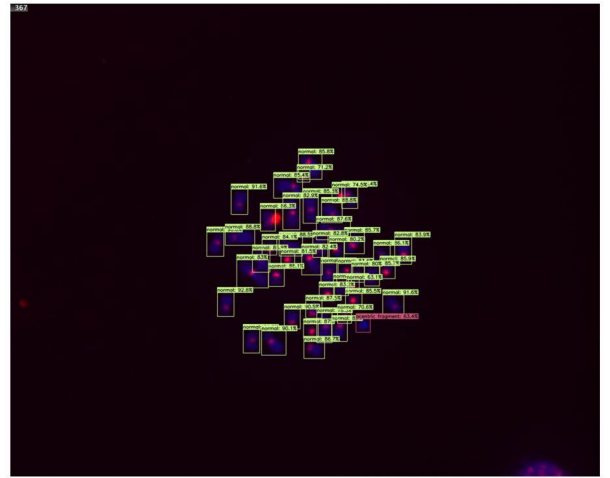
AI detection



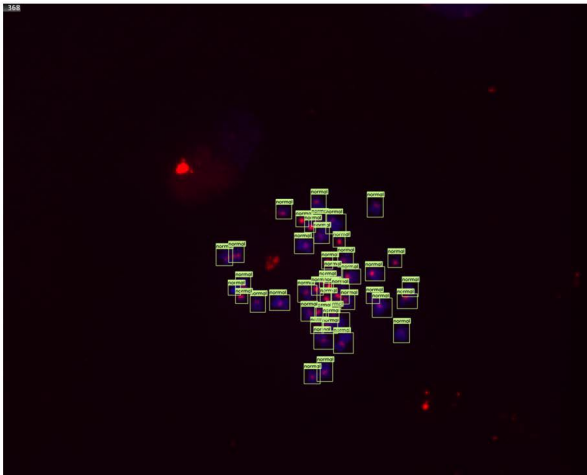
Ground truth



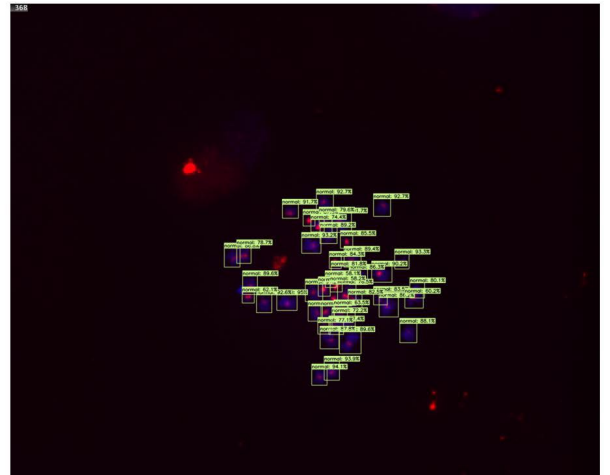
AI detection



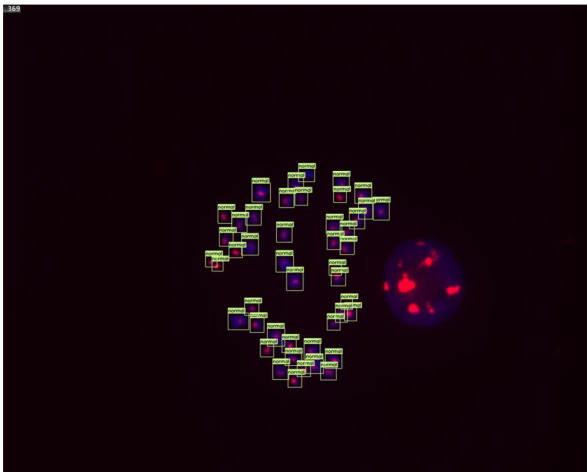
Ground truth



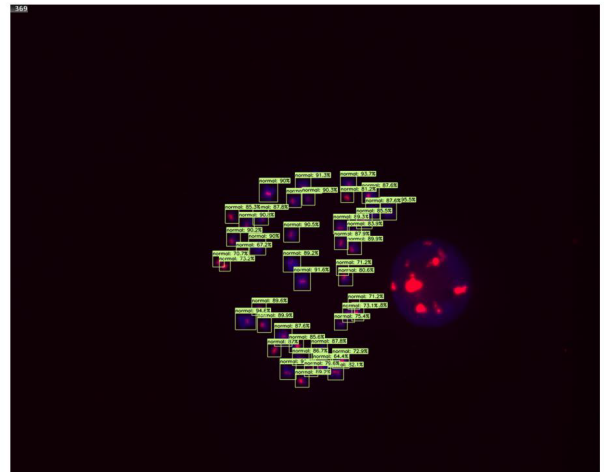
AI detection



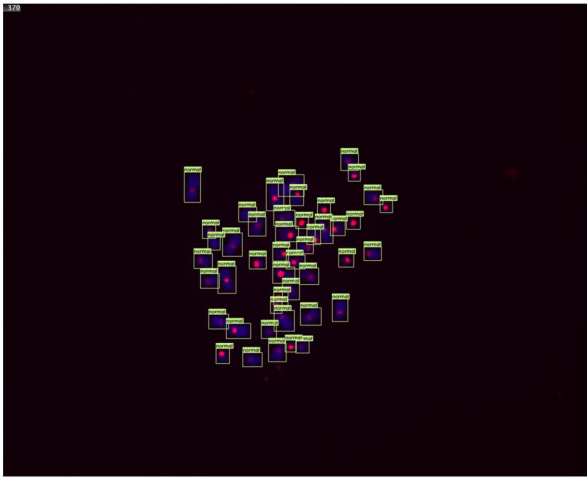
Ground truth



AI detection



Ground truth



AI detection

