

БИОГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТРИНИТРОТОЛУОЛА В ВОЗДУХЕ

© 2023 г. В. Н. Кирой^a, П. О. Косенко^a, И. Е. Шепелев^a, И. В. Щербань^a, А. Б. Смоликов^a,
Ф. В. Арсеньев^b, А. В. Заборовский^c, В. А. Аксёнов^d, М. И. Тивилёва^d,
В. М. Грузнов^{e,f,*}, И. И. Засыпкина^e

^aЮжный федеральный университет
ул. Б. Садовая, 105/42, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

^bФонд перспективных исследований
Бережковская наб., 22, стр. 3, Москва, 121059 Россия

^cНаучно-производственное объединение “Специальная техника и связь”
Министерства внутренних дел
Российской Федерации
ул. Пруд Ключики, 2, Москва, 111024 Россия

^dСибирский филиал Научно-производственного объединения “Специальная техника и связь”
Министерства внутренних дел Российской Федерации
ул. Кутателадзе, 3, Новосибирск, 630055 Россия

^eИнститут нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук
просп. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

^fНовосибирский государственный технический университет
просп. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073 Россия

*e-mail: GruznovVM@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 03.04.2023 г.

Технология основана на регистрации фокальной активности (ФА) обонятельной луковицы (ОЛ) крыс при предъявлении крысам паров тринитротолуола (ТНТ) с концентрацией 4.7×10^{-15} г/см³ отдельно и в смеси с насыщенными парами комплексной помехи из специй. Регистрация ФА ОЛ крыс осуществлялась с помощью матрицы из 16 специальных электродов, имплантированных в дорсальную часть ОЛ крысы. Установка для регистрации ФА ОЛ крыс содержала бокс с крысой, источники паров (одорантов), многоканальную цифровую систему цифровой регистрации электрических сигналов с матрицы электродов, программное обеспечение, содержащее алгоритмы распознавания и классификации предъявляемых крысе одорантов. Источники паров ТНТ: статического объемного приготовления с концентрацией порядка 10^{-15} г/см³ и источник с концентрацией 4.7×10^{-15} г/см³ в потоке воздуха, предъявляемом крысам. Данные 25 испытаний показали 100%-ную вероятность обнаружения паров ТНТ указанных концентраций в чистом воздухе и также в присутствии сложной запаховой помехи в виде паров от смеси красного перца, кориандра, табака и др., которые, как правило, маскируют для животных запах ТНТ.

Ключевые слова: обонятельная луковица, фокальная активность, взрывчатые вещества, биосенсорная тест-система.

DOI: 10.31857/S0044450223080091, EDN: SHDSTZ

Проблема обнаружения паров опасных веществ в воздухе является актуальной как в контексте экологического мониторинга, так и решения задач в сфере охраны здоровья и безопасности людей [1, 2].

Портативные быстродействующие газоаналитические обнаружители паров взрывчатых веществ (ВВ) с временем реакции 1–3 с широко ис-

пользуются в практике антитеррористического контроля. Это приборы на основе спектрометрии приращения ионной подвижности (СПИП) “Пилот”, “МО-02” и на основе спектрометрии ионной подвижности “Кербер”, а также приборы “Fido XT” (США), “Заслон-М” (Россия) на основе гашения люминесценции. Порог обнаружения паров ТНТ у большинства серийных приборов

находится на уровне 10^{-13} г/см³. Исключением является отечественный прибор “Шельф-ПКЛ” с временем обнаружения 2–5 с на основе СПИП с ионизатором по методу лазерной десорбции микрочастиц ВВ с контролируемой поверхности с порогом обнаружения паров ТНТ 3×10^{-15} г/см³ [3], т.е. для увеличения чувствительности применяется лазерная десорбция.

В ряде публикаций отмечено значительное влияние высокой пороговой чувствительности на возможность быстрого обнаружения объектов с ТНТ. В частности, в работах [4, 5] экспериментально показано, что при пороге обнаружения концентрации паров ТНТ 10^{-16} г/см³ возможно значительное сокращение времени обнаружения объекта с 200 г ТНТ с момента его помещения в автоматическую камеру хранения – до 5 мин вместо нескольких суток при пороге 10^{-15} г/см³. Задержка обнаружения обусловлена медленным накоплением в ячейке камеры хранения обнаруживаемой концентрации паров.

Однако несмотря на наличие чувствительных аналитических приборов практические задачи обнаружения объектов с ВВ и наркотиками часто решаются с использованием специально обученных животных. Последнее связано с тем, что животные-макросматки обладают чрезвычайно высокой чувствительностью в режиме реального времени.

В настоящее время наряду с методиками обучения животных интенсивно исследуется активность структур обонятельного анализатора животных методом биогибридной технологии с анализом сигналов с микроэлектродов, имплантированных в дорсальную (заднюю) часть обонятельной луковицы (ОЛ) [6, 7]. Это наиболее перспективные направления исследования, которые позволяют обнаруживать активные нейроны и нейронные популяции, гломерулы ОЛ и исследовать их активность, непосредственно связанную с процессами анализа ольфакторной (обонятельной) информации [8]. Экспериментально показано, что устойчивые повторяющиеся сочетания данных активации гломерул (одорант-специфичные паттерны) ОЛ устойчиво воспроизводятся при повторных предъявлениях [9] одорантов и существенно различаются при предъявлении одорантов, различающихся физико-химическими свойствами [8]. Вследствие этого регистрация и анализ паттернов вызванной фокальной активности (ФА) ОЛ позволяет решать задачи, связанные с распознаванием и классификацией одорантов [10, 11].

Целью настоящей работы являлось определение возможности обнаружения следовых количеств паров ТНТ по сигналам фокальной активности, регистрируемым микроэлектродной матрицей с дорсальной поверхности ОЛ крысы, в условиях отсутствия и наличия паров запаховой

помехи в виде смеси, содержащей следующие ингредиенты: перец красный молотый, табак курительный и др., пары которых, как правило, маскируют у животных запах ТНТ.

Эксперименты выполняли в НИТЦ нейротехнологий ЮФУ, (Ростов-на-Дону) и в Сибирском филиале ФКУ НПО “СТиС” МВД России (Новосибирск).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные животные. Эксперименты выполняли на четырёх взрослых самцах серых доместичированных крыс, широко используемых в лабораториях (массой от 350 до 450 г), которые содержали в индивидуальных клетках с постоянной температурой (23 ± 1)°С, влажностью 45% и 12 : 12 часовым циклом свет : темнота. Крысам был предоставлен свободный доступ к пище (коммерческий состав) и воде (очищенной). Все эксперименты и процедуры по уходу за животными были одобрены комитетом по биоэтике Южного федерального университета (Россия).

Вольфрамовые остро заточенные микроэлектроды ($n = 16$) в стеклянной оболочке (диаметр меньше 30 мкм) имплантировались в дорсальную часть ОЛ на глубину, соответствующую представительству так называемых митральных клеток (около 500 мкм), с межэлектродным расстоянием 500 мкм. Верификацию расположения кончиков микроэлектродов проводили после завершения экспериментальных работ посредством гистологического исследования срезов ОЛ. Микроэлектродная матрица и разъем, с которым она была соединена, укреплялись на черепе светоотверждаемой пластмассой. После операции крысам отводилось время для восстановления в течение одной недели. В экспериментах использовали четыре крысы. Выбранные особи не различались по возрасту, не имели ранее заболеваний. Многократные повторения нагрузок крыс одорантом с учетом межстимульных интервалов проводили в течение не более 20 мин. Ниже приведены результаты обнаружения паров ТНТ для крысы с наиболее правильным расположением кончиков микроэлектродов.

Отметим, что крысы с такой подготовкой по имплантации электродов, по режиму ухода и содержания перед экспериментами ранее успешно использовались в исследованиях воздействия наркоза на ФА ОЛ крыс, а также при отслеживании информативных признаков в гамма-частотном диапазоне ФА ОЛ [11, 12]. Для контроля функционального состояния крыс эксперименты проводились с ксилазин-золетиловой анестезией крыс (внутримышечно 5 и 15 мг/кг соответственно). Применение наркоза позволяло сформировать контролируемое функциональное состояние

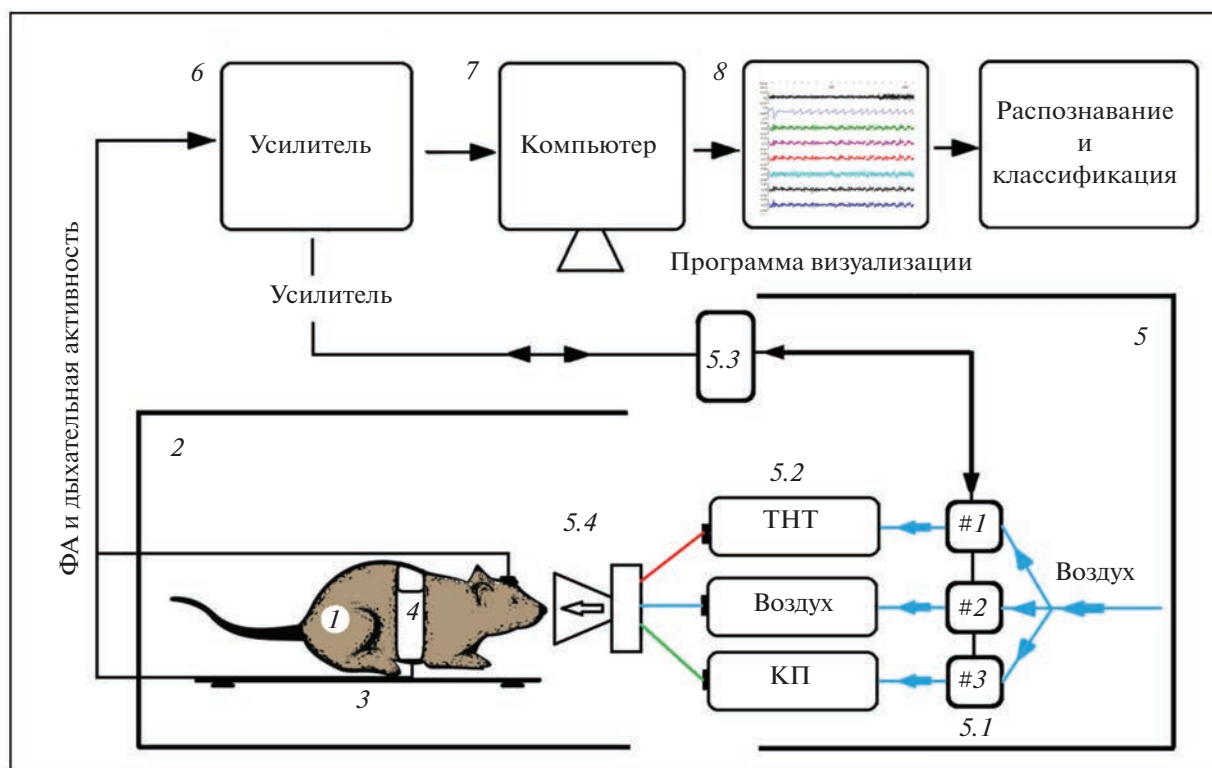


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для проведения электрофизиологических экспериментов с регистрацией фокальной активности обонятельной луковицы крыс при предъявлении одорантных стимулов. 1 – наркотизированная крыс с вживленной микроэлектродной матрицей; 2 – экспериментальная камера (бокс); 3 – система для автоматического поддержания температуры тела животного; 4 – система контроля дыхания; 5 – аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий управление режимом стимуляции животного газозо-воздушными смесями (одоризатор): 5.1 – клапаны, 5.2 – источники одорантов, 5.3 – плата управления клапанами #1, #2, #3 подачи одорантов, 5.4 – маска для подачи газозо-воздушной смеси; 6 – усилитель – 32-канальная цифровая система Plexon Multichannel Acquisition Processor (MAP) (Plexon Corp., Dallas, Texas, USA); 7 – компьютер; 8 – программа визуализации сигналов фокальной активности (программное обеспечение Plexon).

крыс в течение двух часов, что значительно больше длительности экспериментов, а также нивелировало воздействие таких факторов, как степень голода, стресса и т.д.

Регистрация фокальной активности обонятельной луковицы крыс. Блок-схема экспериментальной установки для регистрации ФА ОЛ крыс показана на рис. 1. Крыс помещали в прямоугольную камеру (2) размером $100 \times 50 \times 30 \text{ см}^3$ внутри клетки Фарадея. Регистрацию 16 сигналов ФА ОЛ крыс осуществляли с помощью 32-канальной цифровой системы Plexon Multichannel Acquisition Processor (MAP) data acquisition system (Plexon Corp., Dallas, Texas) [12]. Система MAP содержит усилитель сигналов (6) с преобразованием сигналов в цифровой код с частотой дискретизации 10 кГц по каждому из каналов, компьютер (7), программное обеспечение Plexon-Sort Client (8) для визуализации зарегистрированных сигналов, распознавания и идентификации целевых сигналов, соответствующих предъявленным одорантам.

Синхронизация регистрации ФА ОЛ с временем предъявления стимулов (одорантов) осуществлялась с помощью платы управления клапанами (5.3). Все данные поступали на жесткий диск компьютера. Одновременно осуществлялся контроль постоянства температуры и дыхания крысы электронными системами (3 и 4) соответственно. Фокальную активность регистрировали в ходе экспериментов непрерывно в течение 3 с.

Методики приготовления и предъявления газозо-воздушных смесей (ГВС). Газозо-воздушные смеси готовили для экспериментов, которые проводили в два этапа. Первый этап состоял в настройке параметров алгоритма обнаружения и демонстрации возможности обнаружения следовых концентраций пара ТНТ в воздухе. Эту работу выполняли на базе НИТЦ нейротехнологий ЮФУ (Ростов-на-Дону). Второй этап – обнаружение следовых концентраций пара ТНТ в воздухе в присутствии паров запаховой комплексной помехи выполняли на базе Сибирского филиала НПО

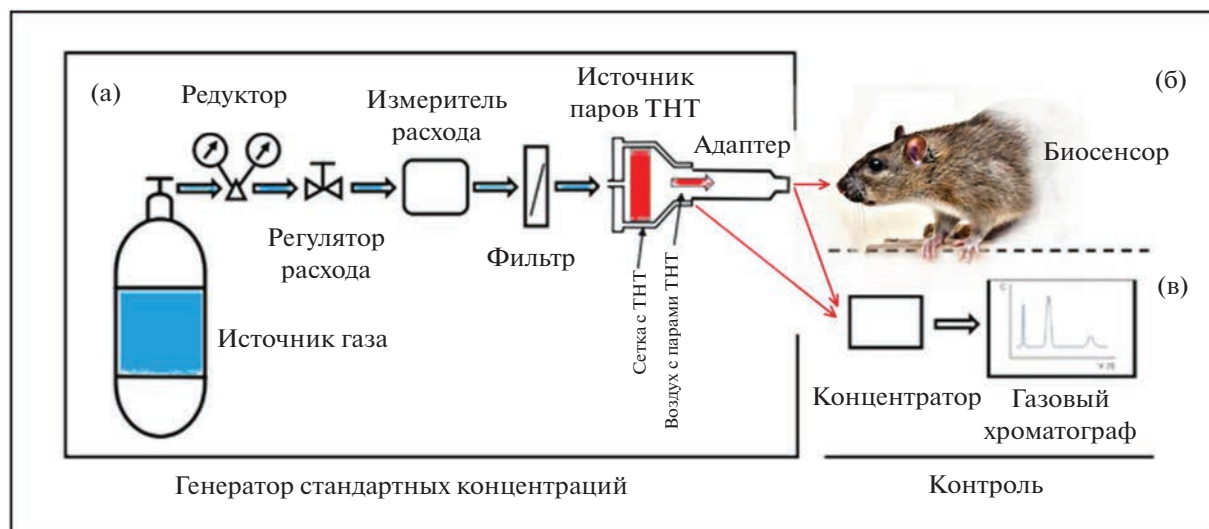


Рис. 2. Схема получения и контроля источника паров тринитротолуола в эксперименте. Генератор стандартных концентраций (а), биосенсор — крыса (б), контроль состава газовой смеси (в).

“Специальная техника и связь” МВД РФ (Новосибирск).

Для экспериментов I этапа готовили пары ТНТ в воздухе с концентрацией не более 10^{-15} г/см³ методом статического объемного приготовления градуировочных газовых смесей [13]. Использовали три стеклянных 15-литровых баллона, предварительно вымытых ацетоном и дистиллированной водой. В первом баллоне формировали концентрацию насыщенного пара ТНТ $\sim 10^{-11}$ г/см³. Для этого использовали раствор ТНТ в ацетоне с концентрацией 10^{-2} г/см³ (10 мг/мл) производства АО ГосНИИ “Кристалл”. 5 мл раствора распределяли по дну и стенкам первой 15-литровой емкости и в открытом виде помещали емкость под вытяжку на 24 ч для удаления паров растворителя. Далее баллон закрывали герметичной крышкой, в которую был герметично вмонтирован патрубок с вентилем, и выдерживали в течение 48 ч при температуре окружающего воздуха $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении (в пределах 740–760 мм. рт. ст.). Масса вещества в емкости с учетом его летучести превосходила необходимую для создания насыщенного пара. Далее последовательным двукратным разведением насыщенного пара в соответствии с методикой [13] получали в третьем баллоне концентрацию $\sim 10^{-15}$ г/см³. Перенос газозооных смесей ТНТ при каждом разведении осуществляли одноразовыми шприцами объемом 150 мл. Разведение паров осуществляли непосредственно перед проведением каждого эксперимента с животными. Концентрацию оценивали расчетным путем.

В третий баллон был встроен герметичный пакет с патрубком в крышке. Подачей воздуха в пакет со скоростью 2 л/мин обеспечивали подачу

паров ТНТ в приготовленной концентрации в маску крысы через систему подводных трубок и программно управляемых компьютером клапанов. Продолжительность предъявления каждой пробы составляла 5 с. Межстимульный интервал, во время которого в маску крысы подавался только воздух с той же интенсивностью, составлял 10 с.

Для второго этапа экспериментов с испытаниями биогибридной технологии в ИНХ СО РАН создан генератор стандартных концентраций (ГСК) паров ТНТ (рис. 2а) на основе источников паров (ИП) ТНТ с концентрациями 1.92×10^{-13} и 1.91×10^{-14} г/см³ [14]. Формирование паров ТНТ в созданном ГСК осуществляли пропусканием отфильтрованного осушенного воздуха (ООВ) через ИП ТНТ (рис. 2). Пары подавались в маску (рис. 1, позиция 5.4) околоносового пространства животного через адаптер (стеклянную трубку) со скоростью 1 л/мин.

На выходе ИП ТНТ и адаптера периодически отбирали пробы ГВС для контроля концентрации паров ТНТ портативным газовым хроматографом ЭХО-М [15] с порогом определения паров ТНТ в воздухе 10^{-14} г/см³ с предварительным концентрированием с коэффициентом 10^2 .

Хроматограммы проб ГВС с парами ТНТ на выходе ИП и адаптера при комнатной температуре 23°C представлены на рис. 3. По амплитуде хроматографических пиков (выделены) оценивали концентрацию паров. Удовлетворительное качество анализа, включая пробоотбор и хроматографирование, иллюстрируется уменьшением амплитуды пика примерно на порядок при смене ИП ТНТ с концентрацией 1.92×10^{-13} г/см³ на ИП с концентрацией 1.91×10^{-14} г/см³. Из сравне-

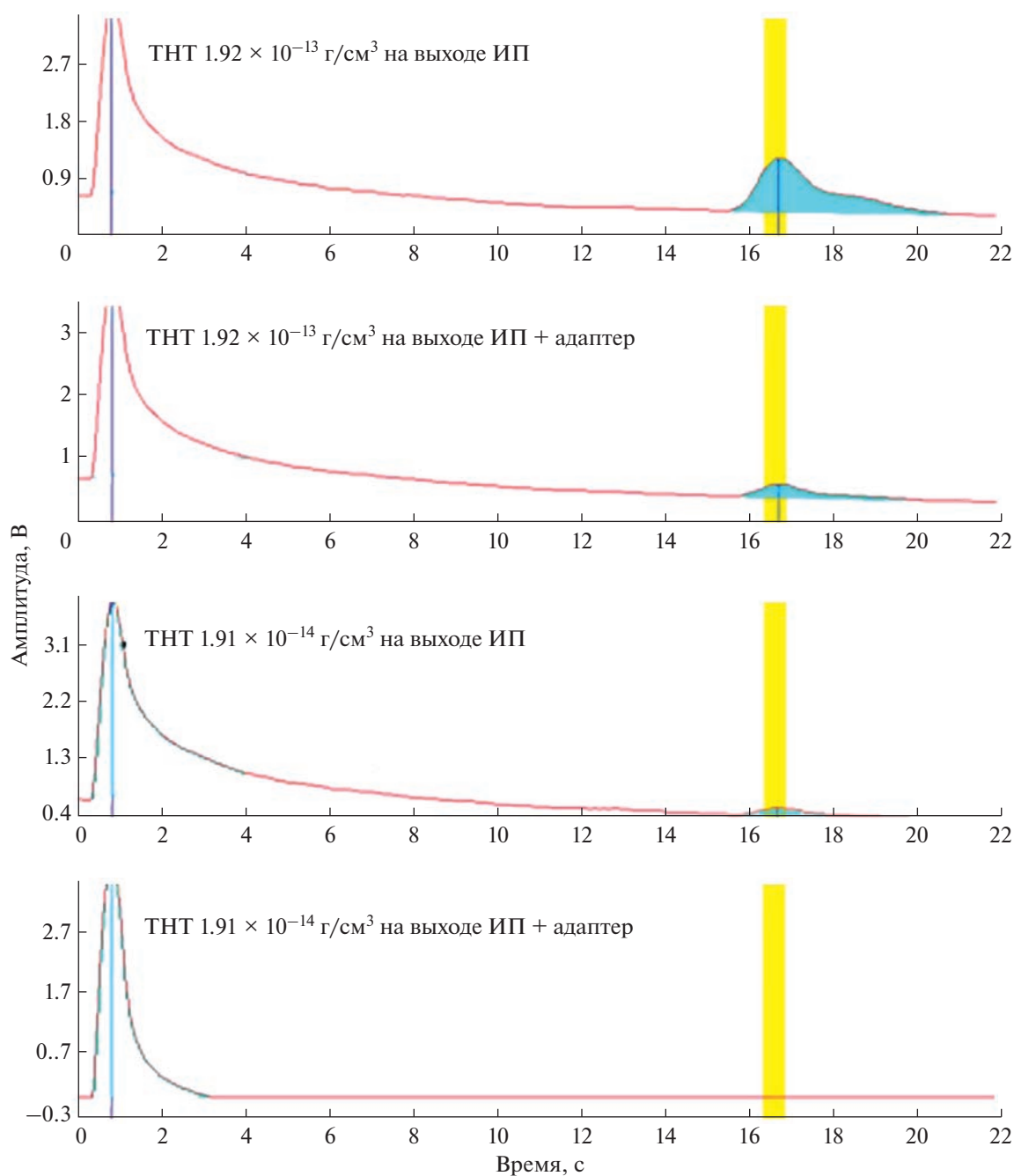


Рис. 3. Примеры хроматограмм проб тринитротолуола, полученных на выходе источника паров и адаптера при определении концентрации паров. Колонка поликапиллярная с 0.2 мкм фазы SE-30, температура колонки 170°C, поток газа-носителя (аргон) 55 мл/мин.

ния хроматограмм ИП с концентрацией ТНТ 1.92×10^{-13} г/см³ без адаптера и с адаптером следует, что наличие адаптера уменьшает концентрацию пара примерно в четыре раза. На этом основании оценена концентрация ТНТ на выходе адаптера при ИП 1.91×10^{-14} г/см³, которая составила 4.8×10^{-15} г/см³. В такой концентрации пары ТНТ предъявляли животному.

В качестве запаховой помехи использовали комплексную помеху (КП на рис. 1) в виде сложной смеси ингредиентов, содержащей приправу “универсальную” ТУ 10.84.12-015-52230123-217 (состав: соль, перец зеленый сладкий (кусочки), чеснок гранулированный, лук молотый, морковь (кусочки), куркума молотая, перец красный молотый, кориандр молотый, зелень петрушки сушеная, зелень укропа сушеная, зелень базилика

Таблица 1. Вероятность обнаружения на тестовых выборках

Номер эксперимента	Вероятность обнаружения
1	90.0
2	83.3
3	90.0
4	83.3
5	86.7
6	76.7
7	96.7
8	76.7
9	86.7
10	96.7
Среднее значение	86.7 ± 6.7

сушеная, перец душистый молотый, лавровый лист молотый, краситель E160a); табак курительный тонко резаный “Corsar of the queen zwage” и стиральный порошок “Dosia ActiveMax”, ГОСТ 32479-2013 (состав: кислородсодержащий отбеливатель менее 5%, анионные и неионогенные ПАВ, цеолит, поликарбоксилаты, энзимы, оптический отбеливатель, антивспениватель, ароматизатор).

Комплексную помеху помещали в склянку Дрекселя и считали, что в ней образуется насыщенный пар веществ всех ингредиентов КП при комнатной температуре 23°C.

Алгоритм обнаружения паров тринитротолуола по характеристикам сигналов фокальной активности обонятельной луковицы крыс. Записанная в экспериментах ФА ОЛ, как правило, очень зашумлена и нестационарна, в том числе под влиянием двигательных артефактов. На рис. 4 приведен характерный пример зарегистрированной ФА ОЛ при предъявлении животному очищенного воздуха без паров ТНТ.

Продолжительность записей около 7 с. Периодичность процесса вдох–выдох у крысы около 1 с. Предъявление паров ТНТ не сопровождается сколько-нибудь выраженными и визуально идентифицируемыми изменениями характера ФА ОЛ крысы.

Для обнаружения/классификации наличия ТНТ использовали метод анализа общих пространственно-спектральных характеристик (паттернов) ФА ОЛ (common spatio-spectral patterns, CSSP) [16], который успешно применяется при распознавании и классификации электроэнцефалограмм (ЭЭГ) человека, в частности при разработке биогибридных протезов.

В методе CSSP [16] регистрируются две цифровые матрицы X_1 и X_0 соответственно при предъ-

явлении ГВС с ТНТ и без ТНТ. Число строк равнялось числу микроэлектродов, число столбцов определялось временем регистрации сигналов 3 с и частотой дискретизации 250 Гц, что соответствовало 750 столбцам. Эти матрицы в методе CSSP используются для определения оптимальных характеристик цифровых фильтров для каждого канала регистрации ФА и весовых коэффициентов в методе логистической регрессии, которая в свою очередь используется в качестве алгоритма обнаружения/классификации [17].

Пример удовлетворительной настройки алгоритма обнаружения по критерию максимальной вероятности обнаружения паров в расчетной концентрации $\sim 10^{-15}$ г/см³ для тестовой серии из 10 экспериментов представлен в табл. 1. Концентрацию готовили упомянутым ранее методом статического объемного приготовления градуировочных газовых смесей.

Вероятность обнаружения достаточно высокая, в интервале (80–93.4)%. Настройки обнаружителя в этой тестовой серии экспериментов использовали в следующих экспериментах по обнаружению паров ТНТ в присутствии комплексной паровой помехи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При апробировании биогибридной технологии реализованы два этапа экспериментов. На первом этапе использовали три образца ГВС: пары ТНТ, КП и ООВ. На втором этапе пары ТНТ подавались через склянку Дрекселя, содержащую КП, и по отдельности пары КП и ООВ. Образцы ГВС подавали животным в случайной последовательности. Продолжительность предъявления каждой пробы – 5 с, пауза – 10 с. В общей сложности каждый образец ГВС предъявляли 25 раз. Результаты двух этапов апробации технологии при подаче животному ГВС, содержащих пары ТНТ в концентрации 4.7×10^{-15} г/см³, приведены в табл. 2. Из таблицы следует, что вероятность обнаружения паров ТНТ биогибридным детектором в концентрации 4.8×10^{-15} г/см³ в составе ГВС (в том числе в составе КП) составила 100%.

Полученные результаты (табл. 1, 2) показывают высокую среднюю вероятность обнаружения паров низколетучего ТНТ в интервале 86.7–100% в газозооных смесях в сверхнизких концентрациях до 10^{-15} г/см³. Эти результаты подтверждают высокую чувствительность к запахам фокальной активности обонятельной луковицы, регистрируемой от нейронов/гломерул [18–20].

Экспериментально показана возможность обнаружения паров ТНТ в ГВС в сверхнизких концентрациях с вероятностью, не уступающей вероятности обнаружения обученными животными [21].

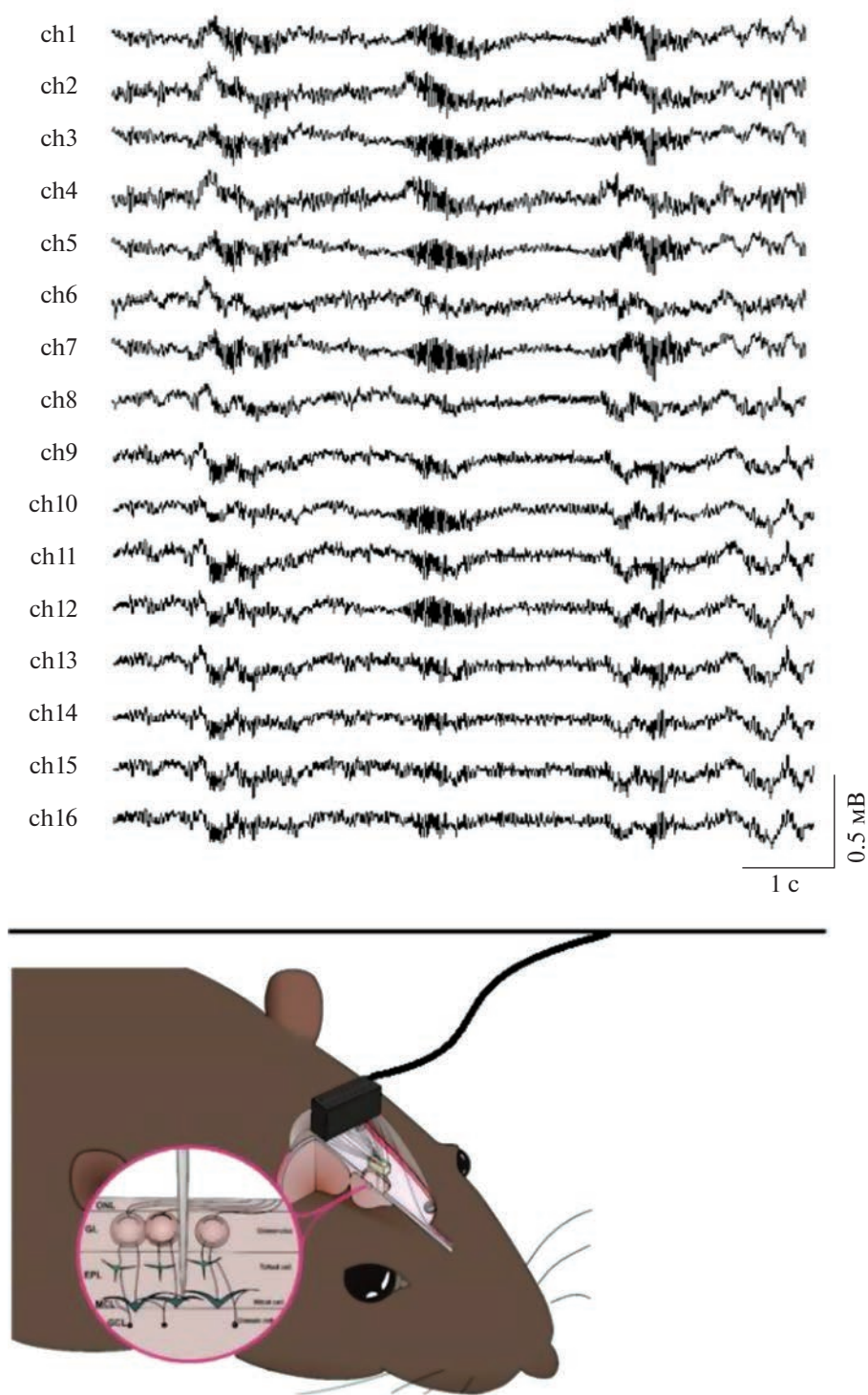


Рис. 4. Пример фокальной активности обонятельной луковицы крысы, зарегистрированной при предъявлении воздуха без паров тринитротолуола.

Впервые достигнута 100%-ная вероятность обнаружения низкой следовой концентрации паров ТНТ 4.8×10^{-15} г/см³ в составе паров многокомпонентной комплексной помехи в виде смеси красного перца, кориандра, табака и др., кото-

рые, как правило, маскируют для животных запах ТНТ. Этот результат позволяет утверждать, что разрабатываемая биогибридная технология в настоящее время не имеет аналогов по возможностям обнаружения паров ТНТ среди известных

Таблица 2. Результаты апробации биогибридного детектора обнаружения паров тринитротолуола

№ серии	Наименование газовой смеси	Количество предъявлений (каждому животному)	Вероятность, % (n/кол-во предъявлений ГВС)
№ 1	ТНТ (4.7×10^{-15} г/см ³)	25	100% (25/25)
	КП	25	0% (0/25)
	ООВ	25	0% (0/25)
№ 2	ТНТ (4.7×10^{-15} г/см ³) + КПС	25	100% (25/25)
	КП	25	0% (0/25)
	ООВ	25	0% (0/25)

аналитических методов в условиях присутствия паров-помех.

Учитывая используемую в экспериментах концентрацию паров ТНТ (4.8×10^{-15} г/см³) и объем ГВС до 8 мл, вдыхаемый крысой в течение 3 с [22], оценили для исследуемого биогибридного детектора предельную обнаруживаемую массу ТНТ в пробе, которая составила 0.04 пг, в том числе и на фоне насыщенных паров КП. Отметим, что метод газовой хроматографии со спектрометром приращения ионной подвижности в приборе ЭХО-СПИП [5] обеспечивает определение ТНТ массой 0.08 пг в пробе с временем отбора пробы до 10 с и временем анализа пробы не менее 20 с.

Таким образом, показано, что исследуемая биогибридная технология обеспечивает обнаружение паров ТНТ в сверхнизкой концентрации без предварительной пробоподготовки и в режиме времени, близком к реальному. Достигнута высокая вероятность обнаружения паров ТНТ (табл. 2) свидетельствует о том, что обнаруживаемая концентрация 4.8×10^{-15} г/см³ в присутствии помехи не является предельно низкой и целесообразно продолжить исследования способности крысы к обнаружению паров ТНТ при более широкой постановке задачи, включая получение зависимостей отклика крысы от ее состояния (возраст, голод, температура и др.), а также от наличия запаховых помех, связанных с условиями практического применения исследуемой биогибридной технологии.

Материалы статьи подготовлены при поддержке: Фонда перспективных исследований (Договор от 01.11.2017 г. № 6/112/2017-2020), Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета (“Приоритет 2030”), Программы фундаментальных научных исследований РФ. Проект FWZZ-2022-0027 “Новые технологии внелабораторного химического анализа и контроля, прецизионных измерений физических полей природных и техногенных объектов” (ИНГГ СО РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saravanan N.P., Venugopalan S., Senthilkumar N., Santhosh P., Kavita B., Gurumallesh Prabu H. Voltammetric determination of nitroaromatic and nitramine explosives contamination in soil // *Talanta*. 2006. V. 69. № 3. P. 656.
2. Salinas Y., Martínez-Máñez R., D Marcos M., Sancenón F., M Costero A., Parra M., Gil S. Optical chemosensors and reagents to detect explosives // *Chem. Soc. Rev.* 2012. V. 41. № 3. P. 1261.
3. Детектор паров взрывчатых веществ “Шельф-ПЖЛ” [Электронный ресурс]. <http://www.bn-ti.ru/des.asp?itm=5591&tbl=04.01.01> (дата обращения: сентябрь 2022 г.).
4. Грузнов В.М., Балдин М.Н., Аксёнов В.А. Роль высокой чувствительности газоаналитических обнаружителей и их современные характеристики // Научно-технический портал МВД России. 2019. № 4. С. 61.
5. Грузнов В.М., Балдин М.Н., Прямов М.В., Максимов Е.М. Определение концентрации паров взрывчатых веществ с дистанционным автоматизированным отбором проб при контроле объектов // *Журн. аналит. химии*. 2017. Т. 72. № 11. С. 1000.
6. Homma R., Nagayama S. A prism method for optical glomerular mapping of the medial olfactory bulb in mice // *Front Neural Circuits*. 2019. V. 13. P. 79.
7. Olofsson J.K., Freiherr J. Neuroimaging of smell and taste // *Handb Clin. Neurol.* 2019. V. 164. P. 263.
8. Murthy V.N. Olfactory maps in the brain // *Annu. Rev. Neurosci.* 2011. V. 34. P. 233.
9. Baker K.L., Vasan G., Gumaste A., Pieribone V.A., Verhagen J.V. Spatiotemporal dynamics of odor responses in the lateral and dorsal olfactory bulb // *PLoS Biology*. 2019. V. 17. № 9. Article e3000409.
10. Vizcay M.A., Duarte-Mermoud M.A., de la Luz Aylwin M. Odorant recognition using biological responses recorded in olfactory bulb of rats // *Comput. Biol. Med.* 2015. V. 56. P. 192.
11. Shepelev I.E., Kiroy V.N., Scherban I.V., Kosenko P.O., Smolnikov A.B., Saevskiy A.L. Tracking of informative gamma frequency range in local field potentials of anesthetized rat olfactory bulb for odor discrimination // *Biomed. Signal Process. Control*. 2022. V. 71. Article 103139.
12. Kosenko P.O., Smolnikov A.B., Voynov V.B., Shaposhnikov P.D., Saevskiy A.I., Kiroy V.N. Effect of xylazine-tiletamine-

- zolazepam on the local field potential of the rat olfactory bulb // *Comp. Med.* 2020. V. 70. № 6. P. 492.
13. ГОСТ Р ИСО 6144-2008. Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Статический объемный метод. Москва: Стандартинформ, 2009. 24 с.
 14. Надолинный В.А., Коломиец Ю.Н., Мардежова Г.А., Даниленко А.М., Пронин В.Г. Способ приготовления стандартных газовых смесей и устройство для его осуществления. Патент № 2410678 РФ. Заявка 2009137173/28 от 07.10.2009, опубл. 27.01.2011.
 15. Грузнов В.М., Филоненко В.Г., Балдин М.Н., Шишмарёв А.Т. Портативные экспрессные газоаналитические приборы для определения следовых количеств веществ // *Рос. хим. журн.* 2002. Т. 46. № 4. С. 100.
 16. Koles J.Z., Lazar M.S., Zhou Z. Spatial patterns underlying population differences in the background EEG // *Brain Topography.* 1990. V. 2. № 4. P. 275.
 17. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction.* New York: Springer, 2009. P. 745.
 18. Gao K., Zhuang L., Qin Z., Zhang B., Huang L., Wang P. In vivo bioelectronic nose using transgenic mice for specific odor detection // *Biosens. Bioelectron.* 2018. V. 102. P. 150.
 19. You K.J., Ham H.G., Lee H.J., Lang Y., Im Ch., Koh Ch. S., Kim M.-Y., Shin Hung-Cheul, Shin Hyun-Chool Odor discrimination using neural decoding of the main olfactory bulb in rats // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2010. V. 58. № 5. P. 1208.
 20. Zhuang L., Guo T., Zhang B. *In Vivo Bioelectronic Nose. Bioinspired Smell and Taste Sensors.* Dordrecht: Springer, 2015. P. 167.
 21. Walker D.B., Walker J.C., Cavnar P.J., Taylor J.L., Pickel D., Hall S., Suarez J. Naturalistic quantification of canine olfactory sensitivity // *Appl. Anim. Behav. Sci.* 2006. V. 97. № 2–4. P. 241.
 22. Patterson M.A., Lagier S., Carleton A. Odor representations in the olfactory bulb evolve after the first breath and persist as an odor afterimage // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2013. V. 110. № 35. P. E3340.