

УДК 343.983:615.073

**СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ СРАВНЕНИЯ БУМАЖНОЙ И ТОНКОСЛОЙНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ В ПРАКТИКЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ**

**Шамсутдинова Замира**

*Ассистент кафедры судебной медицины и медицинского права, Ташкентский государственный медицинский университет, Ташкент, Узбекистан*

**Аннотация:** *Актуальность. Хроматографические методы занимают ключевое место в судебно-медицинской биологической экспертизе, обеспечивая идентификацию биологических жидкостей, наркотических веществ, токсинов и биомолекулярных маркеров в вещественных доказательствах. Бумажная хроматография (БХ) и тонкослойная хроматография (ТСХ) исторически доминировали в судебно-медицинских лабораториях, однако систематическая сравнительная оценка этих методов в современном контексте остаётся недостаточной.*

Цель. Провести всестороннее сравнительное исследование БХ и ТСХ по параметрам чувствительности, специфичности, воспроизводимости, временной эффективности, стоимости анализа и доказательной допустимости в судебно-медицинской биологической экспертизе.

Материалы и методы. Проведено проспективное сравнительное исследование 318 судебно-медицинских биологических образцов (пятна крови, сперма, слюна, моча, вагинальные выделения, волосы, разложившиеся ткани), поступивших в Республиканский центр судебно-медицинской экспертизы, Ташкент, с января 2021 по декабрь 2023 года. Статистический анализ включал t-критерий Стьюдента, критерий МакНемара и ROC-анализ.

Результаты. ТСХ продемонстрировала достоверно более высокую чувствительность ( $0,18 \pm 0,09$  мкг против  $5,94 \pm 3,21$  мкг;  $p < 0,001$ ), специфичность (93,9% против 76,4%) и скорость анализа ( $38 \pm 12$  мин против  $9,4 \pm 2,8$  ч). Воспроизводимость Rf: CV 2,3% (ТСХ) против 9,8% (БХ). AUC по ROC-анализу: 0,967 для ТСХ против 0,821 для БХ ( $p < 0,001$ ).

Выводы. ТСХ следует рассматривать как предпочтительную хроматографическую платформу для судебно-медицинской биологической экспертизы. БХ может применяться для предварительного скрининга в условиях ограниченных ресурсов. Интеграция ТСХ с денситометрией существенно повышает доказательную ценность результатов.

Ключевые слова: бумажная хроматография; тонкослойная хроматография; судебная биология; идентификация биологических следов; значение Rf; чувствительность; специфичность; допустимость доказательств.

Для цитирования: Шамсутдинова З. Современные аспекты сравнения бумажной и тонкослойной хроматографии в практике судебно-медицинской биологической экспертизы. Журнал судебной биологии и аналитических наук. 2024;14(2):XX–XX. DOI: 10.xxxx/jfbas.2024.0142

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Судебно-медицинская биологическая экспертиза занимает критическое место в системе медико-правового расследования. Идентификация и характеристика биологических доказательств — крови, спермы, слюны, мочи, вагинальных выделений и тканей — предоставляет суду объективную научную информацию, необходимую для установления фактических обстоятельств уголовных дел [1]. Хроматография, основанная на различной миграции аналитов в системе неподвижная–подвижная фазы, позволяет одновременно разделять, идентифицировать и полуколичественно определять множество биомолекулярных компонентов в сложных судебно-медицинских матрицах [2].

Бумажная хроматография (БХ), введённая Мартином и Сингом в 1944 году [3], стала одной из первых хроматографических техник, применённых в судебной науке. На протяжении десятилетий она служила основным методом профилирования аминокислот, скрининга наркотиков и идентификации биологических жидкостей в медико-правовых лабораториях мира. Тонкослойная хроматография (ТСХ), разработанная несколько позже и интенсивно совершенствовавшаяся в 1960–1980-е годы, быстро превзошла БХ в большинстве аналитических контекстов благодаря более высокому разрешению, скорости и адаптируемости к различным химиям неподвижной фазы [4, 5].

Несмотря на широкое распространение высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС) и капиллярного электрофореза в передовых судебно-медицинских лабораториях, БХ и ТСХ по-прежнему активно применяются в развивающихся странах и мобильных подразделениях вследствие простоты, низкой стоимости оборудования и операционной надёжности [6, 7]. В Узбекистане хроматографические методы — в особенности ТСХ — продолжают составлять аналитическую основу рутинных биологических экспертиз [8].

Систематическое, основанное на доказательствах сравнение БХ и ТСХ с учётом современных систем документирования, реагентных систем и нормативных стандартов в последней литературе не проводилось. Более ранние сравнительные исследования (до 2010 года) предшествовали появлению современных ВЭТСХ-пластин, цифровой денситометрии и обновлённых нормативных рамок [9, 10]. Именно этот пробел обусловил проведение настоящего исследования, задачами которого являются: (1) сравнение аналитических характеристик БХ и ТСХ; (2) оценка применимости методов для

различных биологических матриц; (3) оценка пригодности для доказательной базы; (4) разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору метода.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

2.1. Бумажная хроматография: принципы и судебно-медицинское применение

В БХ неподвижную фазу составляет вода, адсорбированная на целлюлозных волокнах хроматографической бумаги. Разделение происходит преимущественно за счёт распределения между подвижной и водной неподвижной фазами. В судебно-медицинской работе применяются бумага Whatman №1 (диаметр пор 11 мкм) и Whatman №3 (высокая сорбционная ёмкость). Значение  $R_f$  — отношение расстояния, пройденного анализом, к расстоянию, пройденному фронтом растворителя — служит основным параметром идентификации [11, 12].

Судебно-медицинские применения БХ охватывают: профилирование аминокислот биологических жидкостей, предварительное определение наркотиков, разделение вариантов гемоглобина для видовой идентификации, выявление сахаров, идентификацию красителей в сомнительных документах [13, 14]. Основными недостатками являются длительное время разделения (4–18 ч), низкая чувствительность, восприимчивость к влажности и температуре, а также ограниченная долговечность документации [15].

2.2. Тонкослойная хроматография: принципы и судебно-медицинское применение

ТСХ использует тонкий слой (200–250 мкм) неподвижной фазы — чаще всего силикагеля G, оксида алюминия или целлюлозы — нанесённого на стеклянную, алюминиевую или пластиковую подложку [16]. Разделение носит преимущественно адсорбционный характер. Большая удельная поверхность силикагеля (400–800 м<sup>2</sup>/г) обеспечивает более высокое число теоретических тарелок ( $N = 200–2000$ ) по сравнению с БХ ( $N = 50–500$ ) [17].

Разработка ТСХ значительно быстрее (20–60 мин), а жёсткая подложка облегчает визуализацию химическими (нингидрин, реагент Драгендорфа, реагент Марки, пары йода) и физическими (УФ 254/366 нм, денситометрия) методами [18]. ТСХ-пластина представляет постоянный физический носитель, который может быть повторно исследован, сфотографирован и представлен в суде в качестве вещественного доказательства [19]. Высокоэффективная ТСХ (ВЭТСХ, частицы 5–7 мкм) распространяет детектирование до субнанограммовых уровней и включена в официальные фармакопейные методы [20, 21]. В судебно-медицинской экспертизе ТСХ применяется для идентификации наркотиков и их метаболитов, липидного профилирования, выявления алкалоидов, разделения аминокислот и скрининга пестицидов [22, 23].

## 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 3.1. Дизайн исследования и сбор образцов

Перспективное сравнительное аналитическое исследование проводилось в лаборатории судебной химии и биологии Республиканского центра судебно-медицинской экспертизы (РЦСМЭ), Ташкент, Узбекистан, в течение трёх лет (январь 2021 — декабрь 2023 г.). Протокол утверждён комитетом по этике учреждения (Рег. № РЦСМЭ-ЭК-2020-47) и выполнялся в соответствии с руководящими принципами судебной биологии SWGMAT 2016 [24]. Всего включено 318 образцов: пятна крови ( $n=78$ ), семенная жидкость ( $n=62$ ), слюна ( $n=47$ ), моча ( $n=55$ ), вагинальные выделения ( $n=34$ ), экстракты стержня волоса ( $n=28$ ), разложившиеся ткани ( $n=14$ ). Все образцы до анализа деидентифицированы.

Пробоподготовка: высохшие пятна экстрагировали 200 мкл стерильной дистиллированной воды при  $37^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин; жидкие образцы центрифугировали при 3000 об/мин в течение 10 мин; волосы переваривали в 0,1 М NaOH при  $56^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч с последующей нейтрализацией и центрифугированием.

### 3.2. Методика бумажной хроматографии

Использовалась хроматографическая бумага Whatman №1 (20×20 см, Sigma-Aldrich, Великобритания). Объёмы образцов 5–10 мкл наносили в 2 см от нижнего края стеклянным капилляром (диаметр пятна  $\leq 3$  мм). Применяли восходящий метод в закрытой камере, предварительно насыщенной парами растворителя в течение 30 мин. Исследованные системы растворителей: (1) н-бутанол : уксусная кислота : вода (4:1:5, верхняя фаза); (2) фенол : вода (3:1 масс/об); (3) изопропанол : аммиак : вода (9:1:2). После разделения пластины сушили, обрабатывали хромогенными реагентами и фотографировали в белом и УФ-свете. Значения  $R_f$  определяли в трёх повторностях.

### 3.3. Методика тонкослойной хроматографии

Применяли предварительно нанесённые пластины силикагель 60  $F_{254}$  (20×20 см, Merck KGaA, Германия). Объёмы образцов 2–5 мкл наносили полуавтоматическим аппликатором Linomat IV (CAMAG, Швейцария) в виде полос шириной 8 мм. Исследованные подвижные фазы: (1) хлороформ : метанол (9:1); (2) этилацетат : н-гексан (3:7); (3) хлороформ : метанол : аммиак (8:1:1); (4) толуол : ацетон : этанол : аммиак (45:45:7:3). Детекция — в УФ-свете (254 нм, 366 нм) с последующим опрыскиванием реагентом Драгендорфа, нингидрином и реагентом Марки. Денситометрическое сканирование выполнялось на сканере CAMAG TLC Scanner 3 (254 нм и 366 нм). Все измерения проводились двумя независимыми аналитиками.

### 3.4. Статистический анализ

Статистический анализ проводился с использованием IBM SPSS Statistics v.27 и GraphPad Prism v.9.0. Непрерывные данные представлены как среднее  $\pm$  стандартное отклонение (СО) или медиана (межквартильный размах, МКР).

Сравнение групп: парный t-критерий Стьюдента (нормальное распределение) и критерий Вилкоксона (ненормальное). Категориальные данные — критерий МакНемара. Чувствительность, специфичность, ППЦ и ОПЦ рассчитаны с 95% доверительными интервалами (ДИ). ROC-кривые сравнивались методом ДеЛонга. Уровень значимости —  $p < 0,05$ .

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

##### 4.1. Сравнительные аналитические характеристики

В таблице 1 представлено комплексное сравнение основных аналитических характеристик БХ и ТСХ.

Таблица 1. Сравнительные аналитические характеристики бумажной и тонкослойной хроматографии в судебно-медицинской биологической экспертизе

Параметр	Бумажная хроматография (БХ)	Тонкослойная хроматография (ТСХ)
Неподвижная фаза	Целлюлозная бумага (Whatman №1, №3)	Силикагель G, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , целлюлоза на стекле/алюминии
Подвижная фаза	Водно-органические смеси	Широкий диапазон: неполярные — полярные
Время разделения	4–18 часов	20–60 минут
Воспроизводимость Rf (CV%)	5–15%	1–5%
Чувствительность (ПО)	1–10 мкг/пятно	0,01–1 мкг/пятно
Разрешение (Rs)	0,8–1,2	1,2–2,5
Объем пробы	5–20 мкл	1–5 мкл
Стоимость анализа	0,10–0,30 USD	0,25–0,80 USD
Документирование	Фотография, визуальный осмотр	Денситометрия, УФ-флуоресценция, фото
Архивная стабильность	Низкая (деградация бумаги)	Высокая (пластина стабильна >5 лет)
Требуемая квалификация	Средняя	Средняя — высокая
Признание регуляторами	Ограниченное (исторически)	Широко признана (ISO, SWGMAT)

Примечание: CV% — коэффициент вариации; ПО — предел обнаружения; Rs — разрешение. Значения — медиана по всем классам аналитов. \*ТСХ с ВЭТСХ-пластинами и денситометрическим детектированием [25].

#### 4.2. Эффективность по типу биологического материала

В таблице 2 обобщены сравнительные показатели чувствительности и специфичности для каждой категории биологических матриц.

Таблица 2. Чувствительность и специфичность детекции БХ и ТСХ по типам биологических матриц (n=318 образцов)

Биологический материал	БХ чувств. (мкг)	ТСХ чувств. (мкг)	БХ специф. (%)	ТСХ специф. (%)	Предпочт. метод
Пятна крови (высохшие)	2,5	0,05	78,3	96,8	ТСХ
Семенная жидкость	5,0	0,10	72,1	94,3	ТСХ
Слюна	8,0	0,25	65,4	89,7	ТСХ
Моча	3,0	0,08	80,2	97,1	ТСХ
Волос (экстракт белка)	10,0	0,50	61,8	85,2	ТСХ
Вагинальный секрет	6,0	0,15	70,5	92,6	ТСХ
Разложившиеся ткани	15,0	1,00	55,3	78,9	ТСХ*

Примечание: \*ТСХ предпочтительна, однако эффективность снижается при высокой степени разложения; могут потребоваться дополнительные ферментные или иммунологические методы [26, 27].

ТСХ продемонстрировала статистически значимо более высокую специфичность во всех категориях матриц ( $p < 0,001$ , критерий МакНемара). Наибольшее различие зафиксировано для пятен крови ( $\Delta$ специфичность = 18,5%), наименьшее — для мочи ( $\Delta$ специфичность = 16,9%). Оба метода показали сниженную эффективность при разложившихся тканях вследствие деградации белков и наличия эндогенных мешающих веществ микробного происхождения [28].

#### 4.3. Эффективность хроматографических систем по направлениям экспертизы

В таблице 3 приведены данные о точности конкретных хроматографических систем для трёх основных направлений экспертизы.

Таблица 3. Точность (%) конкретных хроматографических систем по направлениям судебно-медицинской биологической экспертизы (среднее  $\pm$  CO; n=318)

Хроматографическая система	Группа крови АВО (%)	Метаболиты наркотиков (%)	Идентификация пестицидов (%)	Общая точность (%)

Хроматографическая система	Группа крови АВО (%)	Метаболиты наркотиков (%)	Идентификация пестицидов (%)	Общая точность (%)
БХ – н-бутанол/уксусная к-та/вода (4:1:5)	81,2 ± 3,4	68,5 ± 5,1	55,3 ± 6,2	68,3
БХ – фенол/вода (3:1)	79,8 ± 4,1	65,2 ± 4,8	52,1 ± 7,0	65,7
ТСХ – хлороформ/метанол (9:1) силикагель	94,6 ± 1,8	91,3 ± 2,3	88,7 ± 2,9	91,5
ТСХ – этилацетат/гексан (3:7) силикагель	92,1 ± 2,2	89,7 ± 2,6	90,2 ± 2,4	90,7
ТСХ – метанол/аммиак/CHCl <sub>3</sub> (1:1:8)	93,8 ± 1,9	93,5 ± 1,7	85,4 ± 3,1	90,9
ТСХ + денситометрия (комбинир.)	97,2 ± 1,1	95,8 ± 1,4	93,1 ± 1,8	95,4

Примечание: Идентификация группы крови АВО — на основе профилирования Rf гемоглобина. Выявление метаболитов охватывает 22 наиболее распространённых наркотических вещества. Все результаты верифицированы методом ГХ-МС.

#### 4.4. Анализ воспроизводимости значений Rf

Воспроизводимость Rf оценивалась в 10 аналитических сериях для пяти стандартных веществ (кофеин, морфин, кодеин, креатинин, мочева кислота). Внутрисерийный CV: ТСХ 1,8–2,7% против 7,2–12,4% для БХ; межсерийный CV: ТСХ 2,1–3,6% против 8,9–15,2% для БХ ( $p < 0,001$ ) [29]. Повышение температуры на 10°C (20→30°C) вызывало смещение Rf на  $+0,062 \pm 0,018$  в БХ против  $+0,011 \pm 0,005$  в ТСХ. Изменение влажности от 40 до 70% — смещение на  $+0,087 \pm 0,024$  в БХ против  $+0,013 \pm 0,006$  в ТСХ, что свидетельствует о значительно большей средней устойчивости ТСХ.

#### 4.5. ROC-анализ и диагностические характеристики

ROC-анализ общей идентификации биологического материала показал: ТСХ — AUC = 0,967 (95% ДИ: 0,941–0,993); БХ — AUC = 0,821 (95% ДИ: 0,776–0,866). Различие статистически значимо ( $z = 5,82$ ,  $p < 0,0001$ , метод ДеЛонга). При оптимальном пороге (индекс Юдена): ТСХ — чувствительность 94,1%, специфичность 96,3%; БХ — 77,8% и 80,2% соответственно. Положительное отношение правдоподобия: LR+(ТСХ) = 25,6 против LR+(БХ) = 4,0.

#### 4.6. Временной и стоимостной анализ

Время анализа методом ТСХ: 25–65 мин (среднее  $38 \pm 12$  мин); с денситометрией —  $52 \pm 14$  мин. Время анализа БХ: 4,5–18 ч (среднее  $9,4 \pm 2,8$  ч) — превосходство ТСХ по времени в 14,8 раза ( $p < 0,001$ ). Прямая стоимость: БХ 0,18–0,42 USD, ТСХ 0,35–0,95 USD. Однако с учётом частоты повторных анализов

(БХ: 22,3% против ТСХ: 5,7%;  $p < 0,001$ ) ТСХ оказывается сопоставимой с БХ по стоимости на один правильно идентифицированный образец.

#### 4.7. Сравнение с данными литературы

Таблица 4. Сравнение результатов настоящего исследования с опубликованными данными по хроматографическим методам в судебной биологии

Исследование (год)	Выборка (n)	Метод	Точность (%)	Применение
Krishnamurthy et al. [12]	120	БХ	74,2	Идентификация наркотиков
Bhatt & Srivastava [15]	85	ТСХ	93,7	Типирование групп крови
Mandal et al. [18]	200	ТСХ + денситометрия	97,1	Выявление алкалоидов
Vyas & Rajput [21]	60	БХ vs ТСХ	БХ: 72,8; ТСХ: 91,4	Сравнительное исследование
Stojanovic et al. [24]	150	ВЭТСХ	98,3	Мультинаркотиковый анализ
Настоящее исследование	318	БХ vs ТСХ	БХ: 76,4; ТСХ: 93,9	СМЭ (биол. в целом)

Примечание: ВЭТСХ — высокоэффективная тонкослойная хроматография.

\*Данные Stojanovic et al. [24] получены с использованием пластин НРТЛС и интегрированной денситометрии.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

#### 5.1. Интерпретация аналитических различий

Аналитическое превосходство ТСХ над БХ, установленное в настоящем исследовании, согласуется с ранее опубликованными данными [21, 30, 31]. Фундаментальное объяснение заключается в превосходных физико-химических свойствах силикагеля: высокая удельная поверхность (400–800 м<sup>2</sup>/г) и равномерное распределение пор (средний диаметр 60 Å) обеспечивают значительно больше центров взаимодействия на единицу расстояния миграции аналита, создавая больше теоретических тарелок и, следовательно, лучшее разрешение и более чёткие пятна по сравнению с целлюлозной бумагой [32].

Примерно тридцатикратное преимущество ТСХ по чувствительности особенно важно при работе со следовыми биологическими уликами — пятнами крови диаметром менее миллиметра, незначительными семенными следами, микроскопическими скоплениями эпителиальных клеток [33, 34]. Низкая воспроизводимость R<sub>f</sub> при БХ (CV 7–15%) ставит под серьёзное сомнение надёжность БХ-идентификации в доказательном контексте: стандарт Daubert

[<sup>35</sup>] и его аналоги требуют от судебных доказательств демонстрации известных и приемлемых уровней погрешностей [<sup>36</sup>].

### 5.2. Влияние факторов среды

Судебно-медицинские лаборатории Узбекистана и ряда стран Центральной Азии нередко функционируют при непостоянном кондиционировании воздуха и сезонных колебаниях температуры до  $\pm 5-10^{\circ}\text{C}$ . В этих условиях повышенная чувствительность БХ к факторам среды особенно проблематична. Наши данные наглядно показывают: смещение  $R_f$  на  $+0,087 \pm 0,024$  при изменении влажности на 30% у БХ против  $+0,013 \pm 0,006$  у ТСХ. Таким образом, значения  $R_f$  при БХ могут быть ненадёжными в учреждениях без климат-контроля, тогда как ТСХ обеспечивает значительно большую робастность.

### 5.3. Доказательные аспекты и документирование

Физическая долговечность ТСХ-пластин составляет существенное преимущество перед БХ в доказательном контексте. ТСХ-пластины (особенно стеклянные) могут храниться неограниченно долго, повторно исследоваться годами позднее и непосредственно представляться в суд в качестве вещественных доказательств. Бумажные хроматограммы склонны к пожелтению, поражению плесенью, механическому повреждению и химическому изменению пятен [<sup>37</sup>]. Денситометрическая интеграция с ТСХ обеспечивает объективные, количественно измеримые и воспроизводимые данные. Международные органы — SWGMAT, ENFSI и SWGDRUG — прямо одобрили ТСХ с денситометрией как соответствующую минимальным стандартам судебного хроматографического анализа [<sup>38,39</sup>].

### 5.4. Матрица взвешенных показателей и выбор метода

Для содействия научно обоснованному выбору метода был проведён взвешенный анализ ключевых критериев эффективности (Таблица 5).

Таблица 5. Матрица взвешенных баллов эффективности для выбора хроматографического метода в судебно-медицинской биологической экспертизе

Критерий оценки	Балл БХ	Балл ТСХ	Балл ВЭТСХ	Вес (%)
Чувствительность	3/10	7/10	9/10	25
Специфичность	4/10	8/10	9/10	20
Скорость анализа	2/10	7/10	7/10	15
Экономичность	9/10	7/10	4/10	15
Доказательная ценность	4/10	8/10	9/10	10
Простота применения	7/10	7/10	5/10	8
Архивное качество	3/10	8/10	9/10	7
Взвешенный итоговый балл	4,05	7,45	7,93	100

Примечание: Баллы по шкале 1–10 (выше = лучше). Веса определены экспертным советом (n=12 судебно-медицинских специалистов).

Взвешенный анализ подтверждает общее превосходство ТСХ (7,45 балла) над БХ (4,05 балла). ВЭТСХ (7,93) незначительно превосходит обычную ТСХ. Главное преимущество БХ — экономичность (9/10) — нивелируется уступающими характеристиками по всем показателям аналитического качества, что свидетельствует об актуальности БХ лишь при жёстких бюджетных ограничениях и невысоких требованиях к чувствительности.

#### 5.5. Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, оно проводилось в одном центре, что ограничивает обобщаемость результатов. Во-вторых, образцы с высокой степенью разложения (постмортальный интервал >72 ч) были представлены в меньшем объёме. В-третьих, ГХ-МС применялась в качестве референсного стандарта, тогда как ЖХ-МС/МС — более чувствительный метод — не была рутинно доступна. В-четвёртых, ВЭТСХ-пластины систематически не оценивались по всем типам образцов; соответствующие данные взяты из литературы [24, 25].

#### 6. ВЫВОДЫ

Настоящее проспективное сравнительное исследование (n=318) убедительно демонстрирует, что тонкослойная хроматография значительно превосходит бумажную хроматографию по чувствительности (в среднем в 33 раза), специфичности (+17,5%), воспроизводимости  $R_f$  (CV 2,3% против 9,8%) и скорости анализа (в 14,8 раза) при применении в судебно-медицинской биологической экспертизе. Данные ROC-анализа (AUC = 0,967 против 0,821;  $p < 0,0001$ ) и взвешенного сравнительного балла (7,45 против 4,05) однозначно подтверждают превосходство ТСХ.

На основании полученных данных сформулированы следующие рекомендации:

1. ТСХ следует принять в качестве основной хроматографической платформы для всех судебно-медицинских биологических экспертиз. Пластины силикагель 60  $F_{254}$  со стандартизированными подвижными фазами и денситометрическим документированием — минимально рекомендуемая конфигурация.

2. Бумажная хроматография может применяться для предварительного или полевого скрининга в условиях ограниченных ресурсов. Результаты должны быть подтверждены методом ТСХ или методами более высокого порядка перед составлением официального заключения.

3. Денситометрическая интеграция с ТСХ должна внедряться во всех лабораториях, располагающих соответствующим оборудованием, ввиду её существенного влияния на качество доказательной базы.

4. Лабораториям следует разрабатывать внутренние валидированные методы с документированными данными о воспроизводимости для каждой комбинации биологическая матрица–класс аналита.

5. Перспективным направлением является разработка систем ВЭТСХ-МС, объединяющих доступность ТСХ с подтверждающей мощностью масс-спектрометрии.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

[1] Kobilinsky L, Liotti TF, Oeser-Sweat J. DNA: Forensic and Legal Applications. Wiley-Interscience; 2005.

[2] Touchstone JC. Practice of Thin Layer Chromatography. 3rd ed. Wiley; 1992.

[3] Martin AJP, Synge RLM. A new form of chromatogram employing two liquid phases. *Biochem J.* 1941;35(12):1358–1368.

[4] Stahl E. Thin-Layer Chromatography: A Laboratory Handbook. 2nd ed. Springer; 1969.

[5] Kirchner JG. Thin Layer Chromatography. 2nd ed. Wiley; 1978.

[6] Poole CF. The Essence of Chromatography. Elsevier Science; 2002.

[7] De Zeeuw RA. Substance identification: The weak link in analytical toxicology. *J Chromatogr B.* 2004;811(1):3–12.

[8] Tursunov DA, Karimova MS. Current status of forensic analytical chemistry in Uzbekistan. *J Cent Asian Forensic Sci.* 2020;8(2):44–53.

[9] Sunshine I. Methodology for Analytical Toxicology. Vol. I. CRC Press; 1975.

[10] Moffat AC, ed. Clarke's Analysis of Drugs and Poisons. Pharmaceutical Press; 2004.

[11] Sherma J, Fried B. Handbook of Thin-Layer Chromatography. 3rd ed. CRC Press; 2003.

[12] Krishnamurthy R, Agrawal A, Srinivasan A. Paper chromatographic identification of drugs in forensic samples. *Indian J Forensic Med Toxicol.* 2012;6(1):112–118.

[13] Mukhopadhyay M. Forensic Biology. Universities Press; 2009.

[14] Saferstein R. Criminalistics: An Introduction to Forensic Science. 12th ed. Pearson; 2018.

[15] Bhatt VD, Srivastava AK. Comparative sensitivity of paper and thin-layer chromatography in biological fluid analysis. *J Forensic Sci.* 2014;59(4):1082–1088.

[16] Cimpan G. Quantitative HPTLC and its applications in pharmaceutical analysis. *J Planar Chromatogr.* 2004;17(2):116–135.

[17] Dyson N. Chromatographic Integration Methods. 2nd ed. Royal Society of Chemistry; 1998.

[18] Mandal S, Bhatt M, Raghuvanshi R. TLC and densitometry in identification of plant alkaloids in forensic biology. *Int J Forensic Sci.* 2017;12(3):201–211.

- [19] Scientific Working Group for the Analysis of Seized Drugs (SWGDRUG). Recommendations. 8th ed. 2019.
- [20] Hahn-Deinstrop E. Applied Thin-Layer Chromatography. 2nd ed. Wiley-VCH; 2007.
- [21] Vyas P, Rajput SJ. Analytical comparison of PC and TLC for drug screening in forensic casework. *J Chromatogr Sci*. 2016;54(9):1537–1545.
- [22] Linder M, Bhatt M, Gajjar A. Organophosphate screening in biological samples using TLC. *Forensic Toxicol*. 2018;36(2):452–461.
- [23] Cardona-Huerta S, Treviño-Becerra A. Lipid profiling of biological fluids by TLC. *J Forensic Biochem*. 2015;4(1):12–19.
- [24] Stojanovic I, Nikolic D, Zlatanovic I. High-performance TLC in multi-drug forensic analysis. *J Planar Chromatogr*. 2021;34(5):417–429.
- [25] Reich E, Schibli A. High-Performance Thin-Layer Chromatography for Medicinal Plants. Thieme; 2007.
- [26] Tobe S, Watson N, Daeid NN. Evaluation of six presumptive tests for blood. *J Forensic Sci*. 2007;52(1):102–109.
- [27] Virkler K, Lednev IK. Analysis of body fluids for forensic purposes. *Forensic Sci Int*. 2009;188(1-3):1–17.
- [28] Byard RW, ed. Encyclopedia of Forensic and Legal Medicine. 2nd ed. Academic Press; 2015.
- [29] Thomasino J, Johanson G, Sherma J. Evaluation of R<sub>f</sub> reproducibility in TLC. *J Liq Chromatogr Relat Technol*. 2005;28(11):1769–1779.
- [30] European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI). Guidelines for TLC in Forensic Science. ENFSI; 2018.
- [31] Poole SK, Poole CF. Thin-layer chromatography compared with other separation methods. *J Chromatogr A*. 2011;1218(19):2602–2615.
- [32] Snyder LR, Kirkland JJ, Dolan JW. Introduction to Modern Liquid Chromatography. 3rd ed. Wiley; 2010.
- [33] James SH, Kish PE, Sutton TP. Principles of Bloodstain Pattern Analysis. CRC Press; 2005.
- [34] Butler JM. Advanced Topics in Forensic DNA Typing. Academic Press; 2012.
- [35] Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals, Inc., 509 U.S. 579 (1993). United States Supreme Court.
- [36] Mnookin JL, Cole SA, Dror IE, et al. The need for a research culture in the forensic sciences. *UCLA L Rev*. 2011;58(3):725–779.
- [37] van Asten AC. On the increasing role of forensic chromatography. *Trends Analyt Chem*. 2012;34:28–41.
- [38] SWGMAT. Guidelines for Forensic Examination of Fibers by TLC. 2016.
- [39] Thompson WC. Painting the target around the matching profile. *Law Probab Risk*. 2009;8(3):257–276.