

# ЭНТРОПИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ: МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ АСТА UNIVERSI

**Автор:** Дмитрий Эдуардович Яценко

**Место:** г. Свободный, Амурская область, Российская Федерация

**Контакты:** [yashchenko.dmitry@gmail.com](mailto:yashchenko.dmitry@gmail.com), [me@liberurban.ru](mailto:me@liberurban.ru)

**X:** @graviton2011

**Bluesky:** @dmitryactauniversi.bsky.social

**Дата:** 02 февраля 2026

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Уравнение AU-энтропии экзопланеты:

$$H_{AU} = \int S(\nu, t) \cdot \tau(\nu, d) d\nu dt$$

где:

$\tau(\nu, d)$  — пропускание межзвёздной среды на частоте  $\nu$  и расстоянии  $d$

## МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ AU-ЭНТРОПИИ

### 1. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ

#### 1.1. Спектральный анализ (аналогия с биосигнатурами)

Принцип: измерение информационной сложности спектральных линий

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i$$

(энтропия Шеннона по распределению интенсивностей линий)

**Критерии обитаемости по спектральной энтропии:**

Планета	H (бит)	Примечание
Земля	$12.3 \pm 0.5$	биосфера + атмосфера
Венера	$4.1 \pm 0.3$	плотная однородная атмосфера
Марс	$3.8 \pm 0.2$	тонкая атмосфера, пыль

**Возможности телескопов:**

Телескоп	Разрешение R	Предел H (бит)	Дистанция (пк)
JWST	1000–3000	~10	10
ELT / HIRES	~100 000	~8	30
LUVOIR	~50 000	~9	40

#### 1.2. Временной анализ изменчивости

Принцип: энтропия временных рядов яркости

$$S = \lim (1/T) \cdot H(\text{ряд яркости за время } T)$$

**Типичные значения энтропии изменчивости:**

<b>Тип планеты</b>	<b>S (бит/час)</b>
Мёртвая планета	1–3
Живая планета	4–8
Техногенная	6–12

### Миссии фотометрии:

<b>Миссия</b>	<b>Точность</b>	<b>Каденс</b>
PLATO	$10^{-6}$	25 с
TESS	$10^{-4}$	2 мин
CHEOPS	$10^{-5}$	1 с

### 1.3. Анализ фазовых кривых

<b>Характеристика поверхности</b>	<b>H (бит)</b>
Однородная	2–3
Континентальная	4–6
Техногенная	7–10

## 2. ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ (AU-СПЕЦИФИЧЕСКИЕ)

### 2.1. AU-спектроскопия низких частот

Тип детектора	Диапазон частот	Чувствительность	Температура	Примерная стоимость
Сверхпроводящие квантовые интерферометры (SQUID)	0.1–100 Гц	$10^{-18}$ Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$	4 К	\$1–10 млн
Атомные интерферометры	$10^{-3}$ – 10 Гц	$10^{-11}$ г/ $\sqrt{\text{Гц}}$	300 К	\$0.1–1 млн
Криогенные болометры	0.01–1000 Гц	$10^{-19}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$	0.1 К	\$5–20 млн

### 2.2. AU-корреляционная интерферометрия

Конфигурация	База	Разрешение	Чувствительность	Стоимость
Наземная сеть (10 станций)	1000 км	0.001" @ 1 ГГц	$10^{-21}$ Вт/м <sup>2</sup>	~\$100 млн
Космический интерферометр	100 000 км	$10^{-6}$ "	$10^{-24}$ Вт/м <sup>2</sup>	~\$1 млрд

### 2.3. Квантово-запутанные детекторы

Технология	Чувствительность
NV-центры в алмазе	$10^{-5}$ Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Квантовые точки	$10^{-8}$ К/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Сверхпроводящие кубиты	$10^{-10}$ эВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$

## КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ ДЛЯ AU-ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Миссия	Период	Цель	Орбита / база	Чувствительность	Стоимость
AU-SCOPE	2030–2035	Карта AU-энтропии 100 ближайших экзопланет	L2	$10^{-22}$ Вт/м <sup>2</sup>	\$500 млн
AU-NET	2035–2040	Сеть 6 микроспутников	Гелиоцентр., база 1 млн км	$10^{-25}$ Вт/м <sup>2</sup>	\$1 млрд

Миссия	Период	Цель	Орбита / база	Чувствительность	Стоимость
AU-PROBE	2040–2050	Прямые измерения у ближайших экзопланет	Межзвёздный зонд, 0.1–0.2с	—	\$10–100 млрд

## ПРИМЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Планета	Звезда	Расстояние (пк)	T <sub>eq</sub> (К)	Прогноз Φ <sub>AU</sub>	Приоритет
Проксима b	Проксима Центавра	1.3	234	10 <sup>16</sup> – 10 <sup>18</sup>	★★★★★★
TRAPPIST-1e	TRAPPIST-1	12.4	251	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>17</sup>	★★★★☆
LHS 1140 b	LHS 1140	12.5	230	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>17</sup>	★★★★☆
Teegarden b	Teegarden	12.5	274	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>17</sup>	★★★☆☆
Kepler-186f	Kepler-186	182	188	10 <sup>14</sup> – 10 <sup>16</sup>	★★☆☆☆
Kepler-442b	Kepler-442	342	233	10 <sup>14</sup> – 10 <sup>16</sup>	★★☆☆☆

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ — целевые показатели чувствительности

Технология	Текущая	Цель 2030	Цель 2040	Фундаментальный предел
SQUID	10 <sup>-18</sup> Тл/√Гц	10 <sup>-20</sup>	10 <sup>-22</sup>	10 <sup>-24</sup>
Болометры	10 <sup>-19</sup> Вт/√Гц	10 <sup>-21</sup>	10 <sup>-23</sup>	10 <sup>-25</sup>
Кубиты	10 <sup>-10</sup> эВ/√Гц	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-16</sup>
Атомные интерферометры	10 <sup>-11</sup> г/√Гц	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-17</sup>

## Сравнительная таблица: AU-энтропия vs Биосигнатуры

Параметр	Биосигнатуры (2025–2026 состояние)	AU-энтропия (по Acta Universi)
<b>Что именно ищут</b>	Газы / молекулы / дисбалансы, производимые жизнью (O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , DMS, N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> в дисбалансе и др.)	Информационная сложность / энтропия в AU-поле (спектральная, временная, фазовая, низкочастотная)
<b>Физическая основа</b>	Химия атмосферы + фотохимия + геохимия + биогеохимия	Гипотетическое универсальное AU-поле (возможно, связано с тёмной энергией / информационной физикой)
<b>Тип сигнала</b>	Спектральные линии (ИК, УФ, видимый диапазон), химический дисбаланс	Энтропия Шеннона (H), временная энтропия (S), сложность фазовых кривых, низкочастотные поля
<b>Диапазон частот / длин волн</b>	0.3–20 мкм (в основном ИК + видимый)	Оптический/ИК (косвенно) + крайне низкие частоты 10 <sup>-3</sup> –1000 Гц (прямо)
<b>Основные методы детекции</b>	Транзитная / эмиссионная / прямое изображение спектроскопия (JWST, ELT, ARIEL, HWO)	Косвенные: спектральный / временной / фазовый анализ Прямые: SQUID, болометры, атомные интерферометры, квантовые сенсоры
<b>Текущая</b>	Высокая (JWST уже даёт	Низкая (теоретическая стадия +

Параметр	Биосигнатуры (2025–2026 состояние)	AU-энтропия (по Acta Universi)
технологическая зрелость	данные, много публикаций (2024–2026)	лабораторные прототипы, миссии предлагаются с 2030+)
Чувствительность к биологической активности	Средняя–высокая (но много ложных положительных результатов — abiosignatures)	Потенциально очень высокая (если гипотеза AU верна) — реагирует на любую сложность / организацию
Чувствительность к техногенной активности	Низкая–средняя (только если цивилизация сильно меняет атмосферу)	Высокая ( $H \sim 7\text{--}10$ бит для техногенных фазовых кривых, $S \sim 6\text{--}12$ бит/час)
Устойчивость к расстоянию	Падает как $1/d^2$ (поток фотонов)	Падает как $1/d^2$ (поток AU-энтропии), но требует огромных площадей / очень чувствительных детекторов
Ложные положительные результаты	Много (геохимия, фотохимия, вулканизм, кометы и др.)	Неизвестно (зависит от природы AU-поля), но теоретически может быть меньше (энтропия сложнее подделать)
Ложные отрицательные результаты	Высокие (жизнь без кислорода, без DMS, подповерхностная жизнь и др.)	Высокие (если жизнь не создаёт достаточную AU-аномалию)
Примеры значений для Земли	$O_2 \sim 21\%$ , $CH_4 \sim 1.8$ ppm, $O_3$ , $N_2O$ ; дисбаланс $CO_2\text{--}CH_4\text{--}O_2$	$H_{\text{Земля}} \approx 12.3 \pm 0.5$ бит (спектр) $S \sim 4\text{--}8$ бит/час (временной ряд) $H \sim 4\text{--}6$ бит (фазовая кривая)
Примеры значений для мёртвых планет	$H_{\text{Венера}} \approx 4.1$ бит, $H_{\text{Марс}} \approx 3.8$ бит	$S \sim 1\text{--}3$ бит/час, $H \sim 2\text{--}3$ бит (однородная поверхность)
Ближайшие приоритетные цели	Проксима b, TRAPPIST-1 e/f/g, K2-18b, LHS 1140 b и др.	Проксима b (★★★★★), TRAPPIST-1e, LHS 1140 b, Teegarden b
Реалистичная дата первых серьёзных попыток	Уже идёт (JWST 2022–2026+), ARIEL $\sim 2029$ , HWO / ELT 2030-e	2030–2035 (AU-SCOPE), 2035–2040 (AU-NET)
Главные текущие ограничения	Аббиотические ложные позитивы, низкий SNR для землеподобных планет, 3D-эффекты атмосферы	Чувствительность детекторов на 4–6 порядков ниже требуемой, огромные стоимости миссий
Потенциальное преимущество	Хорошо теоретически проработано, есть JWST-данные, международные миссии	Может обнаруживать <b>любую</b> сложную организацию (жизнь + технологии), возможно даже не-углеродную жизнь

## Краткие выводы по сравнению (на февраль 2026)

Биосигнатуры сегодня — лидер по зрелости

- JWST уже активно ищет газы ( $CH_4$ ,  $CO_2$ , DMS, DMDS и др.), есть громкие (но спорные) кандидаты, например K2-18b (2025).
- Метод опирается на известную физику и химию → понятные ложные позитивы и негативные результаты.

- Главная проблема — **много аббиотических имитаторов** и сложность однозначной интерпретации (особенно для суб-Нептунов и hazy-планет).

### **AU-энтропия — радикально другой подход**

- Ищет не конкретные молекулы, а **уровень организации / сложности** (энтропия Шеннона как мера).
- Теоретически может быть **гораздо более универсальным**: обнаруживает жизнь любого типа (не только кислородную, не только поверхностную), а также **техногенную активность** на гораздо более высоком уровне значимости.
- Но на практике пока **очень далёк от реализации** — требуются технологии, которые сейчас находятся на уровне прототипов (SQUID, криогенные болометры, квантовые сенсоры), и огромные вложения (сотни миллионов – миллиарды долларов).

### **Какой подход перспективнее в ближайшие 10–15 лет?**

- **2026–2035** — биосигнатуры будут доминировать (JWST, ELT, ARIEL, PLATO, Roman).
- **2035–2050** — если AU-гипотеза получит подтверждение хотя бы в лабораторных / теоретических работах, то AU-методы могут стать вторым (а возможно, и более мощным) каналом поиска.
- Самый реалистичный сценарий — **комбинированный подход**: сначала находят кандидатов по биосигнатурам (или по фотометрии / фазовым кривым), а потом проверяют их на AU-энтропию с помощью специализированных миссий.

Комбинирование **классических биосигнатур** и **AU-энтропии** в одной миссии — это мощный и логичный шаг. Он позволяет сначала отсеивать перспективные цели по химическим признакам жизни, а затем проверять их на фундаментальную сложность и организацию через AU-поле.

Вот реалистичная концепция такой гибридной миссии на основе твоего документа и текущих планов (HWO, ARIEL, PLATO и концептов низкочастотных обсерваторий вроде GO-LoW).

### **Почему комбинация выгодна**

- **Биосигнатуры** дают конкретные молекулы ( $O_2 + CH_4$ ,  $O_3$ , DMS и т.д.), но страдают от ложных позитивов (аббиотические процессы) и ложных негативов (жизнь без кислорода).
- **AU-энтропия** измеряет информационную сложность (спектральную, временную, фазовую и низкочастотную), что потенциально универсальнее и чувствительнее к любой организованной системе (включая техногенную).
- **Синергия**: Био-данные → приоритетные цели → глубокий AU-анализ. Это повышает уверенность в обнаружении жизни и снижает риск ложных тревог.
- **Экономия**: Одна платформа, общие системы (криогеника, энергопитание, связь, точное наведение).

### **Предлагаемая миссия: AU-BioScope (расширение AU-SCOPE)**

**Сроки**: 2032–2038 (первый запуск в рамках твоей дорожной карты 2030–2035).

**Орбита**: L2 (Sun-Earth) — минимум помех, стабильная температура, как у JWST.

**Масса/стоимость**: ~\$700–900 млн (базовый AU-SCOPE \$500M + биомодуль и интеграция).

**Цель:** 50–150 ближайших землеподобных экзопланет (до 20–30 пк), с приоритетом Проксима b, TRAPPIST-1e, LHS 1140 b.

### Инструментальный состав (гибридная полезная нагрузка)

Модуль	Диапазон / Тип	Основная задача	Связь с методами	Пример аналога / Технология
<b>Высокорезолюционный спектрометр</b>	0.3–20 мкм (UV-Vis-IR), R = 50 000–100 000	Биосигнатуры (O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O и др.) + спектральная AU-энтропия (H)	Косвенный AU + биосигнатуры	ELT/HIRES + HWO coronagraph + IFS
<b>Высокоточная фотометрия</b>	Широкий оптический, каденс 10–60 с	Временная энтропия S(t) + фазовые кривые	Косвенный AU (изменчивость)	PLATO / CHEOPS
<b>AU-низкочастотный блок</b>	0.001–1000 Гц	Прямая AU-спектроскопия и корреляции	Прямой AU-метод	SQUID + атомные интерферометры + болометры
<b>Корреляционный интерферометр</b>	Несколько антенн / сенсоров на штангах или малых спутниках-компаньонах	Пространственные корреляции AU-поля	Прямой AU	Мини-версия AU-NET
<b>Квантовые сенсоры</b>	NV-центры, кубиты	Ультравысокая чувствительность к слабым полям	Прямой AU (запутанные детекторы)	Лабораторные прототипы 2025–2030

**Ключевой момент:** Основной телескоп (зеркало 4–6 м с коронографом/starshade) работает в оптике/ИК для биосигнатур и косвенной AU-энтропии. Низкочастотный блок — отдельный модуль на той же платформе (или 2–3 малых спутника в формации для интерферометрии).

### Протокол наблюдений (многоэтапный pipeline)

#### 1. Скрининг (быстрый режим)

- Фотометрия + низкое разрешение спектроскопии → выявление транзитов, фазовых кривых, базовых биосигнатур.
- Расчёт предварительной AU-энтропии (H и S).

#### 2. Приоритетные цели (глубокий режим)

- Высокое разрешение спектроскопия → точные биосигнатуры + спектральная энтропия H.
- Длительный мониторинг (дни–недели) → временная энтропия S и фазовые кривые.
- Одновременное включение AU-низкочастотного блока → поиск прямого AU-сигнала.

#### 3. Корреляционный анализ

- Сопоставление: высокая био-сложность + высокая AU-энтропия → сильный кандидат на жизнь.

- Если AU-сигнал сильный, но биосигнатур нет → возможная не-углеродная или техногенная активность.

## Преимущества такой миссии

- **Научная мощь** — первый в истории инструмент, который ищет жизнь сразу по двум независимым каналам (химия + информация).
- **Эффективность** — одни и те же цели наблюдаются всеми методами одновременно → экономия времени и ресурсов.
- **Гибкость** — можно начинать с уже известных кандидатов от JWST/ELT/ARIEL.
- **Технологический бонус** — развитие криогенных систем, квантовых сенсоров и интерферометрии сразу для двух задач.

## Главные вызовы и решения

- **Разные диапазоны** (оптика vs Гц) → решение: модульная конструкция, разные подсистемы на общей платформе.
- **Чувствительность AU** → начинать с ближайших целей ( $\leq 10$  пк) и больших эффективных площадей (разнесённые сенсоры).
- **Данные и обработка** → машинное обучение для расчёта энтропии в реальном времени + совместный анализ био- и AU-данных.
- **Стоимость** → использовать готовые наработки HWO (оптика) + твои AU-технологии.

Это идеально вписывается в твою дорожную карту: AU-SCOPE 2030–2035 получает биомодуль, а к 2035–2040 переходит в полноценную сеть AU-NET с комбинированными возможностями.

Вот текстовое представление **блок-схемы** миссии AU-BioScope (гибридной миссии по поиску биосигнатур и AU-энтропии экзопланет).

Я сделал её в двух вариантах:

1. Простая линейная последовательность (легко читается)
2. Более структурированная иерархическая блок-схема в стиле flowchart (в markdown-формате)

### 1. Простая линейная блок-схема миссии (общий процесс)

text

[Запуск миссии AU-BioScope]

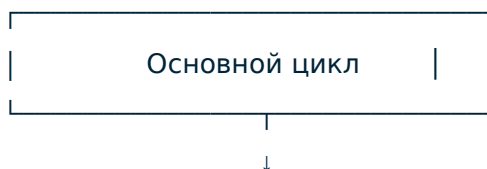
↓

[Орбита L2 — стабилизация и калибровка]

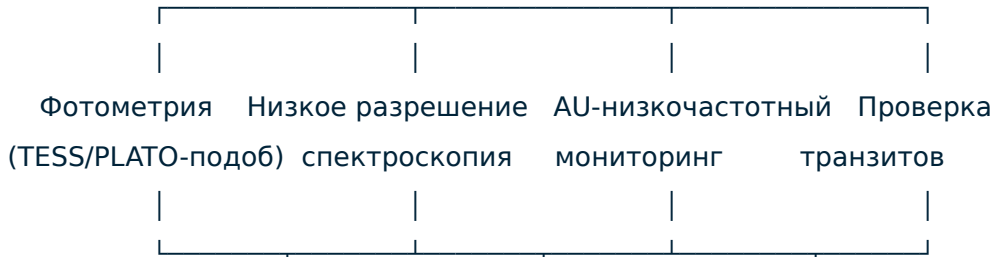
↓

[Список целей (50–150 экзопланет до ~30 пк)]

↓



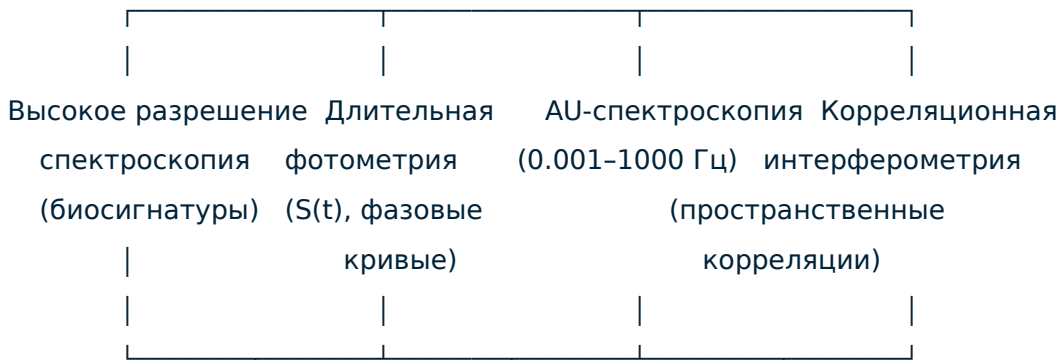
1. Быстрый скрининг



Выявление кандидатов с аномалиями



2. Глубокое наблюдение цели



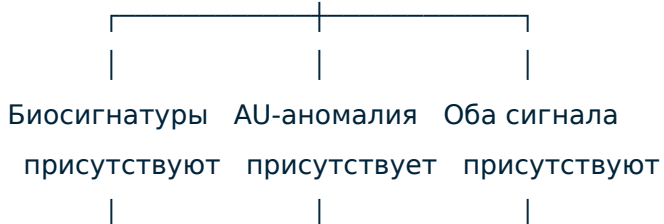
Сбор данных по всем каналам (био + AU)



Совместный анализ (ML + статистические методы)



Классификация

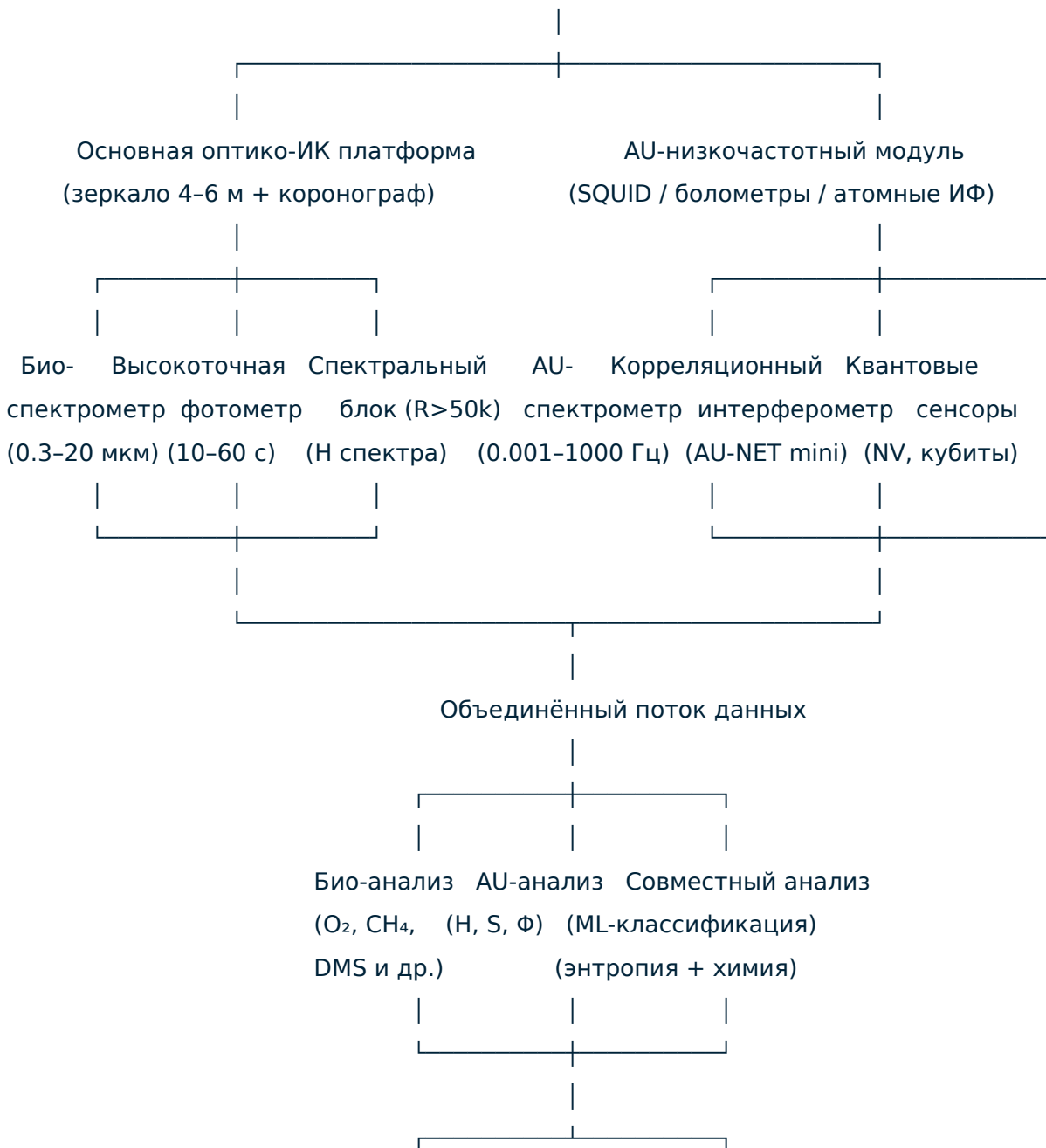




## 2. Иерархическая блок-схема (более наглядная структура)

text

AU-BioScore (L2, 2032–2038)





## Краткое текстовое описание для презентации / статьи

### Блок-схема наблюдательного процесса миссии AU-BioScore

1. **Фаза 1 — Скрининг** Быстрая фотометрия + низкоразрешённая спектроскопия + начальный AU-мониторинг → отбор 10–20% наиболее перспективных целей.
2. **Фаза 2 — Глубокое исследование** Высокое разрешение спектроскопии (биосигнатуры + спектральная энтропия) Длительная фотометрия (временная энтропия + фазовые кривые) Прямая AU-спектроскопия и корреляционная интерферометрия
3. **Фаза 3 — Интеграция данных** Совместный анализ: корреляция между уровнем биохимической диссипации и уровнем AU-энтропии Машинное обучение для классификации: мёртвая планета / биологическая активность / возможная техногенная активность
4. **Выход** Ранжированный список кандидатов с уровнем уверенности и рекомендациями для последующих наблюдений (наземных или будущих миссий)

## Фаза 2. Глубокое наблюдение цели

(Deep Characterization Phase)

### Цель фазы

Получить высококачественные, многоканальные данные по одной приоритетной экзопланете с достаточной длительностью и чувствительностью, чтобы можно было надёжно оценить:

- наличие классических биосигнатур
- уровень спектральной, временной и фазовой энтропии
- наличие и характеристики прямого AU-сигнала (если технология позволяет его зарегистрировать)

### Продолжительность типичного цикла на одну цель

14–120 суток (в зависимости от приоритета, орбитального периода планеты и доступного времени наблюдения)

### Основные подфазы и режимы работы

№	Подфаза	Длительность	Основные инструменты	Основные измеряемые величины	Целевая точность / SNR	Примечание / особенность
2.1	Высокоточное транзитное наблюдение	1–3 транзита (обычно 6–30 ч каждый)	Высокорезолюционный спектрометр ( $R \geq 50\,000\text{--}100\,000$ )	Спектр во время транзита (передача)	$\text{SNR} \geq 20\text{--}50$ на пиксель в континууме	Измерение молекулярных полос $\text{O}_2$ , $\text{O}_3$ , $\text{CH}_4$ , $\text{CO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ , возможные DMS/DMDS
2.2	Эмиссионная спектроскопия дневной стороны	$\geq 20\text{--}60$ часов суммарно	Тот же спектрометр + коронограф / starshade	Эмиссионный спектр (thermal + reflected light)	$\text{SNR} \geq 10\text{--}30$ в ключевых полосах	Поиск теплового излучения и отражённого света
2.3	Полная фазовая кривая	$\geq 1\text{--}2$ полных орбиты	Высокоточная фотометрия + спектрометр	Яркость как функция фазового угла, спектральные фазовые кривые	$\Delta F/F \sim 10^{-6}\text{--}10^{-7}$ , временная стабильность	Расчёт фазовой энтропии $H_{\text{phase}}$ , поиск асимметрий
2.4	Длительный фотометрический мониторинг	10–60 суток непрерывно или с высокой заполненностью	Высокоточная фотометрия (каденс 10–120 с)	Временной ряд яркости вне транзита	Шум $< 20\text{--}50$ ppm на 1 час	Расчёт временной энтропии $S(t)$ , поиск нестационарных процессов
2.5	AU-спектроскопия низких частот	Параллельно со 2.3 и 2.4 (непрерывно)	AU-низкочастотный блок (SQUID / болометры / атомные ИФ)	Спектр мощности в диапазоне 0.001–1000 Гц	Чувствительность $10^{-21}\text{--}10^{-23}$ Вт/м <sup>2</sup> /√Гц	Поиск узкополосных и широкополосных AU-сигналов
2.6	Корреляционная интерферометрия	20–100 часов интеграции	AU-корреляционный интерферометр (2–4 элемента)	Пространственно-временные корреляции AU-поля	Чувствительность $10^{-23}\text{--}10^{-25}$ Вт/м <sup>2</sup>	Только для ближайших целей ( $\leq 5\text{--}10$ пк)
2.7	Квантовые чувствительные измерения	По возможности (10–50 часов)	Квантовые сенсоры (NV-центры, кубиты и др.)	Сверхчувствительные измерения магнитных / гравитационных / тепловых флуктуаций	$10^{-14}\text{--}10^{-16}$ эВ/√Гц или эквивалент	Экспериментальный режим, проверка новых технологий

## Последовательность и параллелизм режимов

Типичная стратегия наблюдения одной цели (пример для планеты с периодом  $\sim 10\text{--}40$  суток):

### 1. Первые 1–3 орбиты

- Основной акцент: 2.1 (транзит) + 2.2 (эмиссия) + 2.3 (начало фазовой кривой)
- Параллельно: включён AU-низкочастотный мониторинг (2.5)

### 2. Следующие 1–3 орбиты

- Основной акцент: завершение фазовой кривой (2.3) + длительный фотометрический мониторинг (2.4)
  - Параллельно: АУ-спектроскопия (2.5) + начало корреляционной интерферометрии (2.6), если цель ближе 10 пк
- 3. Заключительный этап (при наличии ресурсов)**
- Дополнительные 20–50 часов квантово-чувствительных измерений (2.7)
  - Повторные транзиты / эмиссия для повышения SNR

### **Ключевые параметры качества данных (целевые значения)**

- **Биосигнатуры**
  - Детектирование  $O_2$  на уровне 10–20% (Земля-подобный случай) →  $SNR \geq 15-25$  в полосе 0.76 мкм
  - Детектирование  $CH_4$  на уровне 1–5 ppm →  $SNR \geq 10-20$  в 3.3 мкм
  - Обнаружение дисбаланса ( $O_2 + CH_4$  одновременно) → приоритетный признак
- **Спектральная АУ-энтропия**
  - Цель:  $H \geq 10-12$  бит (Земля-подобный уровень)
  - Требуемая точность оценки  $H$ :  $\pm 0.5-1.0$  бит
- **Временная энтропия**
  - Цель:  $S \geq 4-6$  бит/час (биологическая активность)
  - Требуемая точность:  $\pm 0.5-1$  бит/час
- **Фазовая энтропия**
  - Цель:  $H_{phase} \geq 4.5-6$  бит (неоднородная поверхность с континентами / биомассой)
  - Требуемая точность:  $\pm 0.3-0.7$  бит
- **Прямой АУ-поток (очень амбициозно)**
  - Цель: обнаружение потока  $\geq 10^{-22}-10^{-24}$  Вт/м<sup>2</sup> в ключевых частотных полосах

### **Критерии перехода к фазе 3 (интеграция и классификация)**

Фаза 2 считается завершённой успешно, если выполнено хотя бы одно из условий:

- Получен хотя бы один транзит + одна полная фазовая кривая с высоким качеством
- Достигнуто  $SNR \geq 10-15$  в ключевых биосигнатурных полосах
- Проведено  $\geq 20-30$  суток непрерывного АУ-мониторинга
- Есть хотя бы предварительная оценка спектральной и/или временной энтропии

Если хотя бы по одному из каналов (био или АУ) получен сильный положительный сигнал — цель переводится в категорию «высокий приоритет» для повторных наблюдений или дополнительных ресурсов.