СОДЕРЖАНИЕ

_

_

Том 36, номер 2, 2022

Обзоры	
Компонент N2pc в исследованиях зрительного внимания А. С. Столетний, Д. С. Алексеева, В. В. Бабенко, П. В. Анохина, Д. В. Явна	109
Концептуальная модель онтологии сенсорной системы с событийным методом обработки информации <i>Е. О. Черских</i>	124
Зрительная система	
Регенерация органа зрения <i>Helix lucorum</i> в 185-суточном орбитальном полете на международной космической станции	
Г. И. Горгиладзе	136
Техническое зрение	
Мультипликативно замкнутые спектральные модели в задачах цветового анализа	
Д. П. Николаев, И. А. Коноваленко, П. П. Николаев	153
О мониторинговом подходе к томографической реконструкции	
М. В. Чукалина, А. С. Ингачева, К. Б. Булатов, К. О. Кутукова, Э. Чех, В. В. Арлазаров	183
Научные конференции	
Биоакустические исследования, представленные на XXXIV сессии Российского акустического общества Москва 14–18 февраля 2022 года	
Н. Г. Бибиков	194

Contents

Vol. 36, No. 2, 2022

Reviews	
Component N2pc in studying visual attention A. S. Stoletniy, D. S. Alekseeva, V. V. Babenko, P. V. Anokhina, D. V. Yavna	109
Conceptual model of sensor system ontology with event information processing method <i>E. O. Cherskikh</i>	124
Visual system	
Regeneration of the <i>Helix lucorum</i> visual body in a 185-day orbital flight et the international Space Station <i>G. I. Gorgiladze</i>	136
Technical vision	
Multiplicatively closed spectral models in color analysis D. P. Nikolaev, I. A. Konovalenko and P. P. Nikolaev	153
About monitored tomographic reconstruction M. V. Chukalina, A. S. Ingacheva, K. B. Bulatov, K. O. Kutukova, E. Zschech, V. V. Arlazarov	183
Meeting information	
Bioacoustic studies presented at XXXIV session of the Russian Acoustical Society (Moscow, Feb. 14–18, 2022)	
N. G. Bibikov	194

———— ОБЗОРЫ ———

УДК 612.821.2

КОМПОНЕНТ N2PC В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗРИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ

© 2022 г. А. С. Столетний^{1,*}, Д. С. Алексеева¹, В. В. Бабенко¹, П. В. Анохина¹, Д. В. Явна¹

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет" 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, Россия

> **E-mail: asstoletniy@sfedu.ru* Поступила в редакцию 05.07.2021 г. После доработки 21.01.2022 г. Принята к публикации 01.02.2022 г.

В статье представлен обзор литературы, касающейся природы и свойств негативного отклонения связанных с событием потенциалов N2pc. Как правило, этот латерализованный компонент возникает спустя 180–300 мс после начала предъявления зрительного стимула и вычисляется как разница между мозговыми ответами, регистрируемыми в контралатеральных парието-окципитальных отведениях обоих полушарий. На сегодняшний день N2pc служит надежным индикатором вовлечения когнитивных ресурсов мозга в процесс идентификации местоположения цели. Изначально предполагалось, что N2pc отражает процесс подавления влияния нерелевантных стимулов в ходе восприятия, но впоследствии возникли и иные точки зрения на его функциональную роль, поскольку появились данные о его связи с процессами, обеспечивающими не только фильтрацию дистракторов, но и собственно обработку целевого стимула. Кроме того, особенности возникновения данного компонента позволяют исследовать механизмы развертывания внимания как у людей, так и у животных. N2pc нашел свое применение и в изучении внимания у людей с различными психическими и физическими расстройствами.

Ключевые слова: внимание, N2pc, связанные с событием потенциалы (ССП), латерализованные ССП, релевантный стимул, параллельный поиск, последовательный поиск, фильтрация, цель, дистрактор, селективность внимания

DOI: 10.31857/S0235009222020068

ВВЕДЕНИЕ

Метод связанных с событием потенциалов (ССП) традиционно используется в экспериментах, посвященных изучению когнитивных процессов и их электрографических коррелятов. Амплитуда и латентность данных волн или компонентов ССП выступают в качестве индикаторов когнитивных процессов, протекающих с момента подачи стимула до реакции на него, если таковая предусмотрена.

С точки зрения анализа ССП группа волн, отражающая ментальные операции, связанные с вниманием, характеризуется негативностью отклонения от изолинии и пиковой латентностью от 200 до 350 мс. Совокупность таких волн получила название компонент N2. Данную группу негативных отклонений потенциала в свою очередь можно разделить на подгруппы, имеющие различное функциональное значение – это субкомпоненты N2a, N2b, N2c и N2pc (Luck, Kappenman, 2012). Каждый из этих компонентов является инструментом исследования внимания (Luck 2012; Luck, Kappenman, 2012; Раzo-Alvarez et al., 2003; Пономарев 2016). В настоящей статье предметом анализа является такой феномен, как N2pc. представляющий собой часть задней группы компонентов N2c. Первоначально предполагалось, что этот компонент отражает процесс фильтрации, который запускается для подавления входных сигналов от иррелевантных объектов (дистракторов), окружающих потенциальную цель (Luck, Hillyard, 1994). Однако позднее было показано, что он может выступать индикатором не только процесса фильтрации дистракторов как такового, но целого комплекса операций, одна часть которых отвечает за подавление дистракторов, другая — за обработку целевого стимула (Hickey et al., 2009). В некотором роде это небольшое изменение в трактовке функциональной роли компонента N2pc позволило переосмыслить данные прошлых лет: N2pc стал считаться не только коррелятом восходящих информационных, но и нисходящих управляющих процессов, а также их взаимодействия. Кроме того, были выявлены и другие латерализованные компоненты ССП, такие как Pd – позитивность, вызванная дистрактором (Hickey et al., 2009; Sawaki, Luck, 2010), Рtc – поздний позитивный компонент (Hilimire et al., 2009), пост-N2pc компонент (PNP) (Papaioannou, Luck, 2020), SPCN – устой-



Рис. 1. Пример типичного экспериментального дисплея в N2pc-парадигме, содержащего массив стимулов с выделяющейся (pop-out) целью — белым прямоугольником, расположенным среди черных прямоугольников дистракторов.

чивая задняя контралатеральная негативность (Robitaille, Jolicoeur, 2006).

ОБНАРУЖЕНИЕ КОМПОНЕНТА N2PC

Первой работой, в которой выявлен и проанализирован тогда еще не выделенный как отдельное явление компонент N2pc, была статья Лака и Хилларда (Luck, Hillvard, 1990), где авторы исследовали фокусировку внимания во время параллельного и последовательного зрительного поиска (visual search task) при помощи ССП. Когда участники эксперимента должны были обнаружить среди треугольников-дистракторов стрелкуцель, которая появлялась либо в правой, либо в левой части экрана, поиск был параллельным. В данном случае горизонтальная линия, образующая стержень стрелки, явно выделялась на экране, и испытуемые могли быстро и легко обнаружить цель. Когда цель была треугольником, а стрелки – дистракторами, поиск становился последовательным. В этом случае цель не содержала выразительной отличительной черты, значительно отличавшей ее от дистракторов, поэтому для нахождения цели испытуемым необходимо было выполнять медленный и тщательный поиск по массиву стимулов. В обеих задачах наблюдалось нарастание негативности потенциала в полушарии, контралатеральном относительно полуполя зрения, в котором находился целевой стимул. При параллельном поиске данная волна возникала в районе 200 мс и затухала уже к 300 мс с момента подачи целевого стимула, а при последовательном – появлялась примерно через 200 мс и имела длительность фактически до конца эпохи анализа (Luck, Kappenman, 2012).

В своей первой статье Лак и Хиллард дали название обнаруженному ими ранее компоненту – N2pc (Luck, Hillyard, 1994). Буква "N" обозначает отрицательную полярность, цифра "2" описывает его латентность в ряду компонентов ССП, а "pc" (сокращение от "posterior contralateral") указывает на пространственную локализацию, так как негативность формируется в теменно-затылочных и окципитальных отведениях и более выражена в контралатеральном полушарии.

ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ N2PC

Как уже было сказано выше, N2pc является одной из нескольких форм мозгового ответа на латерализованные зрительные целевые стимулы, т.е. находящиеся либо в левом, либо в правом полуполе зрения. Цель в свою очередь может задаваться цветом, ориентацией, размером, различной формой, буквой, словом, фигурами Канизса, выражением лица, направлением взора, движущимся объектом (Luck, 2012). Следует отметить, что целевые стимулы, расположенные в центре поля зрения, латерализованной активности в виде N2pc не вызывают (Hickey et al., 2009).

В типичной экспериментальной парадигме исследования внимания при помощи N2pc от испытуемых требуется искать на экране монитора целевой стимул среди отвлекающих, причем цель должна располагаться либо в левой, либо в правой части экрана (рис. 1), в то время как дистракторы могут находиться в том числе и на вертикальной средней линии дисплея (Hickey et al., 2009). Цель, как правило, должна существенно выделяться и быть легко заметной в массиве стимулов ("pop-out target") (Luck, 2006). При обнаружении цели испытуемых обычно просят сигнализировать об этом нажатием на соответствующую клавишу; регламентация таких действий зависит от конкретной задачи, поставленной в эксперименте – например, можно связать обнаружение цели с простым нажатием на кнопку, или для целей с левой стороны определить левую



Рис. 2. Усредненные ССП из исследования (Barras, Kerzel, 2016), демонстрирующие вызванные ответы на контралатеральные (черная сплошная линия) и ипсилатеральные (прерывистая серая линия) стимулы в эксперименте с парадигмой go/nogo, в отведениях Ро7 и Ро8, и представление этих же результатов в виде разностных волн (зеленая go, красная – nogo).

кнопку мыши, а для целей справа — правую, и т.д. В инструкции испытуемых просят реагировать на стимулы как можно быстрее. Массивы стимулов предъявляются блоками, причем время экспозиции одного массива может колебаться от 200 мс до 1.5 с в зависимости от задачи (Brisson, Jolicœur, 2007; Girelli, Luck, 1997; Luck, Hillyard, 1994; Reutter et al., 2017).

В центре экрана помещается точка фиксации, которая находится там постоянно в ходе предъявления стимулов, причем во многих экспериментах испытуемому давали указание фиксировать на ней свой взгляд как во время предъявления массива, так и при осуществлении зрительного поиска (Brisson et al., 2007). Как правило, в экспериментах с N2pc, помимо регистрации ЭЭГ, измеряется среднее время реакции участников на правильно распознанные целевые стимулы (Yuan et al., 2020).

Для обнаружения данного компонента сначала можно рассчитать контралатеральную волну (усреднение мозговых ответов на стимул из отведений правого полушария, когда он находится в левом полуполе зрения, и отведений левого полушария, когда стимул в правом полуполе) и ипсилатеральную волну (усреднение мозговых ответов на стимул из отведений правого полушария, когда стимул находится в правом полуполе зрения, и отведений левого полушария, когда стимул в левом полуполе). Получившееся в результате ССП анализируют двумя дополняющими друг друга путями – статистически и визуально сравнивают контралатеральный и ипсилатеральный ССП, и, вычитая второй из первого, получают разностный потенциал (Difference wave, Д-волна). На рис. 2 наглядно показаны два вида представления результатов для подобных расчетов: первый – когда

на одном графике приводятся контра- и ипсилатеральные волны для отдельного экспериментального условия (go, nogo); второй — отображение разностных потенциалов, полученных с помощью описанного выше алгоритма для двух или более условий эксперимента (contra-ipsi).

Первый тип представления позволяет оценить волновую форму и амплитуду компонентов ССП, в то время как второй хорошо подходит для анализа времени возникновения и завершения N2pc, а также его величины в случае, когда контра- и ипсилатеральные волны накладываются друг на друга. Построение разностных потенциалов также позволяет защитить N2pc от эффекта наложения других компонентов. При публикации результатов исследователи могут приводить ССП как из единичных симметричных отведений (рис. 2), так и усредняя волны по нескольким отведениям одного полушария (Brisson et al., 2007).

При записи ЭЭГ в экспериментах с латерализованной зрительной целью компонент N2pc может регистрироваться в отведениях задних отделов полушарий – P3, P4, Po3, Po4, P7, P8, Po7, Po8, среди которых наиболее информативными в плане амплитуды этого потенциала являются Po7 и Po8. Латентность возникновения негативной волны может колебаться от 180 до 300 мс, а продолжительность в некоторых случаях может превышать 200 мс (Luck, 2012). Амплитуда N2pc, как правило, не превышает 2 мкв.

Стоит отметить, что в работах некоторых авторов термин N2pc заменяется иным — Posterior Contralateral Negativity (PCN), очевидно, чтобы избежать ошибочных ассоциаций с N2 (Töllner et al., 2011).

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ КОМПОНЕНТА N2PC

Чаще всего парадигма N2pc используется для исследования фокусировки внимания в условиях зрительного поиска заданной цели в массиве из множества изображений объектов. При этом считается, что момент возникновения потенциала соответствует времени, когда мозг начинает вычислять местоположение цели (Luck, 2012). Например, если N2pc начинается на латентности 200 мс, можно сделать вывод, что внимание было перемешено на цель на двухсотой миллисекунде после ее появления на экране. Однако отсутствие искомого компонента рассматривается как свидетельство того, что сдвига внимания не произошло (Ansorge et al., 2011; Burra et al., 2016; Burra, Kerzel, 2013: Eimer, Kiss 2008: Hilimire, Corballis 2014; Ikeda et al., 2013; Kiss et al., 2008; Lien et al., 2011; X. Liu et al., 2017; Laura Lorenzo-López et al., 2008; Woodman, Luck, 1999). Таким образом, можно сказать, что N2pc является своеобразным индикатором динамики фокусировки внимания (Kiss et al., 2009; Laura Lorenzo-López et al., 2008). Безусловно, раннее смещение внимания к цели может быть модулировано работой не только вентрального зрительного пути, на поздних этапах которого, по всей видимости, и формируется N2pc, но и иных мозговых систем. Так, в работе (Cohen et al., 2009) на обезьянах было показано, что еше до возникновения N2pc некая селективная обработка производится в передних глазодвигательных областях (восьмое поле по Бродману). Таким образом, возможно, что компонент N2pc формируется не на самом раннем этапе фокусировки внимания на потенциальной цели в принципе, но отражает самый ранний момент, когда обработка местоположения цели начинается в вентральном зрительном пути.

На то, какие процессы лежат в основе феномена N2pc, в литературе существует несколько точек зрения. Наиболее общепринятой считается та, которая гласит, что N2pc вероятнее всего отражает сосредоточение внимания на потенциальной цели и фильтрацию окружающих элементов – дистракторов (Luck, Hillyard, 1994; Luck, 2012). Также существует гипотеза о приоритете процессов выбора и обработки цели над фильтрацией (Eimer 1996; Eimer, Kiss, 2008; Mazza et al., 2009a), и гипотеза, объединяющая в себе обе вышеозначенные точки зрения (Hickey et al., 2009). Рассмотрим каждую из них подробнее.

В 1994 г. Лак и Хиллард предположили, что волна N2pc отражает процесс фильтрации, подавляющей обработку окружающих цель дистракторов с целью уменьшения их влияния на идентификацию целевого объекта, сформулировав таким образом гипотезу подавления дистракторов (distractor-suppression hypothesis) (Luck, Hillvard, 1994b). В качестве доказательства своей точки зрения авторы провели серию экспериментов, в которых манипулировали характеристиками стимульного материала, что в свою очередь должно было влиять на упомянутый выше процесс. Полученные результаты позволили им сформулировать четыре основных аргумента в пользу того, что компонент N2pc непосредственно отражает процесс зрительной пространственной фильтрации. Во-первых, появление волны N2pc зависит от того, распознается ли объект как потенциальная цель, а не от того, является ли он целью на самом деле – например, в упомянутых выше экспериментах N2pc наблюдался как для целей (target), так и для нецелевых стимулов, очень похожих на цель (difficult non-target). Вовторых, волна N2pc сама по себе не отражает процесс идентификации как таковой - компонент проявляется только тогда, когда цель представлена на дисплее вместе с дистракторами. В-третьих, N2pc возникает, когда необходимо распознать цель среди таких дистракторов, которые конкурируют за внимание испытуемого – если дистракторы в массиве стимулов идентичны заданной цели, N2pc не регистрируется, т.е. его роль шире, чем просто углубленная обработка признаков объектов. В-четвертых, N2pc генерируется, когда нерелевантная информация от окружающих (отвлекающих объектов) может помешать идентификации цели. Также стоит добавить, что при росте количества дистракторов происходит увеличение амплитуды N2pc (Luck et al., 1997; Mazza et al., 2009b). На основе приведенных выше аргументов Стивен Лак предположил, что избирательность внимания работает в ключе уменьшения или устранения влияния неподходящих по инструкции стимулов, оставляя подходящие доступными для обработки. Таким образом, амплитуда N2pc отражает величину потребности в таком уменьшении (подавлении), что происходит, например, при увеличении количества дистракторов или их сходства с целью. Следовательно, чем больше вышеозначенная потребность, тем выше амплитуда N2pc. Очевидная связь между селективностью и компонентом N2pc привела к созданию теории. в которой подавление дистракторов играет ключевую роль в избирательности внимания - "теория разрешения неопределенности" ("ambiguity resolution theory") (Luck et al., 1997). Согласно этой теории, внимание подавляет неопределенность в привязке признаков к тому или иному стимулу путем подавления информации от стимулов, на которых не было сфокусировано внимание, а N2pc отражает работу данного подавляющего процесса.

Вторая гипотеза предполагает, что N2pc отражает процессы выбора цели (target-selection hypothesis), когда зрительное внимание усиливает обработку целевых или подобных целям стимулов

в поле зрения, т.е. в процесс селективного внимания вовлечены и другие механизмы помимо подавления дистракторов. В своей статье 1996 г. Эймер представил данные о том, что компонент N2pc проявляется не только в типичных задачах зрительного поиска, но также в ситуациях, когда цель представлена вместе с одним дистрактором, и они расположены в противоположных полуполях зрения. Таким образом, N2pc как коррелят работы механизма избирательности внимания генерируется не только в случае, когда необходимо обнаружить и идентифицировать цель среди множества смежных дистракторов, но и тогда, когда необходимость отфильтровывать нерелевантную или противоречивую информацию сводится к минимуму. Эймер пришел к выводу, что N2pc в первую очередь отражает операцию выбора цели, которая не зависит от количества и расположения дистракторов, а не процесс подавления нерелевантной информации (Eimer, 1996). Подобный вывод можно сделать и из работы (Shedden, Nordgaard, 2001), в которой N2pc наблюдался в отведениях контралатерального полушария для одиночного латерализованного стереоскопического стимула при отсутствии каких-либо дистракторов. В этом случае амплитуда N2pc будет отражать селективность внимания относительно релевантных задаче стимулов.

В своей работе Хики и соавт. приводят результаты экспериментов с ССП, целью которых было выяснить, отражает ли N2pc один или несколько механизмов внимания, и тем самым попытаться объединить представления об N2pc, имевшиеся на тот момент (Hickey et al., 2009). В ходе исследования зрительного поиска при помощи разных конфигураций стимульного материла авторам удалось выделить два независимых компонента ССП, которые они назвали Nt и Pd. Помимо того, что эти компоненты появлялись при предъявлении массивов с разным расположением стимулов, они отличались своей полярностью и корковой локализацией. Несмотря на то что оба компонента регистрируются в задних отделах коры, Pd возникает в более медиальных и дорсальных областях, в то время как Nt – в более латеральных и вентральных. Хики и соавт. связали этот факт с гипотезой о том, что Pd и Nt являются маркерами процессов обработки информации в дорсальном и вентральном путях зрительной обработки (Milner, Goodale, 2006). Pd, по-видимому, привязан к позиции дистрактора, а Nt, напротив, связан с местоположением цели. Вместе оба компонента отражают два различных процесса, участвующих в зрительном поиске: один, пространственный по своей природе, ответственен за обработку дистракторов, другой же связан с характеристиками объектов и принимает участие в обработке целевых стимулов. На основе этих фактов Хики и соавт. сделали вывод, что N2pc представляет собой не единую волну, а суперпозицию двух независимых компонентов ССП, указанных выше. Тем самым авторы показали, что селективность внимания работает не как отдельный процесс подавления дистракторов, а как совокупность по крайней мере двух процессов — обработки цели и подавления дистракторов, и N2pc является отражением такой совокупной работы.

Как видно из представленной выше информации, природа компонента N2pc в некоторой степени остается предметом дискуссии среди исследователей, хотя большинство авторов признают, что N2pc является надежным нейронным маркером выбора цели. В дополнение к этому стоит упомянуть некоторые работы, которые не вполне согласуются с изложенными выше теоретическими представлениями.

Значительный интерес представляет статья Теувеса, посвященная восходящим и нисходящим механизмам управления вниманием, в которой он подчеркивает, что выбор того или иного визуального объекта определяется исключительно восходящими (bottom-up) механизмами, которые не зависят от намерений наблюдателя. Этот автор предполагает, что выбор целей внимания определяется картами салиентности (salience maps), которые вычисляются на этапе параллельной зрительной обработки, и что данный процесс не может быть прерван или изменен какими-либо нисходящими (top-down) воздействиями. На основе указанных аргументов и ряда экспериментальных данных, автор оспаривает представление о N2pc как о маркере процессов отбора информации и отождествляет его с аттентивной обработкой зрительных признаков объекта, которая имеет место уже после отбора стимула (Theeuwes, 2010).

В исследовании (Zivony et al., 2018) ставится под сомнение предположение, что отсутствие N2pc является свидетельством отсутствия сдвига внимания. В сложном эксперименте использовался эффект мерцания внимания при демонстрации стимулов с временными интервалами в 300 и 800 мс. Было показано, что мерцание внимания не повлияло на сам факт сдвига внимания, но подавило связанный с ним N2pc. На этом основании Зивоны и соавт. предположили, что N2pc отражает не смещение внимания как таковое, а временное улучшение обработки (transient enhancement of processing), которое происходит в пространственном фокусе внимания и способствует дальнейшей, уже высокоуровневой обработке. Исследователи посчитали, что такой вывод требует переосмысления результатов, приведенных в литературе по захвату внимания, где N2pc использовался как индикатор селективности внимания.

Безусловно, говоря о компоненте N2pc, следует упомянуть и о теориях захвата внимания, в исследованиях которого широко применяется этот компонент. Частично они уже упоминались выше, когда речь шла о процессах, лежащих в основе N2pc. Традиционно выделяют две группы таких теорий (Gaspelin, Luck, 2019). Первая – это теории восходящего управления вниманием (bottom-up), которые предполагают, что салиентные стимулы привлекают внимание автоматически и независимо от наших знаний и задач. Вторая это теории нисходящего управления вниманием (top-down). Такие теории предполагают, что салиентные элементы не оказывают особого влияния на распределение внимания, если только они не соответствуют ожидаемым признакам цели поиска или предыдущему опыту. Спор между этими двумя теоретическими позициями продолжается уже несколько десятилетий, причем обе теории подтверждаются многочисленными исследованиями, что и привело в итоге к теоретическому тупику (Gaspelin, Luck, 2019). В недавних работах были представлены экспериментальные доказательства того, что восходящий захват внимания, вызванный салиентным стимулом, может подавляться при помощи нисходящих ингибирующих механизмов. Важно подчеркнуть, что такое подавление происходит до первоначального переключения внимания и является активным процессом с заранее заданными характеристиками признаков, которые следует игнорировать при выборе цели среди других объектов. Такие данные позволили в некоторый степени объединить описанные выше теории в новую - "гипотезу подавления" (signal suppression hypothesis), наладив эмпирическую связь между двумя описанными выше теоретическими подходами. В работах (Gaspelin, Luck, 2019; Luck et al., 2021) приведена подробная аргументация состоятельности "гипотезы подавления" на основе данных исследований из области психофизики, окулографии и электрофизиологии, в том числе N2pc и Pd.

С точки зрения функциональной роли N2pc нельзя не упомянуть ряд исследований, посвященных взаимодействию этого компонента и зрительной рабочей памяти. Очевидно, что память играет важную роль в распределении внимания, предоставляя зрительной системе ограниченный по времени доступ для сохранения недавобнаруженной информации. но При ЭТОМ объекты конкурируют в пределах зрительной сцены, чтобы в дальнейшем "получить доступ" к более высокому уровню обработки. В ходе этой конкуренции рабочая память может инициировать сдвиг внимания в пользу тех элементов, что ранее были сохранены в памяти (Hollingworth, Luck, 2009).

Так, в работе (Kumar et al., 2009) было выдвинуто предположение, что содержание рабочей памяти может определять лидера в борьбе за захват внимания, и результат этой конкуренции отражается в параметрах N2pc. По результатам своей работы Эстл и соавт. пришли к выводу, что информация, хранящаяся в памяти, оставляет след, который содержит первоначальное пространственное положение элементов в массиве стимулов, и что этот след сдвигает внимание автоматически всякий раз, когда находится соответствие между элементом в сохраненном массиве стимулов и объектом, который предъявляется испытуемому в данный момент (Astle et al., 2009). Также N2pc наблюдался в похожих экспериментах, где цель определялась различием между представленным массивом стимулов и массивом, ранее сохраненным в рабочей памяти (Eimer, Mazza, 2005; Hyun et al., 2009; Schankin, Wascher, 2008). B статье Крзан было показано, что активное поддержание образа объекта в памяти вызывает автоматическое смещение внимания к целевому стимулу, который совпадает с хранящимся образом, что в свою очередь вызывает N2pc (Krzan, 2015). Индивидуальные отличия в зрительной и пространственной рабочей памяти исследовались в статье Куперуса и соавт. Было показано, что больший объем пространственной рабочей памяти напрямую связан с большей точностью выполнения зрительного поиска и выражается в большей амплитуде N2pc (Couperus et al., 2021). Похожие данные приводятся и в работе (Heuer, Schubö, 2016).

Приведенные выше результаты исследований свидетельствуют о возможности применения компонента N2pc в изучении как зрительного пространственного внимания, так и зрительной рабочей памяти. Необходимо тщательно продумывать дизайн эксперимента в данной парадигме, учитывая, что в N2pc может отражаться работа нескольких механизмов обработки информации.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА АМПЛИТУДНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ N2PC

Как уже указывалось выше, компонент N2pc может иметь как относительно короткую, в 100– 300 мс, так и существенно большую продолжительность, вплоть до конца эпохи анализа ССП. По всей видимости, продолжительный N2pc является следствием применения последовательного зрительного поиска в ходе эксперимента, в котором цель не имела выраженного отличия от дистракторов, и испытуемым приходилось долго и тщательно вести поиск по всему массиву стимулов, чтобы найти цель. Однако в задачах, где цель заметно отличалась от нецелей, участники эксперимента быстро и без затруднений отыскивали цель. Длительность N2pc является индикатором того, какой тип зрительного поиска используется для выполнения задачи — параллельный (короткий N2pc) или последовательный (длинный N2pc) (Luck, Hillyard, 1990; Wolber, Wascher, 2003).

Стоит упомянуть влияние свойств самих стимулов на N2pc. Бриссон и соавт. провели серию экспериментов, в которых исследовали влияние длительности (Brisson, Jolicœur, 2007) и яркости (Brisson et al., 2007) стимулов на характеристики компонента N2pc. В первом случае испытуемым предлагалось отслеживать целевые стимулы заданного цвета (например, целью могли выступать красные цифры), которые в случайном порядке появлялись вместе с похожими на них дистракторами (зелеными цифрами, красными буквами) на правой и левой половинах экрана монитора. Длительность предъявления стимулов составляла 50, 200 и 350 мс для разных блоков стимулов. Анализ результатов опыта показал, что большая длительность стимула (350 мс) отразилась в снижении амплитуды N2pc по сравнению с более короткими предъявлениями. Значения амплитуды для стимулов длительностью 50 и 200 мс оставались одинаковыми. Кроме того, были представлены методические рекомендации для длительности стимулов в подобных опытах (Brisson, Jolicœur, 2007).

В другом исследовании (Brisson et al., 2007) авторы манипулировали яркостью зрительных стимулов. Целевые стимулы представляли собой появляющиеся в левой и правой части экрана монитора квадраты зеленого и красного цветов, построенные из линий малой, средней или большой ширины, при этом у каждого квадрата имелся разрыв на одной из сторон. Задачей испытуемых было определить, с какой из сторон целевого (красного или зеленого, в зависимости от заданной инструкции) стимула был разрыв, нажав соответствующую клавишу на клавиатуре. Анализ результатов показал, что несмотря на рост амплитуды Р1 в ответ на утолщение линий представленных стимулов, значимого изменения амплитуды N2pc не наблюдалось. Однако компонент N2pc в ответ на стимулы с большей толщиной линий появляется значительно раньше, чем на стимулы с малой и средней. Также они отметили, что небольшое изменение амплитуды компонента Р1 серьезно повлияло на латентность N2pc, демонстрируя низкую эффективность стимулов с тонкими линиями в задачах, связанных с избирательностью внимания. По всей видимости, именно интенсивность стимула в значительной мере определяет тот момент, когда внимание направляется к целевой зоне (Brisson et al., 2007).

Разумеется, на проявление N2pc в ходе зрительного поиска влияет салиентность цели. Так, например, в статье, где исследовалось зрительное внимание при шизофрении, было показано, что и у экспериментальной, и у контрольной групп N2pc формировался примерно на 50 мс ранее на красный целевой стимул, чем на зеленый (Luck et al., 2006). В работе Толлнера и соавт. изучалось влияние салиентности на скорость преаттентивной обработки при восприятии стимулов низкой, средней и высокой салиентности. В опытах использовались две характеристики стимульных объектов, по которым варьировалась салиентность — цвет и ориентация в пространстве. Результаты экспериментов показали, чем выше салиентность (как по цвету, так и по ориентации), тем раньше возникает компонент и тем больше амплитуда самого пика (Töllner et al., 2011).

Есть сведения и о влиянии на N2pc цветового несоответствия стимулов (Zhao et al., 2011). В ходе опыта исследователи управляли цветовой интенсивностью цели, которая задавалась разными оттенками синего цвета, а также степенью сложности различения – низкой и высокой, которая задавалась разной геометрической формой цели. Дистракторы же имели белый цвет и постоянную форму. Результаты показали, что повышение амплитуды N2pc имело место при увеличении цветовой разницы между целью и дистракторами. При этом не было выявлено никаких достоверных отличий в характеристиках компонента N2pc, которые были бы связаны со степенью сложности различения, основанной на изменении формы цели. Таким образом, амплитуда N2pc может модулироваться физическим несоответствием, в данном случае цветовым, между целью и дистракторами непосредственно в ходе зрительного поиска (Zhao et al., 2011).

Имеются данные о влиянии эксцентриситета стимулов на компонент N2pc. Шаффер и соавт. в своем исследовании манипулировали эксцентриситетом отдельного участка изображения, текстура которого отличалась от фона, в пределах от 2 до 7°, и сообщили, что амплитуда N2pc немного уменьшалась с увеличением эксцентриситета. Однако целевой участок физически значительно отличался от фона, поэтому трудно определить, что отражает наблюдаемый эффект – связанные с вниманием изменения в N2pc или же латерализованную сенсорную активность низкого уровня в том же временном окне (Schaffer et al., 2011).

Папойоанну и Лак в своей статье представили результаты исследования влияния эксцентриситета целевых стимулов на амплитуду компонента N2pc (Papaioannou, Luck, 2020). Ими был проведен эксперимент, в котором участники решали задачу различения стимулов, предъявляемых с одним из пяти значений эксцентриситета (0, 0.05, 1, 2, 4 и 8°). Было обнаружено, что амплитуда N2pc оставалась относительно постоянной при всех значениях, кроме 8°. При максимальном эксцентриситете в восемь угловых градусов амплитуда N2pc уменьшалась более чем на 50% по сравнению с другими значениями эксцентриситета. Папойоанну и Лак сделали методический вывод в пользу того, что в экспериментах с применением N2pc можно располагать стимулы близко к средней линии экрана без риска существенно повлиять на амплитуду компонента, и одновременно с этим следует избегать большой удаленности стимулов от средней оси (Papaioannou, Luck, 2020).

Из результатов приведенных выше исследований следует, что при подготовке стимульного материала, как собственно цели, так и дистракторов, следует учитывать нюансы, которые могут повлиять на амплитуду, латентность, длительность и сам момент формирования N2pc.

НЕЙРОНАЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ N2PC

Волна N2pc считается компонентом ССП, отражающим процессы аттентивной обработки, поэтому изучение ее генераторов может рассматриваться как важный шаг в исследованиях нейрофизиологических механизмов внимания.

Как уже указывалось выше, сдвигу внимания при зрительном поиске обычно соответствует инициация нейрональной активности в префронтальной и задней теменной коре, после чего она концентрируется в вентральном зрительном пути, на промежуточных и поздних участках которого и генерируется N2pc (Buschman, Miller, 2007). В работе Хопфа и соавт. регистрировались ССП и МЭГ в парадигме, почти полностью повторяющей эксперимент (Luck, Hillyard, 1994а). Применение МЭГ позволило разделить N2pc (или mN2pc – магнитоэнцефалографический эквивалент N2pc) на две части: ранний компонент отражает активность нейронов теменной доли, в то время как поздний – работу латеральной части задних отделов, что скорее всего соотносится с верхней затылочной и задней нижневисочной зрительными областями. Хопф и соавт. предположили, что теменной источник активности ответственен за инициацию пространственного сдвига внимания к местоположению цели, в то время как затылочно-височный генератор отражает механизм отбора релевантной информации уже после сдвига внимания. Данная работа была первой, в которой четко показано, что N2pc является отражением контура активности теменных и затылочно-височных отделов (Hopf et al., 2000). В своей следующей работе с использованием несколько иной методики, которая предполагала предсказуемое расположение цели, Хопф и соавт. получили схожие результаты – в заданиях с одним и двумя дистракторами нейрональные генераторы N2pc располагались в вентральных затылочно-височных отделах обоих полушарий (Hopf et al., 2002).

В статье (Hopf, 2006) была дана более точная оценка местоположения нейрональных генераторов N2pc. В проведенном опыте испытуемые занимались обнаружением больших и малых целевых стимулов на изображениях разного масштаба. Такая парадигма позволила выявить быстрые изменения в фокусе зрительного внимания, которые соответствуют пространственному масштабу предъявляемых изображений. Оказалось, что генератор компонента меняется в соответствии с масштабом изображения. Когда изображение имело большой масштаб и включало в себя множество объектов, N2pc генерировался в латеральном затылочном комплексе, в то время как при работе с изображением малого масштаба. тоже включающим в себя некоторое множество объектов, генератор перемещался в корковую зону V4.

Исследование (Lorenzo-López et al., 2011) было посвящено возрастным изменениям в зрительнопространственном внимании и электрофизиологическим коррелятам этого процесса. Активность мозга в их работе исследовалась при помощи МЭГ, где было обнаружено, что источник нейронной активности, лежащей в основе mN2pc, как у молодых, так и у пожилых испытуемых, располагается в затылочных областях — 17, 18, 19 полях по Бродману, — и нижних височных отделах в 20, 21, 36 и 37 полях. Приведенные выше результаты воспроизводились и в работе (Boehler et al., 2011).

Значительный интерес в контексте обсуждаемой проблематики представляют результаты ряда исследований нейрофизиологических механизмов зрительного поиска у животных, полученные как при помощи регистрации потенциалов с поверхности головы, так и с применением техники микроэлектродной регистрации активности нервных клеток. В работе (Young et al., 2011) была проверена гипотеза о схожести нейронных сетей обезьяны, отвечающих за N2pc, с таковыми у человека. Вычислив при помощи томографии низкого разрешения (LORETA) плотность распределения токов в коре в ходе выполнения эксперимента. Янг и соавт. определили. что источник активности N2pc лежит в экстрастриарной зрительной коре, что в целом соотносится с данными, полученными на людях.

В работе (Westerberg et al., 2021) изучался корковый нейронный ансамбль, по всей видимости, отвечающий за генерирование электрической активности, связанной с вниманием и регистрируемой в задних отделах мозга у человека и обезьян. Исследование проводилось на макаках, обученных выполнять зрительный поиск в экспериментальных условиях. Вначале при выполнении задания записывалась ЭЭГ, на втором этапе животные выполняли зрительный поиск уже с



Рис. 3. Локализация N2pc на примере иллюстрации из работы (Westerberg et al., 2021). Трехмерная локализация распределения плотности токов на поверхности правого полушария мозга макаки, согласующаяся по времени с N2pc в момент, когда цель поиска находилась в левом полуполе зрения. Максимальная плотность тока сосредоточена под электродом P6 каудальнее лунной борозды и в области V4 на угловой извилине.

имплантированными им в зону V4 микроэлектродами. Исходя из полученных результатов и данных о функциональной роли электрической активности (рис. 3), отождествляемой с вниманием, Вестерберг и соавт. предположили, что N2pc возникает в ходе процесса взаимодействия нескольких областей коры. Учитывая повсеместное распространение колончатой архитектуры в сенсорной коре и специфику репрезентации зрительных признаков в различных областях, электрические диполи, формирующиеся в этих областях, могут осуществлять различный вклад в итоговую активность в зависимости от того, какой признак в данный момент воспринимается. Более того, вклад других областей, помимо V4, весьма вероятен, поскольку предыдущие нейрофизиологические исследования на макаках показали участие в зрительном поиске височных (Sato, 1988), теменных (Bisley, Mirpour, 2019) и лобных отделов (Thompson et al., 2005; Zhou, Desimone, 2011). Наряду с этим следует отметить, что исследования у людей указывают на вклад в генерацию N2pc задней теменной коры (Hopf et al., 2000) и передних глазодвигательных областей, которые обнаруживают цель среди дистракторов даже раньше возникновения самого N2pc (Purcell et al., 2013). Учитывая такую взаимосвязь передних областей и V4 (Gregoriou et al., 2012; Ninomiya et al., 2012), Вестерберг и соавт. предположили, что лобная доля может быть функциональным источником активности, являющейся нейрональным коррелятом селективности внимания, которая затем передается в V4 и другие задние области (Gregoriou et al., 2012; Popov et al., 2017), и которые в свою очередь генерируют N2pc (Westerberg, Schall, 2021).

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что с точки зрения нейрофизиологии компонент N2pc — сложное явление, которое представляет собой результат взаимодействия нескольких отдельных нейрофизиологических процессов и работы множества областей коры.

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАДИГМЫ N2PC В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Регистрация N2pc широко используется в исследованиях прикладного характера, в которых данный компонент выступает маркером организации процессов, связанных с избирательным вниманием. Такие работы охватывают разные возрастные группы, а также людей, страдающих различными заболеваниями и психическими отклонениями. Ярким примером может служить статья Лоренцо-Лопес и соавт., в которой показано, что амплитуда N2pc у пожилых людей снижена, а время возникновения и пик волны компонента имеют несколько большую латентность, чем у более молодых. Тем самым авторы продемонстрировали влияние старения на механизмы распределения внимания, которые отражает N2pc (Lorenzo-López et al., 2008b). Время возникновения волны N2pc и латентность пика также увеличены у пациентов с печеночной энцефалопатией — нейродегенеративным заболеванием, являющимся следствием печеночной недостаточности. Лоренцо-Лопес и соавт. объясняют это нарушением функционального взаимодействия нисходящих и восходящих процессов обработки поступающей информации, ссылаясь на исследование (Schiff et al., 2006). Однако никаких изменений в амплитуде или латентном периоде N2pc не было выявлено в экспериментах с больными шизофренией (Luck et al., 2006), болезнью Паркинсона (Praamstra, Plat, 2001), у спортсменов, многократно получавших сотрясение мозга (Beaumont et al., 2007).

Применяется N2pc и в исследованиях, связанных с психологическими особенностями людей. Так, Крусэрмак и соавт. представили данные о том, что у испытуемых с высокой выраженностью психопатии (измеренной при помощи метода PCL-R) конгруэнтная фокусу внимания информация вызывает достоверно больший N2pc, чем у испытуемых с низкой и средней психопатизацией. Авторы связали этот эффект с усилением у таких людей нисходящих влияний на ранних стадиях зрительного внимания (Krusemark et al., 2016). В исследовании Ли и соавт. было показано, что у испытуемых с низкой самооценкой N2pc на стимулы-подсказки, нерелевантные по отношению к инструкции, имел большую амплитуду, чем у испытуемых с высокой самооценкой (Li et al., 2012). У людей с выраженной социальной тревожностью выше амплитуда и короче латентность N2pc при восприятии лиц с угрожающим или гневным выражением лица. Стоит отметить, что чем тяжелее такое тревожное состояние, тем больше растет амплитуда и уменьшается латентность компонента, таким образом делая из N2pc электрофизиологический маркер описанного состояния (Reutter et al., 2017b). В экспериментах со зрительным поиском целей, вызывающих страх (изображения пауков), у людей с арахнофобией наблюдался достоверно более выраженный N2pc по сравнению с контрольной группой, что интерпретировалось Веймаром и соавт. как нейрональный маркер усиления избирательного внимания к стимулам, связанным со страхом (Weymar et al., 2013). У людей с фобией вида крови N2pc возникал в ответ на демонстрацию изображений травм, причем он был больше, чем в ответ на изображения бескровных драк. Исследователи пришли к выводу, что такое смещение внимания связано с ранним зрительно-пространственным отбором релевантных фобии стимулов и отчетливо отражается в изменении амплитуды N2pc (Buodo et al., 2010).

В последние годы появилось множество работ с регистрацией компонента N2pc, целью которых является исследование механизмов, ответственных за распознание эмоционального выражения лица. Например, в статье (Yuan et al., 2020) статистически закономерные отличия были обнаружены в амплитуде N2pc при демонстрации статичного лица с выражением отвращения: у участников с повышенной социальной тревожностью амплитуда N2pc была выше по сравнению с контрольной группой. При осмотре анимированных лиц с тем же выражением отличий обнаружено не было. Юань и соавт. сделали вывод, что у испытуемых экспериментальной группы экзогенное внимание с большей вероятностью будет захвачено лицом с ярко выраженной, "пиковой" эмоцией из-за их преаттентивной настройки на постоянный поиск внешних стимулов-угроз (Yuan et al., 2020). В работе (Liu et al., 2021), посвященной гипотезе "превосходства гнева" ("anger superiority") предположению о том, что выражение гнева на лице лучше захватывает внимание на ранней стадии зрительного поиска, чем счастливое или нейтральное лицо, - был проведен метаанализ исследований, в которых применялась N2pc-парадигма. По итогам проведенной работы Лю и соавт. констатировали, что амплитуда N2pc достоверно больше на лица с выражением счастья или гнева по сравнению с нейтральными. При этом разница эффектов для счастливых и гневных лиц была статистически незначимой, в то время как для самого N2pc она модулировалась возрастом испытуемых, количеством предъявлений, реальным или схематичным изображением лиц. Такой результат привел к выводу о том, что результаты исследований с N2pc на здоровых людях не подтверждают описанную выше гипотезу о "превосходстве гнева". Необходимо упомянуть также использование парадигмы N2pc при исследовании аспектов захвата внимания угрожающими и счастливыми выражениями лица (Burra et al., 2016) и эмоционально окрашенными сценами (Kim et al., 2017).

Кроме перечисленного выше, в последние годы компонент N2pc использовался для изучения следующих аспектов внимания: контроля пространственного внимания (Lien et al., 2011); развертывания зрительного внимания в процессе временной интеграции информации (Akyürek, Meijerink, 2012); захвата внимания в ходе зрительного поиска заданной и случайной целей (Burra, Kerzel, 2013); управления вниманием на основе категорий (Nako et al., 2014); скорости последовательного смещения внимания при зрительном поиске (Grubert, Eimer, 2016); скрытого внимания (Xu et al., 2016); нейрональных механизмов селективности внимания (Bachman et al., 2020). Следует отметить использование N2pc при исследовании закономерностей группирования признаков в объекты и объектов в категории (Wu et al., 2016); обнаружения зрительных синглтонов (Tay et al., 2019); обнаружения лиц (Bola et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение представляется целесообразным остановиться на некоторых возможных областях применения N2pc. Перспективным видится использование этого компонента для изучения приоритета различных стимулов для зрительного внимания. Поскольку у компонента N2pc, помимо амплитуды, может модулироваться латентность пика и, следовательно, момента возникновения самой волны, такое изменение можно трактовать как нейрофизиологический маркер приоритета стимула – чем он важнее для системы, тем раньше мозг начнет вычислять его местоположение. Такой подход будет весьма актуален, например, при исследовании внимания к признакам (feature attention). Также стоит отметить возможность применения N2pc в исследованиях процессов категоризации: существующие работы

показали принципиальную возможность того, что N2pc может отражать использование мозгом категориальной информации наряду с визуальными различиями во время зрительного поиска (Moon et al., 2022).

Актуальными представляются также дальнейшие исследования нейрофизиологических основ N2pc как важной части мозговых систем внимания. Современные нейрофизиологические исследования, выполненные на мозге приматов с использованием техники микроэлектродной регистрации клеточной активности (Bichot et al., 2015, 2019; Westerberg et al., 2021), выявили ряд важных аспектов взаимодействия некоторых фронтальных структур (VPA, FEF) со зрительными областями, расположенными дорзальнее (V4 и другие). Сопоставление нейрофизиологических результатов с данными ЭЭГ-исследований человека может явиться ключом к пониманию механизмов генерации N2pc и процессов, которые он отражает.

Подводя итог, следует еще раз подчеркнуть, что компонент N2pc является надежным индикатором, а возможно, и ключевым электрофизиологическим маркером процесса выбора цели в зрительном поиске. Особенности его возникновения позволяют исследовать как отдельно взятые операции селекции, так и свойства нисходящих и восходящих процессов управления вниманием, некоторые аспекты зрительной рабочей памяти, а также целый спектр задач, связанных с эмоциональным распознаванием и реагированием на эмоционально-валентные стимулы, как было указано выше.

Таким образом, описанный в статье компонент ССП является эффективным инструментом исследования механизмов зрительного внимания.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-22001).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

Component N2pc in Studying Visual Attention

A. S. Stoletniy^{a,#}, D. S. Alekseeva^a, V. V. Babenko^a, P. V. Anokhina^a, and D. V. Yavna^a

^a Southern Federal University 344006 Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str, 105/42, Russia [#]E-mail: asstoletniy@sfedu.ru

This article provides an review of the studies regarding the nature and properties of negative deflection of event-related potentials (N2pc). This lateralized component usually appears at 180–300 ms after the onset of the visual stimulus and is calculated as the difference between the brain responses recorded in the contralateral parieto-occipital sites of both hemispheres. Nowadays, N2pc serves as a reliable indicator of the involvement of the brain's cognitive resources in the process of identifying the location of a target. Initially, it was assumed that N2pc reflects the process of suppression of irrelevant stimuli in the course of perception; but later other points of view on its functional role arose, since the scientists got data on its connection with not only filtering, but also with the actual processing of the target stimulus. In addition, the peculiarities of the emergence of this component make it possible to study the mechanisms of the deployment of attention in both humans and animals. N2pc is now used also in the studies of attention in people with various mental and physical disorders.

Key words: attention, N2pc, event-related potentials (ERP), lateralized ERP, relevant stimulus, parallel search, sequential search, filtering, target, distractor, attention selectivity

REFERENCES

Ponomarev V.A. Skrytye istochniki elektroentsefalogrammy i svyazannykh s sobytiyami potentsialov i ikh znachenie. *Diss, dokt. biol. nauk* [Latent sources of the electroencephalogram and event-related potentials and their significance. Dr. bio. Sci. diss.]. St. Petersburg. 2016. 676 p. (in Russian).

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

Akyürek E.G., Meijerink S.K. The deployment of visual attention during temporal integration: An electrophysiological investigation. *Psychophysiology*. 2012. V. 49 (7). P. 885–898.

https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01380.x

Ansorge U., Kiss M., Worschech F., Eimer M. The initial stage of visual selection is controlled by top-down task set: new ERP evidence. Attention, *Perception, & Psy-*

chophysics. 2011. V. 73 (1). P. 113-122. https://doi.org/10.3758/s13414-010-0008-3

- Astle D.E., Scerif G., Kuo B.-C., Nobre A.C. Spatial selection of features within perceived and remembered objects. Frontiers in Human Neuroscience. 2009. V. 3.P. 6. https://doi.org/10.3389/neuro.09.006.2009
- Bachman M.D., Wang L., Gamble M.L., Woldorff M.G. Physical salience and value-driven salience operate through different neural mechanisms to enhance attentional selection. Journal of Neuroscience. 2020 V. 40 (28). P. 5455-5464.

https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1198-19.2020

Barras C., Kerzel D. Nogo stimuli do not receive more attentional suppression or response inhibition than neutral stimuli: evidence from the N2pc, PD, and N2 components in a spatial cueing paradigm. Frontiers in Psvchology. 2016. V. 7. P. 630. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00630

- Beaumont L.D., Brisson B., Lassonde M., Jolicoeur P. Long-term electrophysiological changes in athletes with a history of multiple concussions. Brain Injury. 2007. V. 21 (6). P. 631-644. https://doi.org/10.1080/02699050701426931
- Bichot N.P., Heard M.T., DeGennaro E.M., Desimone R. A Source for feature-based attention in the prefrontal cortex. Neuron. 2015. V. 88 (4). P. 832-844. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.10.001
- Bichot N.P., Xu R., Ghadooshahy A., Williams M.L., Desimone R. The role of prefrontal cortex in the control of feature attention in area V4. Nature Communications. 2019. V. 10 (1). P. 5727.

https://doi.org/10.1038/s41467-019-13761-7

Bisley J.W., Mirpour K. The neural instantiation of a priority map. Current Opinion in Psychology. 2019 V. 29. P. 108-112.

https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.01.002

- Boehler C.N., Tsotsos J.K., Schoenfeld M.A., Heinze H.-J., Hopf J.-M. Neural mechanisms of surround attenuation and distractor competition in visual search. Journal of Neuroscience. 2011. V. 31 (14). P. 5213-5224. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6406-10.2011
- Bola M., Paź M., Doradzińska Ł., Nowicka A. The selfface captures attention without consciousness: Evidence from the N2pc ERP component analysis. Psychophysiology. 2021. V. 58 (4). P. 13759. https://doi.org/10.1111/psyp.13759
- Brisson B., Jolicœur P. The N2pc component and stimulus duration: NeuroReport. 2007. V. 18. (11). P. 1163-1166. https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3281e72d1b
- Brisson B., Robitaille N., Jolicoeur P. Stimulus intensity affects the latency but not the amplitude of the N2pc. Neuroreport. 2007. V. 18 (15). P. 1627-1630.
- Buodo G., Sarlo M., Munafò M. The neural correlates of attentional bias in blood phobia as revealed by the N2pc. Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2010. V. 5 (1). P. 29-38.

https://doi.org/10.1093/scan/nsp050

Burra N., Barras C., Coll S.Y., Kerzel D. Electrophysiological evidence for attentional capture by irrelevant angry facial expressions. Biological Psychology. 2016. V. 120. P. 69-80.

https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2016.08.008

- Burra N., Kerzel D. Attentional capture during visual search is attenuated by target predictability: Evidence from the N2pc, Pd, and topographic segmentation. Psychophysiology. 2013. V. 50 (5). P. 422-430. https://doi.org/10.1111/psyp.12019
- Buschman T.J., Miller E.K. Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. Science. 2007. V. 315 (5820). P. 1860-1862.

https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1138071

- Cohen J.Y., Heitz R.P., Schall J.D., Woodman G.F. On the origin of event-related potentials idexing covert attentional selection during visual search. Journal of Neurophysiology. 2009. V. 102 (4). P. 2375-2386. https://doi.org/10.1152/jn.00680.2009
- Couperus J.W., Lydic K.O., Hollis J.E., Roy J.L., Lowe A.R., Bukach C.M., Reed C.L. Individual differences in working memory and the N2pc. Frontiers in Human Neuroscience. 2021. V. 15. P. 109. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.620413
- Eimer M. The N2pc component as an indicator of attentional selectivity. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1996. V. 99 (3). P. 225-234. https://doi.org/10.1016/0013-4694(96)95711-9
- Eimer M., Kiss M. Involuntary attentional capture is determined by task set: evidence from event-related brain potentials. Journal of Cognitive Neuroscience. 2008. V. 20 (8). P. 1423–1433. https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20099
- Eimer M., Mazza V. Electrophysiological correlates of change detection. Psychophysiology. 2005. V. 42 (3). P. 328-342. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00285.x
- Gaspelin N., Luck S.J. Inhibition as a potential resolution to the attentional capture debate. Current opinion in psychology. 2019. V. 29. P. 12-18.

https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2018.10.013

- Girelli M., Luck S.J. Are the same attentional mechanisms used to detect visual search targets defined by color, orientation, and motion? Journal of Cognitive Neuroscience. 1997. V. 9 (2). P. 238-253. https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.2.238
- Gregoriou G.G., Gotts S.J., Desimone R. Cell-type-specific synchronization of neural activity in FEF with V4 during attention. Neuron. 2012. V. 73 (3). P. 581-594. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.12.019
- Grubert A., Eimer M. The Speed of serial attention shifts in visual search: evidence from the N2pc component. Journal of Cognitive Neuroscience. 2016. V. 28 (2). P. 319-332. https://doi.org/10.1162/jocn a 00898
- Heuer A., Schubö A. The focus of attention in visual working memory: protection of focused representations and its individual variation. PLOS ONE. 2016. V. 11. (4). P. e0154228.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154228

Hickey C., Di Lollo V., McDonald J.J. Electrophysiological indices of target and distractor processing in visual search. Journal of Cognitive Neuroscience, 2009. V. 21 (4). P. 760-775

https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21039

Hilimire M.R., Corballis P.M. Event-related potentials reveal the effect of prior knowledge on competition for

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ 2022 том 36 Nº 2

120

representation and attentional capture. *Psychophysiolo-gy*. 2014. V. 51 (1). P. 22–35. https://doi.org/10.1111/psyp.12154

Hilimire M.R., Mounts J.R.W., Parks N.A., Corballis P.M. Competitive interaction degrades target selection: An ERP study. *Psychophysiology*. 2009. V. 46 (5). P. 1080– 1089.

https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00846.x

- Hopf J.-M., Luck S.J., Boelmans K., Schoenfel, M.A., Boehler C.N., Rieger J., Heinze H.-J. The neural site of attention matches the spatial scale of perception. *Journal of Neuroscience* 2006. V. 26. (13). P. 3532–3540. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4510-05.2006
- Hopf J.-M., Luck S.J., Girelli M., Hagner T., Mangun G.R., Scheich H., Heinze H.-J. Neural sources of focused attention in visual search. *Cerebral Cortex*. 2000. V. 10 (12). P. 1233–1241.

https://doi.org/10.1093/cercor/10.12.1233

- Hopf J.-M., Boelmans K., Schoenfeld A.M., Heinze H.-J., Luck S.J. How does attention attenuate target—distractor interference in vision? Evidence from magnetoencephalographic recordings. *Cognitive Brain Research*. 2002. V. 15. (1). P. 17–29. https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00213-6
- Hyun J., Woodman G.F., Luck S.J. The role of attention in the binding of surface features to locations. *Visual Cognition*. 2009. V. 17 (1–2), P. 10–24. https://doi.org/10.1080/13506280802113894
- Ikeda K., Sugiura A., Hasegawa T. Fearful faces grab attention in the absence of late affective cortical responses. *Psychophysiology*. 2013. V. 50 (1). P. 60–69. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01478.x
- Kim M., Taylor M., Hoffman J. Emotional pictures automatically capture attention. *Journal of Vision*. 2017. V. 17 (10). P. 1292. https://doi.org/10.1167/17.10.1292
- Kiss M., Driver J., Eimer M. Reward priority of visual target singletons modulates event-related potential signatures of attentional selection. *Psychological Science*. 2009 V. 20 (2). P. 245–251. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02281.x
- Kiss M., Van Velzen J., Eimer M. The N2pc component and its links to attention shifts and spatially selective visual processing. *Psychophysiology*. 2008. V. 45 (2). P. 240–249.

https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00611.x

- Krusemark E.A., Kiehl K.A., Newman J.P. Endogenous attention modulates early selective attention in psychopathy: An ERP investigation. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience.* 2016. V. 16 (5). P. 779–788. https://doi.org/10.3758/s13415-016-0430-7
- Krzan F. Attentional guidance by the contents of working memory and the N2PC component. The Journal of *Neurobehavioral Sciences*. 2015. V. 2 (1). P. 21. https://doi.org/10.5455/JNBS.1429716677
- Kumar S., Soto D., Humphreys G.W. Electrophysiological evidence for attentional guidance by the contents of working memory. *European Journal of Neuroscience*. 2009. V. 30 (2). P. 307–317. https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06805.x
- Li H., Zeigler-Hill V., Yang J., Jia L., Xiao X., Luo J., Zhang Q. Low self-esteem and the neural basis of attentional bias for social rejection cues: Evidence from the

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

N2pc ERP component. *Personality and Individual Differences*. 2012. V. 53 (8). P. 947–951. https://doi.org/10.1016/j.paid.2012.03.004

- Lien M.-C., Croswaite K., Ruthruff E. Controlling spatial attention without central attentional resources: Evidence from event-related potentials. *Visual Cognition*. 2011. V. 19 (1). P. 37–78. https://doi.org/10.1080/13506285.2010.491643
- Liu X., Hildebrandt A., Recio G., Sommer W., Cai X., Wilhelm O. Individual differences in the speed of facial emotion recognition show little specificity but are strongly related with general mental speed: psychometric, neural and genetic Evidence. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. 2017. V. 11. P. 149. https://doi.org/10.3389/fnbeh.2017.00149
- Liu Y., Wang Y., Gozli D.G., Xiang Y.-T., Jackson T. Current status of the anger superiority hypothesis: A meta-analytic review of N2pc studies. *Psychophysiology*. 2021. V. 58 (1). P. e13700. https://doi.org/10.1111/psyp.13700
- Lorenzo-López L., Gutiérrez R., Moratti S., Maestú F., Cadaveira F., Amenedo E. Age-related occipito-temporal hypoactivation during visual search: Relationships between mN2pc sources and performance. *Neuropsychologia*. 2011. V. 49 (5). P. 858–865. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.01.015
- Lorenzo-López Laura, Amenedo E., Cadaveira F. Feature processing during visual search in normal aging: Electrophysiological evidence. *Neurobiology of Aging*. 2008 V. 29 (7). P. 1101–1110. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2007.02.007
- Luck S.J. The Operation of Attention-Millisecond by Millisecond-Over the First Half Second. In The first half second: The microgenesis and temporal dynamics of unconscious and conscious visual processes. Cambridge, MA, US: MIT Press. 2006. P. 187–206.
- Luck S.J., Girelli M., McDermott M.T., Ford M.A. Bridging the gap between monkey neurophysiology and human perception: an ambiguity resolution theory of visual selective attention. *Cognitive Psychology*. 1997 V. 33 (1). P. 64–87. https://doi.org/10.1006/cogp.1997.0660
- Luck S.J., Hillyard S.A. Electrophysiological evidence for parallel and serial processing during visual search. Perception & Psychophysics. 1990. V. 48 (6). P. 603–617. https://doi.org/10.3758/bf03211606
- Luck S.J., Hillyard S.A. Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*. 1994. V. 31 (3). P. 291–308.
- Luck S.J. Electrophysiological correlates of the focusing of attention within complex visual scenes: N2pc and related ERP components. The Oxford handbook of eventrelated potential components. New York, NY, US: Oxford University Press. 2012. P. 329–360.
- Luck S.J., Fuller R.L., Braun E.L., Robinson B., Summerfelt A., Gold J.M. The speed of visual attention in schizophrenia: Electrophysiological and behavioral evidence. *Schizophrenia Research*. 2006. V. 85. (1). P. 174–195.

https://doi.org/10.1016/j.schres.2006.03.040

Luck S.J., Gaspelin N., Folk C.L., Remington R.W., Theeuwes J. Progress toward resolving the attentional capture debate. *Visual Cognition*. 2021. V. 29 (1). P. 1–21. https://doi.org/10.1080/13506285.2020.1848949

- Luck S.J., Hillyard S.A. Spatial filtering during visual search: evidence from human electrophysiology. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1994. V. 20 (5). P. 1000–1014.
- Luck S.J., Kappenman E.S. ERP components and selective attention. The Oxford handbook of event-related potential components. New York, NY, US: Oxford University Press. 2012. P. 295–327.
- Mazza V., Turatto M., Caramazza A. Attention selection, distractor suppression and N2pc. *Cortex*. 2009a. V. 45 (7). P. 879–890. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.10.009
- Mazza V., Turatto M., Caramazza A. An electrophysiological assessment of distractor suppression in visual search tasks. *Psychophysiology*. 2009b. V. 46 (4). P. 771– 775.

https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00814.x

- Milner D., Goodale M. *The Visual Brain in Action*. Oxford. OUP Oxford. 2006. 458 p.
- Moon A., He C., Ditta A.S., Cheung O.S., Wu R. Rapid category selectivity for animals versus man-made objects: An N2pc study. *International Journal of Psychophysiology*. 2022. V. 171. P. 20–28. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.11.004
- Nako R., Wu R., Smith T.J., Eimer M. Item and categorybased attentional control during search for real-world objects: Can you find the pants among the pans? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2014. V. 40. (4). P. 1283–1288. https://doi.org/10.1037/a0036885
- Ninomiya T., Sawamura H., Inoue K., Takada M. Segregated pathways carrying frontally derived top-down signals to visual areas MT and V4 in macaques. *Journal of Neuroscience*. 2012. V. 32 (20). P. 6851–6858. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6295-11.2012
- Papaioannou O., Luck S.J. Effects of eccentricity on the attention-related N2pc component of the event-related potential waveform. *Psychophysiology*. 2020. V. 57 (5). P. e13532. https://doi.org/10.1111/psyp.13532
- Pazo-Alvarez P., Cadaveira F., Amenedo E. MMN in the visual modality: a review. *Biological* Psychology. 2003. V. 63 (3). P. 199–236. https://doi.org/10.1016/S0301-0511(03)00049-8
- Popov T., Kastner S., Jensen O. FEF-controlled alpha de-
- lay activity precedes stimulus-induced gamma-band activity in visual cortex. *Journal of Neuroscience*. 2017. V. 37 (15). P. 4117–4127. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3015-16.2017
- Praamstra P., Plat F.M. Failed suppression of direct visuomotor activation in parkinson's disease. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2001. V. 13 (1). P. 31–43. https://doi.org/10.1162/089892901564153
- Purcell B.A., Schall J.D., Woodman G.F. On the origin of event-related potentials indexing covert attentional selection during visual search: timing of selection by macaque frontal eye field and event-related potentials during pop-out search. *Journal of Neurophysiology*. 2013. V. 109 (2). P. 557–569. https://doi.org/10.1152/jn.00549.2012

- Reutter M., Hewig J., Wieser M.J., Osinsky R. The N2pc component reliably captures attentional bias in social anxiety. *Psychophysiology*. 2017. V. 54 (4). P. 519–527. https://doi.org/10.1111/psyp.12809
- Robitaille N., Jolicoeur P. Fundamental properties of the N2pc as an index of spatial attention: Effects of masking. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Re*vue canadienne de psychologie expérimentale. 2006. V. 60 (2). P. 101–111. https://doi.org/10.1037/ciep2006011
- Sato T. Effects of attention and stimulus interaction on visual responses of inferior temporal neurons in macaque. *Journal of Neurophysiology*. 1988. V. 60 (1). P. 344–364. https://doi.org/10.1152/jn.1988.60.1.344
- Sawaki R., Luck S.J. Capture versus suppression of attention by salient singletons: Electrophysiological evidence for an automatic attend-to-me signal. *Attention*, *Perception*, & *Psychophysics*. 2010. V. 72 (6). P. 1455– 1470. https://doi.org/10.3758/APP.72.6.1455
- Schaffer S., Schubö A., Meinecke C. Electrophysiological correlates of target eccentricity in texture segmentation. *International Journal of Psychophysiology*. 2011. V. 80 (3). P. 198–209. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.03.003
- Schankin A., Wascher E. Unvoluntary attentional capture in change blindness. *Psychophysiology*. 2008 V. 45 (5). P. 742–750.
 - https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00685.x
- Schiff S., Mapelli D., Vallesi A., Orsato R., Gatta A., Umiltà C., Amodio P. Top-down and bottom-up processes in the extrastriate cortex of cirrhotic patients: An ERP study. *Clinical Neurophysiology*. 2006. V. 117 (8). P. 1728–1736.

https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.04.020

- Shedden J.M., Nordgaard C.L. ERP time course of perceptual and post-perceptual mechanisms of spatial selection. *Cognitive Brain Research*. 2001. V. 11 (1). P. 59–75. https://doi.org/10.1016/S0926-6410(00)00064-1
- Tay D., Harms V., Hillyard S.A., McDonald J.J. Electrophysiological correlates of visual singleton detection. *Psychophysiology*. 2019. V. 56 (8). P. e13375. https://doi.org/10.1111/psyp.13375
- Theeuwes J. Top–down and bottom–up control of visual selection. *Acta Psychologica*. 2010. V. 135 (2). P. 77–99. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.02.006
- Thompson K.G., Biscoe K.L., Sato T.R. Neuronal basis of covert spatial attention in the frontal eye field. *Journal* of Neuroscience. 2005. V. 25 (41). P. 9479–9487. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0741-05.2005
- Töllner T., Zehetleitner M., Gramann K., Müller H.J. Stimulus saliency modulates pre-attentive processing speed in human visual cortex. *PLOS ONE*. 2011. V. 6 (1). P. e16276. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016276
- Westerberg J.A., Schall J.D. Neural mechanism of priming in visual search. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2021. V. 83 (2). P. 587–602. https://doi.org/10.3758/s13414-020-02118-8
- Westerberg J.A., Schall M.S., Maier A., Woodman G.F., Schall J.D. Laminar microcircuitry of visual cortex producing attention-associated electric fields. *Elife*.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

2022. V. 11. P. e72139. https://doi.org/10.7554/eLife.72139

- Weymar M., Gerdes A.B.M., Löw A., Alpers G.W., Hamm A.O. Specific fear modulates attentional selectivity during visual search: electrophysiological insights from the N2pc. *Psychophysiology*. 2013. 50 (2). P. 139– 148. https://doi.org/10.1111/psyp.12008
- Wolber M., Wascher E. Visual search strategies are indexed by event-related lateralizations of the EEG. *Biological Psychology*. 2003. 63 (1). P. 79–100. https://doi.org/10.1016/S0301-0511(03)00028-0
- Woodman G.F., Luck S.J. Electrophysiological measurement of rapid shifts of attention during visual search. *Nature*. 1999. V. 400 (6747). P. 867–869. https://doi.org/10.1038/23698
- Wu R., Pruitt Z., Runkle M., Scerif G., Aslin R.N. A neural signature of rapid category-based target selection as a function of intra-item perceptual similarity, despite inter-item dissimilarity. *Attention, Perception, & Psychophysics.* 2016. V. 78 (3). P. 749–760. https://doi.org/10.3758/s13414-015-1039-6
- Xu M., Wang Y., Nakanishi M., Wang Y.-T., Qi H., Jung T.-P., Ming D. Fast detection of covert visuospatial attention using hybrid N2pc and SSVEP features. *Journal of Neu-*

ral Engineering. 2016. V. 13 (6). P. 066003. https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/6/066003

- Young M.H., Heitz R., Purcell B., Schal J., Woodman G. Source localization of an event-related potential indexing covert shifts of attention in macaques. *Journal of Vision*. 2011. V. 11 (11). P. 194–194. https://doi.org/10.1167/11.11.194
- Yuan J., Zhang Q., Cui L. Social anxiety and attention to dynamic disgust facial expression: No more attention captured from evidence of N2pc. *Neuroscience Letters*. 2020. V. 736. P. 135269. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.135269
- Zhao G., Liu Q., Zhang Y., Jiao J., Zhang Q., Sun H., Li H. The amplitude of N2pc reflects the physical disparity between target item and distracters. *Neuroscience Letters*. 2011. V. 491 (1). P. 68–72. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.12.066
- Zhou H., Desimone R. Feature-based attention in the frontal eye field and area V4 during visual search. *Neuron*. 2011. V. 70 (6). P. 1205–1217. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.04.032
- Zivony A., Allon A.S., Luria R., Lamy D. Dissociating between the N2pc and attentional shifting: An attentional blink study. *Neuropsychologia*. 2018. V. 121. P. 153–163. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.11.003

———— ОБЗОРЫ ———

УДК 004.042

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОНТОЛОГИИ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ С СОБЫТИЙНЫМ МЕТОДОМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

© 2022 г. Е. О. Черских^{1,*}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 199178 Санкт-Петербург, 14 линия ВО, 39, Россия

> **E-mail: cherskikh.e@iias.spb.su* Поступила в редакцию 07.10.2021 г. После доработки 23.10.2021 г. Принята к публикации 09.11.2021 г.

Целью данной работы является анализ существующих способов событийной обработки информации как на уровне датчиков сенсорных систем, так и на уровне системы в целом. Для достижения указанной цели рассмотрены датчики с событийным принципом работы и выявлено, что наиболее используемыми являются камеры и динамические звуковые датчики. Для других видов датчиков, передающих данные непрерывно, рассмотрены методы обработки событий с использованием онтологий, работающие с гомогенными и гетерогенными сенсорными системами. Определены способы выделения событий из общего потока поступающих с датчиков данных и способы создания сложных событий. Наиболее популярным способом выделения события из потока поступающих с датчиков данных является сопоставление получаемых с датчиков данных с образцом. Для создания сложных событий в большинстве рассмотренных работ используются шаблоны и специализированные системы обработки сложных событий. Выделены недостатки рассмотренных методов, предложен способ их устранения путем разработки редактируемой онтологии сенсорной системы с возможностью учета последствий добавления или удаления сенсорных узлов.

Ключевые слова: сенсорные системы, события, событийные датчики, обработка информации **DOI:** 10.31857/S0235009222020020

введение

Зачастую в сенсорных системах, применяемых на робототехнических средствах (РС) для взаимодействия с окружающей средой, в системах технического зрения и в системах обработки аудиоинформации используются датчики, данные с которых поступают в центральное или распределенные управляющие устройства непрерывным потоком. Одной из основных проблем таких систем является большой объем получаемых данных. В результате на передачу и обработку данных требуются существенные временные, вычислительные и энергетические ресурсы. Данная проблема может быть решена использованием датчиков с событийным принципом работы или методов событийной обработки информации, поступающей с датчиков, поток данных которых передается непрерывно.

Цель данной работы — анализ существующих решений событийной обработки данных в сенсорных системах PC и создание собственной концептуальной модели онтологии для событийного извлечения данных узлов сенсорной системы. Далее будут рассмотрены датчики с событийным принципом работы; методы обработки потоков поступающей с датчиков информации и выявления формируемых непосредственно из данных простых событий.

Методы событийной обработки позволяют выделить значимые события из общего потока данных, а также сформировать сложные события из нескольких простых, что может быть полезно для систем, содержащих разные типы датчиков. Основой для данных методов служит онтология, представляющая собой концептуальную схему, состоящую из структуры данных. Онтология содержит классы, объекты и их свойства, а также связи объектов и ограничения. Событийные методы на основе онтологий, кроме выделения событий, способны предоставить возможность пользователю взаимодействовать с сенсорной системой путем поиска требуемого устройства по запросу, формирования события пользователем или оповещения пользователя о наличии событий.

СИСТЕМЫ С ДАТЧИКАМИ С СОБЫТИЙНЫМ ПРИНЦИПОМ РАБОТЫ

Датчики с событийным принципом работы применяются в системах технического зрения РС для слежения за статичными и динамическими объектами и их распознавания, для локализации РС и картографирования среды. Также такие датчики применяются в системах обработки аудиоинформации и для обнаружения опасных примесей в воздухе. В области технического зрения в качестве датчиков с событийным принципом работы используются видеокамеры. Обычные камеры фиксируют изменения через равные промежутки времени, опрашивая все пиксели и записывая показания интенсивности света, которые были получены за определенный промежуток. Камеры с событийным принципом работы реагируют на изменения яркости отдельных пикселей, работающих непрерывно. Важной информацией в случае применения таких камер являются движущиеся края отслеживаемых предметов. Знание особенностей такой информации может помочь сократить вычислительные ресурсы на ее обработку. Рассмотрим некоторые существующие решения в данной области.

Например, такой датчик, как динамический пиксельный датчик DAVIS (Dynamic and Active Pixel Vision Sensor) (Mueggler et al., 2017), включает в себя обычную камеру с глобальным затвором и датчик с событийным принципом работы. Выходные данные такого датчика состоят из потока асинхронных изменений яркости – событий и синхронных кадров камеры оттенков серого. События помечаются временными метками и передаются асинхронно в момент их возникновения. Каждое событие e – это кортеж (x, y, t, p), где x, y – пиксельные координаты события, t – временная метка события, а $p = \pm 1 - полярность события,$ которая является знаком изменения яркости. Датчик имеет разрешение 240 × 180 пикселей, не требует калибровки, может применяться как в помещении, так и на открытой местности, и использоваться в качестве системы технического зрения для мобильных РС.

Отслеживание движущегося объекта посредством датчика DAVIS (Liu et al., 2016) выполняется в три этапа: сначала генерируются исследуемые области, вероятностные целевые местоположения обнаруживаются при помощи сверточной нейронной сети и классифицируются как передний или задний планы, многочастичный фильтр определяет целевое местоположение отслеживаемого объекта в исследуемой области. В представленном эксперименте колесный робот, с установленным датчиком, следит за другим колесным роботом, управляемым вручную.

-Аналогичным по функциональности решени ем является система на основе событийной каме ры (Glover, Bartolozzi, 2017), используемая на антропоморфном роботе iCub для отслеживания движущихся объектов. Авторы предлагают использовать многочастичный фильтр с целью обеспечения устойчивости к временным колебаниям, возникающим при перемещении камеры и цели с различными скоростями, что может привести к потере визуальной информации.

В работе (Ghosh et al., 2014) реализовано не только отслеживание объектов, но и идентификация в реальном времени посредством камеры с событийным принципом работы и сверточной нейронной сети. Датчик реагирует только на движущиеся объекты, игнорируя статические. Предварительная обработка выполняется фильтром шумов, затем определяется пространственновременной интервал исследуемой области, потом содержащиеся в данной области отличающиеся всплески преобразовываются в статическое классифицируемое изображение. Система отслеживает и различает автомобили, велосипеды и пешеходов на дороге, а также способна обнаруживать и идентифицировать предметы домашнего обихода и их ориентации относительно камеры.

Для распознавания движущихся объектов авторами работы (Ceolini et al., 2020) также было предложено объединить несколько сенсоров, выполняющих функции считывания электромиографического сигнала и визуальной информации. Для преодоления вычислительных ограничений авторы предлагают использовать нейроморфные технологии, позволяющие обрабатывать данные в реальном времени: камеру на основе событий и две нейроморфные платформы, Loihi и ODIN + MorphIC. Электроды электромиографического датчика Муо, надетого непосредственно на предплечье человека, обнаруживают сигналы активности мышц предплечья, а затем полученные данные отправляются на внешнее электронное устройство. Данные представляют собой набор из пяти жестов рук, записанных при помощи двух сенсорных модальностей: мышечная активность от Муо и визуального ввода камеры. Для объединения данных с датчиков и распознавания жестов используется нейронная сеть. из-за ограниченного количества нейронов которой вход камеры был ограничен ло 40×40 .

Камера на основе событий также может быть использована для распознавания походки человека (Sokolova, Konushin, 2019). Предлагаемый алгоритм обработки данных, полученных с камеры, состоит из четырех шагов: визуализация потока событий; обнаружение фигуры человека; оценка оптического потока; оценка позы человека. Виртуализация сгенерированного потока событий выполняется с целью получения возможности обработки их по аналогии со стандартными видеокадрами. Для получения изображения на основе событий создается временное окно определенной длины и вычисляется сумма всех событий в каждом отдельном пикселе в заданном интервале времени. К полученным изображениям применяются различные методы обнаружения, оценивается влияние наличия различных частей тела на вероятность распознавания. Сообщается о применимости методов событийного распознавания и полученной точности свыше 98%.

Применение событийной камеры для реконструкции сцен в недетерминированной окружающей среде реализовано посредством метода трехмерной реконструкции (Kim et al., 2016) на основе получаемых данных с камеры, базирующегося на трех независимых вероятностных фильтрах, каждый из которых оценивает движение камеры, градиент интенсивности логарифмической сцены и обратную глубину сцены относительно ключевого кадра. По утверждению авторов, данный метод позволяет отслеживать движение одновременно с реконструкцией произвольной сцены на основе видеопотока без использования дополнительных сенсоров.

Выполнение событийной обработки аудиоинформации возможно посредством динамических звуковых датчиков (Dynamic Audio Sensor – DAS). Датчик представляет собой бинауральную систему кремниевых улиток, предназначенную для пространственного прослушивания и анализа слуховых сцен. DAS сообщают только о выходных сигналах активных узлов посредством асинхронных цифровых событий.

Авторами работы (Li et al., 2012) применяются нейроморфные кремниевые улитки с 64-частотными каналами и 512 выходными нейронами для идентификации говорящих людей в реальном времени. Из выходного сигнала улитки извлекаются слуховые признаки, представляющие собой затухающие гистограммы межсигнальных интервалов и распределения активности каналов. Затем векторы признаков классифицируются линейной машиной опорных векторов и далее происходит идентификация говорящего. Авторы представили два метода, в первом из которых признаки вычислялись для каждого временного промежутка 100 мс, только если события в данном интервале превышают предварительно установленный порог. Во втором методе вектор признаков вычислялся вне зависимости от длины временного промежутка, когда количество событий превысит установленное пороговое значение. Оба метода требуют нахождения компромисса между размером временного промежутка и задержкой принятия решения для оптимальной производительности системы в целом.

Аналогичный датчик применяется авторами работы (Anumula et al., 2018), разработавшими вероятностную модель локализации звука. Каждая

улитка имеет два отдельных 64-ступенчатых каскадных блока фильтров, управляемых двумя микрофонами, расположенными на небольшом расстоянии друг от друга. Частотная избирательность 64 каналов находится в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц. В каждом канале по четыре нейрона. Выходные данные с микрофонов поступают в каскадный блок фильтров, моделирующий базилярную мембрану, внутренние волосковые клетки и клетки спирального ганглия. Для локализации звукового события вычислялась временная разница между сигналами двух датчиков, которая оценивается путем вычисления разницы во времени между ближайшим событием одного датчика и ближайшим событием из того же частотного канала, но другого датчика.

Узлы сенсорной системы для обнаружения опасных примесей в воздухе (Somov et al., 2011) представляют собой платы с размещенными на них датчиками газа. Событийный принцип работы реализован программно посредством ШИМ. Каждый узел сети содержит полупроводниковый гомогенный датчик газа, микроконтроллер, модуль ZigBee и аккумуляторный блок питания (три батареи АА 1.5 В, 3000 мА ч). Ток, потребляемый vзлом, − 80 мА. Цикл измерения длится около 1 с без учета времени, затрачиваемого на передачу данных, если произошла аварийная ситуация. Чувствительный слой датчика нагревается до температуры около 500°С, когда требуется произвести измерение. Полученное значение сравнивается с двумя предустановленными пороговыми значениями, заданными для сенсорного узла. Если второй порог превышен, сигнал о событии передается по каналу данных.

Сенсорные системы, содержащие датчики с событийным принципом работы, применяются в системах технического зрения, для обработки аудиоинформации, обнаружения в воздухе опасных для человека примесей. Для слежения за объектами, распознавания объектов, картографирования среды и локализации РС в стационарных и динамических средах используются нейронные сети, многочастичные фильтры и фильтры шумов. В системах обработки аудиоинформации используются динамические звуковые датчики с использованием метода опорных векторов и вычисления временной разницы для локализации звуковых событий. Событийный принцип работы узлов сенсорной системы для обнаружения опасных примесей в воздухе реализуется посредством ШИМ.

Для решения задач распознавания и слежения за объектами с использованием данных, полученных непосредственно с событийных датчиков, применяются различные алгоритмы. Так, авторами работы (Belbachir et al., 2007) представлен алгоритм обработки данных в реальном времени, получаемых с событийной камеры. Обработка полученных данных включает в себя обнаружение объекта, удаление шума, нормализацию полученных данных и функцию распознавания объектов. Авторы экспериментально доказывают, что, используя включенные в функцию распознавания объектов подбор окружности и оценку ориентации, предложенный метод позволяет распознавать объекты правильной формы: куб, шар, шестиугольник. Сложность предложенного алгоритма пропорциональна количеству событий.

Для слежения за объектами также применяются алгоритмы (Mueggler et al., 2014; Ramesh et al., 2018). Оба алгоритма работают на основе данных, получаемых с датчика DAVIS. Алгоритм в работе (Mueggler et al., 2014) отслеживает сегменты, определяющие границы беспилотного летательного аппарата для слежения и оценки за его положением в воздухе на основе известных шаблонов, и определяет событие при обнаружении сходства с заранее заданным шаблоном. Описываемая в работе (Ramesh et al., 2018) система использует отличительное представление отслеживаемых объектов и онлайн-обучение, а также обнаруживает и повторно отслеживает объект, когда он возвращается в поле зрения камеры. В системе используется технология локального скользящего окна для обеспечения надежной работы в сценах со сложным фоном.

Авторами работы (Rebecq et al., 2017) представлен алгоритм визуальной одометрии, посредством которого осуществляется картографирование среды для вычисления положения и ориентации камер. Наблюдение и регистрация краев объектов выполняются с двух точек: с первой точки отслеживается эталонная позиция (трехмерная карта сцены, полученная путем объединения небольшого количества событий в карту границ), изображение со второй точки состоит из спроецированной полуплотной 3D-карты сцены в соответствии с известным положением динамического пиксельного датчика DAVIS (Dynamic and Active Pixel Vision Sensor). Представленный алгоритм позволяет вычислить положение и ориентацию камеры, а также получить полуплотную 3Dкарту окружающей среды, но края, параллельные движению событийной камеры, не фиксируются.

Для минимизации энергопотребления при большом количестве узлов системы, и, следовательно, увеличения времени работы системы авторы (Cao et al., 2005) предлагают протокол планирования режима работы узлов при детектировании событий в реальном времени. Система оптимизирована для обнаружения редких событий и позволяет достичь компромисса между задержкой обнаружения события и временем автономной работы. Реализована возможность определения неверных показаний датчиков, выявлять

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

корреляцию между полученными показаниями и рассчитывать характеристики произошедших событий. Система построена на основе принципов семантического описания, включая определение относительной важности промежуточных событий. Событие считается критическим в случае, если частота отказов высока. Данный параметр также используется для разграничения случаев возникновения событий и ложных срабатываний.

Камеры на основе событий позволяют уменьшить влияние проблемы обработки непрерывного потока данных, учитывая только изменения пикселей в последовательных событиях, которые можно наблюдать с высоким временным разрешением. Благодаря низкой задержке и высокому временному разрешению, датчики с событийным принципом работы являются перспективными для высокоскоростных мобильных РС. При большом количестве датчиков в сенсорном узле возникает необходимость нахождения компромисса между количеством пропушенных событий. временем реакции и энергопотреблением для нахождения оптимальной конфигурации сенсорной системы. В таких случаях обработка поступающей с событийных датчиков информации может быть выполнена посредством алгоритмов, входные данные которых уже представляют собой события. Использование датчиков с событийным принципом работы в робототехнических системах выгодно более низким энергопотреблением, высоким временным разрешением и снижением вычислительной нагрузки в сравнении с датчиками, передающими данные непрерывно. Применение данного принципа работы требует разработки архитектуры сенсорной системы и специализированных алгоритмов обработки и фильтрации данных, но обеспечивает возможность реагирования только на определенные события с высоким временным разрешением и энергоэффективного функционирования по сравнению с узлами сенсорных систем, передающими данные непрерывно. Кроме рассмотренных способов реализации событийного принципа работы непосредственно в узлах сенсорных систем, данный принцип может быть использован на этапе обработки поступающих с датчиков данных.

Далее рассмотрим существующие алгоритмы и методы обработки данных датчиков и сенсорных систем в целом с использованием онтологий.

СОБЫТИЙНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В данном разделе рассмотрены онтологические методы обработки непрерывно поступающих с различных типов датчиков данных. Такие методы используются для распознавания событий в непрерывных потоках данных. Онтологические методы применяются для разгрузки централь-

ного вычислительного устройства сенсорной системы или при использовании распределенного способа обработки данных системы в целом. События могут быть классифицированы и представлены отдельными частями для формирования других, более сложных событий. Так, для выявления в потоке данных, поступающих с узлов сенсорной сети, значимых событий авторы работы (Dunkel, 2009) предложили архитектуру сети, позволяющую анализировать и обрабатывать потоки событий в реальном времени. Сеть содержит несколько типов агентов, выполняющих функции анализа необработанных событий, диагностики и генерации событий состояния, планирования действий. Данный подход основан на использовании онтологий, позволяющих представить структурные свойства типов событий и ограничений между ними. События разделяются на события состояний и события действий. Каждое событие содержит идентификатор, метку времени, ID и данные датчика. Сопоставление с образцом и обработка событий выполняются узлами обработки событий, которые отслеживают потоки событий. Данные узлы фильтруют, разделяют и создают более сложные события из нескольких простых. Так как количество поступающих данных велико, каждое событие имеет срок действия, после которого оно удаляется из системы.

Как и в предыдущей рассмотренной работе, метод обработки поступающих событий на основе онтологии в сенсорной системе (Taylor, Leidinger, 2011) применяется для распознавания сложных событий, состоящих из нескольких простых, но определяемых пользователем. Каждое из сложных событий содержит наблюдение (здесь термин используется для описания пяти различных видов составных наблюдений). Атомарное наблюдение является описанием простого события в рамках определения сложного, оно содержит информацию для программирования выбранного датчика и определение триггера события. Для составления сложного события используются логические операции, группировка простых событий, метод обработки сложных событий (complex event processing, CEP), система управления потоками данных (data stream management system, DSMS). Когда пользователь запрашивает информацию об интересующем событии через интерфейс, промежуточное программное обеспечение обрабатывает запрос и генерирует команды для сервера СЕР. Сервер отслеживает выбранные потоки данных и генерирует предупреждения, которые доставляются указанным пользователям при возникновении события. Определенные события сохраняются в онтологии, данные которой используются для распознавания полученных событий в будущем. Описание каждого события состоит из двух основных частей: предупреждения, которое будет активировано, если событие было распознано, и определения самого события. В данной системе онтология используется для определения событий, включающих в себя несколько потоков данных датчиков, и ее фрагменты могут быть заменены иным командным языком, если потребуется адаптация к другому обработчику событий.

По подобному сценарию работает и сенсорная система, состоящая из набора беспроводных датчиков, исполнительных механизмов и вычислительного контроллера (Mazo, Tabuada, 2011). Однако в отличие от рассмотренных выше работ, всякий раз при возникновении определенного события система заканчивает цикл работы для уменьшения частоты обновлений контроллера. Предлагается установка условий, зависящих от получаемой информации на каждом из узлов системы. Когда какое-либо из этих условий нарушается в узле, он информирует вычислительное устройство. После получения такого события вычислительное устройство запрашивает новые измерения, обновляет управляющие сигналы и пересылает новые команды в узлы срабатывания.

Обработка непрерывного потока событий описана авторами (Bhargavi et al., 2010). В качестве инициализатора события используется один из пироэлектрических инфракрасных датчиков движения сенсорной системы. При обнаружении движения запускается камера для захвата изображения. Захваченные изображения отправляются на сервер по проводной сети. Входящие потоки данных обрабатываются СЕР в соответствии с предопределенными правилами. Для определения событий используется механизм обработки событий ESPER, который непрерывно посылает предопределенные запросы к потокам непрерывно поступающих событий. Как только событие обнаруживается узлом, он генерирует пакет, содержащий идентификатор датчика, RFID-метку, показания пироэлектрического инфракрасного датчика, время и другую полезную информацию. Поскольку количество узлов велико, а события случайны и множественны, обнаруженные данные имеют большой объем. После поступления ланных на сервер выполняется их очистка, затем обнаруживаются отношения между существующими событиями для построения более сложных событий. Архитектура предложенной сенсорной сети имеет несколько уровней: уровень источников данных, сбора данных и уровень фильтрации данных. Составление событий из входящих данных происходит путем сопоставления с имеющимся образцом. Сравнение выходящих данных с имеющимися или статистическими происходит в реальном времени.

Сопоставление данных для реализации событийного принципа работы системы используется и в работе (Kasi et al., 2021). Обработка событий

гетерогенной сенсорной сети реализована посредством онтологической базы знаний в каждом из узлов системы. Фрагменты онтологии в каждом сенсорном узле идентифицируют данные, маршрутизируемые через сенсорную сеть. В отличие от предыдущей работы, используемый алгоритм сопоставления способен работать с изменяющейся базой данной. Узел различает три типа входящих событий: обнаруженное, совместно используемое или перенаправленное событие. Авторы используют разделение на типы, поскольку с каждым типом событий выполняются разные операции. Действия, определяемые механизмом правил, могут быть следующими: сброс, отправка или переадресация события. Когда входящий факт не соответствует установленным правилам, событие сбрасывается, таким образом производится фильтрация событий. Когда факт полностью соответствует любому из имеющихся правил, событие перенаправляется на узел шлюза. Однако если обнаружено частичное совпадение, событие передается соответствующему сенсорному узлу для дальнейшей обработки.

Некоторые из методов основаны на существующих онтологиях, таких как SSN (Lefort et al., 2011), Event (Yves, Samer, 2007), FOAF (Brickley, Miller, 2014), Time Ontology (Hobbs, Pan, 2017) Geo Ontology (Brickley, 2003), MA-Ont (Thierry, 2012), использующихся для описания датчиков, событий, временных свойств и ресурсов, и для объединения различных описаний медиаресурсов.

Данные онтологии могут не обладать достаточным набором свойств для выполнения какойлибо задачи, но могут использоваться в качестве основы других онтологий. Авторы работы (Rinne et al., 2013) показывают систему обработки событий на основе онтологий SSN, DUL и Event-F. Для идентификации событий в потоке поступающих с датчиков данных используются шаблоны и временные метки, описываемые набором отдельных свойств. Обнаруженный системой обработки событий образец поступающих с датчиков данных запускает создание объекта события, который в свою очередь описывает реальное произошелшее событие. Основное событие имеет несколько составных объектов – подсобытий. Существует возможность SPARQL запроса событий по шаблонам наиболее распространенных запросов, состоящих из четырех событий для составления сложных событий. Предложенная структура не требует обязательных рассуждений OWL, но дает возможность рассуждения с использованием транзитивности и инверсности свойств.

Онтология также позволяет структурировать данные, получаемые от различных устройств системы. Авторами работы (Кузнецов, Бузунова, 2018) представлена онтология системы освещения, содержащая несколько классов и экземпляров, часть которых использована для описания подключенных к системе сенсорных устройств. В работе показана базовая онтология, требующая доработки на основе существующих онтологий, таких как OntoSensor (Shaukat et al., 2017) и SSN. Основной целью применения онтологии в данной системе является определение агентом системы участников обмена информацией.

Онтология, применяемая в музее (Хайдарова и др., 2019), включает в себя часть, содержащую данные с датчиков температуры, влажности и освещенности помещения. Некоторые сущности онтология заимствованы из FOAF. Представленная онтология позволяет решать консультативносправочные задачи, задачи мониторинга и регулирования параметров микроклимата. Событием является отклонение параметров микроклимата, эталоны которых помещены в онтологию, системой осуществляется отправка управляющих сигналов устройством контроля микроклимата или же сотрудникам учреждения. Обработка информации осуществляется в псевдореальном времени.

Расширение онтологий SSN и MA-Ont (Lee et al., 2012) и регистрация событий с датчиков мультимедийной сенсорной системы (Angsuchotmetee et al., 2020) выполняются посредством онтологии MSSN-Onto. Одной из задач авторов является обеспечение синтаксической и семантической совместимости для облегчения процесса обнаружения событий. Авторы показывают результаты моделирования, в котором сенсорная система имеет до 500 мультимедийных датчиков, централизованное управление и используется для слежения за участниками конференции, находящимися в одном помещении. Обработка и индексирование входящих потоков данных выполняются отдельным модулем, чтобы сопоставить их с MSSN-Onto. Каждый из потоков декодируется и индексируется в соответствии с низкоуровневыми функциями (визуальные, звуковые или дескрипторы движения), и таким образом индексируются различные типы данных (аудио, видео, изображения, скалярные значения) с использованием модели данных MSSN-Onto. Обнаружение событий и обработка пользовательских запросов выполняются модулем обработки событий. Всего предлагается десять сложных событий из сценария: начало встречи; презентация расписания дня; презентация доклада; использование smart-доски; смена слайдов; событие одновременного обсуждения несколькими участниками: момент времени прихода или ухода участника встречи; доклад итогов встречи; уход всех участников из комнаты. Система обладает существенным недостатком: отсутствие гибкости делает ее использование невозможным в помещении с другой инфраструктурой, поскольку невозможно добавить новые или удалить старые датчики без перенастройки всей системы. Возможность добавления гетерогенных датчиков без перенастройки системы существует и реализована в онтологии A3ME (Herzog et al., 2008). Данная онтология представляет собой базовую иерархию понятий, предназначенную для классификации, самоописания и обнаружения устройств, но обработка событий в A3ME отсутствует. Обнаружение событий MSSN-Onto имеет ограничение, выраженное в возможности распознавания новых событий, если соответствующие знания и пользовательские события предоставлены в одной структуре.

Расширение существующих онтологий SNN, Event, Time Ontology, FOAF и Geo Ontology выполняется и авторами (Belkaroui et al., 2018). Представленная онтология событий Wine Cloud, реализованная в Protégé 8, используется для извлечения событий из данных, генерируемых датчиками гетерогенной распределенной сенсорной системы, применяемой на виноградниках. Событие определяется кортежем из шести значений. каждое из которых означает: что действие, установленное в событии, происходит; период времени, в течение которого событие продолжалось; локацию события; условия, которые вызвали событие, сочетание элементов, характеризующих событие, основных участников события. События, которые могут произойти, определены заранее. Авторы разделили их на четыре группы: болезни лозы, наличие вредителей, физиологические риски, климатические риски. Система обнаружения событий состоит из двух главных компонентов: служба информации о событиях обнаруживает соответствующую информацию, извлекает сущности и их значения свойств; Data Mart API сериализует объекты при помощи словаря онтологий Wine Cloud, извлекает знания и отправляет в центральный компонент системы, используемый для хранения знания. Также возможно извлечение знания самим пользователем посредством SPARQL запросов, таких как: поиск событий, которые происходят в один и тот же период, извлечение факторов события или поиск событий, имеющих одну конкретную причину. Объем предлагаемой онтологии в настоящее время ограничен событиями, которые могут произойти в течение жизненного цикла виноградной лозы.

В отличие от предыдущих рассмотренных работ, основное внимание в которых уделялось выделению событий из потока данных, авторы работы (Nawaz et al., 2019) предлагают прогнозирование будущих событий, а также моделирование сложных событий при помощи СЕР и изменяемых во времени действий, осуществляемых посредством исчисления и комплексной обработки событий. В предлагаемой структуре используются два типа баз знаний: основная и действий. Первая база содержит правила для определения и

регистрации сложных шаблонов событий, вторая — определяет все альтернативные действия, которые могут быть предприняты на данный момент, чтобы избежать прогнозируемого нежелательного события. Для регистрации неопределенных событий, таких как зашумленные данные датчиков, используется гибридное предиктивное рассуждение, имеющее возможности как логического, так и вероятностного рассуждения. Кроме того, когда входящий поток данных содержит неполную, неточную или отсутствующую информацию о каком-либо специализированном сложном событии, для определения возможного состояния используется вероятностный вывод, затем механизм рассуждений прогнозирует сбой пропесса.

Использование онтологии позволяет снизить количество выхолных ланных латчиков на этапе их обработки. Пользователь может осуществлять запросы к системе по заранее заданным шаблонам наиболее распространенных событий, искать события и извлекать конкретные факты. Онтология может обеспечить синтаксическую и семантическую совместимость мультимедийных датчиков, индексируя различные типы данных. В нескольких рассмотренных работах используется расширение существующих онтологий путем добавления дополнительных возможностей. Такое решение позволяет не создавать онтологию с нуля, а добавлять в существующую онтологию набор определенных свойств для выполнения требуемых задач.

Классификация способов создания событий

Большинство рассмотренных сенсорных систем имеют возможность формирования сложных событий автоматически. Также существует возможность формирования и запроса события пользователем через интерфейс системы посредством SPARQL запроса. На рис. 1 показаны способы выделения событий из потоков, поступающих с датчиков данных.

По результатам проведенного анализа наиболее популярным способом из рассмотренных является сопоставление получаемых с датчиков данных с образцом. В целях сокращения количества данных на уровне выделения событий применяется удаление выделенного события из системы по истечению определенного времени или завершение всего цикла работы системы. Способы создания сложных событий показаны на рис. 2.

Наиболее популярным способом создания сложных событий является использование системы СЕР и шаблонов сложных событий. Недостатком СЕР является невозможность комбинации нескольких распределенных источников данных и выполнения предикативных рассуждений. Рас-



Рис. 1. Способы выделения событий из потока поступающих с датчиков данных.

смотренные системы также обладают некоторыми недостатками: ограничение на быстрое добавление или удаление новых устройств в систему без полной перенастройки; невозможность использования в иных приложениях и с иными системами, кроме тех, для которых они созданы; ограничения в обнаружении событий, автоматическом добавлении новых видов простых и сложных событий. Большинство систем статичны и не предусматривают отказов узлов сенсорной системы, но существует возможность использования неполной или зашумленной информации для предсказания отказов посредством использования в системе (Nawaz et al., 2019) вероятностного вывода.



Рис. 2. Способы создания сложных событий.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

Концептуальная модель предлагаемой онтологии

Применение датчиков с событийным принципом работы в составе сенсорных сетей не распространено. В основном сети содержат множество датчиков, передающих данные непрерывным потоком. Для выделения событий из потока данных были рассмотрены методы с использованием онтологий. Учитывая вышеописанные недостатки данных методов, необходимо разработать многоуровневую архитектуру сенсорной системы, один из уровней которой представлен редактируемой онтологией, реализующей следующие возможности: определения типов подключаемых или отключаемых узлов сенсорной системы, обнаружение отказов узлов и учета последствий отказов для PC, осуществление SPARQL-запросов и выделение событий. На рис. 3 представлена концептуальная модель предлагаемой для реализации в Protège онтологии.

Онтология имеет один класс и несколько подклассов, каждый из которых содержит определенные объекты. Свойства объектов описывают объекты и связи между ними. Свойства данных предлагаются для описания численных величин объектов. Для каждого из объектов, добавляемых в онтологию, существует набор заранее определенных свойств объекта и свойств данных, позволяющий алгоритму Protège определять его подкласс и связи с другими объектами онтологии. Неисправность сенсорного узла или удаление его из системы можно обнаружить посредством SAPRQL-запроса. Иерархическая сложность, необходимый набор свойств объектов и возможность рассуждений на их основе позволят РС понимать, какие действия возможны при подключении нового типа узла или же отключения какого-то из узлов, уже находящихся в системе. SPAROL-запросы позволят получать информацию о состоянии окружающей среды на основе



Рис. 3. Модель онтологии РС.

значимых для PC на данный момент событий. Для обработки данных, поступающих с сенсоров, предлагается использовать нейронную сеть. Перечисленные улучшения позволят PC получать информацию о событиях окружающей среды, следить за состоянием сенсорной сети, и, соответственно, знать, какие виды отдельных узлов на данный момент доступны, а какие нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ сенсорных систем РС с датчиками, работающими на основе событийного принципа работы. Также проведен обзор способов событийной обработки информации, получаемой с датчиков, не работающих на основе данного принципа. Определены способы выделения событий для обоих видов датчиков. Рассмотрены способы создания сложных событий сенсорных систем, работающих на основе методов с применением онтологий. Исходя из проведенного анализа, предложена концептуальная модель онтологии для применения в сенсорных системах с датчиками. данные с которых поступают непрерывно. Модель учитывает возможность подключения или отключения новых узлов, в том числе и при отказах, и позволяет РС понимать состояние сенсорной системы, извлекать важные на данный момент времени события, выполнять SPARQLзапросы.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку онтологии на основе предложенной концептуальной модели и применения ее для извлечения событий из потока данных датчиков сенсорных систем мобильных робототехнических платформ (Савельев и др., 2019; Ватаманюк, Савельев, 2017).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ватаманюк И.В., Савельев А.И. Мобильная робототехническая платформа как компонент киберфизического интеллектуального пространства. *Extreme Robotics*. 2017. Т. 1. № 1. С. 37–42.
- Кузнецов Б.Ф., Бузунова М.Ю. Онтология системы управления уличным освещением. *Климат, экология, сельское хозяйство Евразии.* 2018. С. 217–222.
- Савельев А.И., Харьков И.Ю., Павлюк Н.А., Карпов А.А. Мобильная автономная робототехническая платформа с блочной изменяемой структурой. Патент РФ. № RU 2704048 C1. 2019.
- Хайдарова Р.Р., Конев А.С., Лапаев М.В., Бондаренко И.Б. Онтологический подход к автоматизации процессов контроля микроклимата и безопасности музейных объектов. *Научно-технический вест*ник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 118–125.
- Angsuchotmetee C., Chbeir R., Cardinale Y. MSSN-Onto: An ontology-based approach for flexible event processing in Multimedia Sensor Networks. *Future Generation Computer Systems*, 2020. V. 108. P. 1140–1158. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.01.044
- Anumula J., Ceolini E., He Z., Huber A., Liu S.-C. An event-driven probabilistic model of sound source localization using cochlea spikes. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2018. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/iscas.2018.8351856
- Belbachir A.N., Litzenberger M., Posch C., Schon P. Realtime vision using a smart sensor system. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2007. P. 1968–1973.
 - https://doi.org/10.1109/ISIE.2007.4374909
- Belkaroui R., Bertaux A., Labbani O., Hugol-Gential C., Nicolle C. Towards events ontology based on data sensors network for viticulture domain. *In Proceedings of the 8th International Conference on the Internet of Things.* 2018. P. 1–7. https://doi.org/10.1145/3277593.3277619
- Bhargavi R., Vaidehi V., Bhuvaneswari P.T.V., Balamuralidhar P., Chandra M.G. Complex event processing for object tracking and intrusion detection in wireless sensor networks. *In 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision*. 2010. P. 848–853. https://doi.org/10.1109/ICARCV.2010.5707288
- Cao Q., Abdelzaher T., He T., Stankovic J. Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection. In IPSN 2005. *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. 2005. P. 20–27. https://doi.org/10.1109/IPSN.2005.1440887
- Ceolini E., Frenkel C., Shrestha S.B., Taverni G., Khacef L., Payvand M., Donati E. Hand-gesture recognition based on EMG and event-based camera sensor fusion: A benchmark in neuromorphic computing.

132

Frontiers in Neuroscience. 2020. V. 14. P. 637. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00637

- Dan Brickley, *Geo Ontology*. 2003. URL: https:// www.w3.org/2003/01/geo/#development (accessed 20.10.2021)
- Dan Brickley, Libby Miller. FOAF Vocabulary Specification 0.99. 2014. http://xmlns.com/foaf/spec/ URL: (accessed 20.10.2021)
- Dunkel J. On complex event processing for sensor networks. International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. 2009. V. 1–6. https://doi.org/10.1109/ISADS.2009.5207376
- Ghosh R., Mishra A., Orchard G., Thako N.V. Real-time object recognition and orientation estimation using an event-based camera and CNN. *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS) Proceedings*. 2014. P. 544–547.

https://doi.org/10.1109/BioCAS.2014.6981783

Glover A., Bartolozzi C. Robust visual tracking with a freely-moving event camera. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017. P. 3769–3776.

https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206226

- Herzog A., Jacobi D., Buchmann A. A3ME-an Agent-Based middleware approach for mixed mode environments. *The Second International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies.* 2008. P. 191–196. https://doi.org/10.1109/UBICOMM.2008.78
- Jerry R. Hobbs, Feng Pan, *Time Ontology*. 2017. URL: https://www.w3.org/TR/owl-time/ (accessed 20.10.2021)
- Kasi M.K., Hinze A., Legg C., Jones S. SEPSen: Semantic event processing at the sensor nodes for energy efficient wireless sensor networks. *In Proceedings of the 6th ACM* International *Conference on Distributed Event-Based Systems*. 2021. P. 119–122. https://doi.org/10.1145/2335484.2335497
- Kim H., Leutenegger S., Davison A.J. Real-time 3D reconstruction and 6-DoF tracking with an event camera. *In European Conference on Computer Vision*. 2016. P. 349– 364.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-46466-4 21

- Lee W., Bailer W. *Ontology for Media Resources 1.0* 2012. https://www.w3.org/TR/mediaont-10/ (accessed 09.09.2021).
- Lefort L., Henson C., Taylor K. Semantic Sensor Network XG Final Report. 2011. URL: http://www.w3.org/ 2005/Incubator/ssn/XGR-ssn-20110628/ (accessed 20.10.2021)
- Li C.H., Delbruck T., Liu S.C. Real-time speaker identification using the AEREAR2 event-based silicon cochlea. *IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS)*. 2012. P. 1159–1162. https://doi.org/10.1109/iscas.2012.6271438
- Liu H., Moeys D.P., Das G., Neil D., Liu S.-C., Delbruck T. Combined frame- and event-based detection and tracking. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2016. https://doi.org/10.1109/iscas.2016.7539103

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

Mazo M., Tabuada P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks. IEEE *Transactions on Automatic Control*. 2011. V. 56 (10). P. 2456–2461.

https://doi.org/10.1109/TAC.2011.2164036

- Mueggler E., Huber B., Scaramuzza D. Event-based, 6-DOF pose tracking for high-speed maneuvers. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. P. 2761–2768. https://doi.org/10.1109/iros.2014.6942940
- Mueggler E., Rebecq H., Gallego G., Delbruck T., Scaramuzza D. The event-camera dataset and simulator: Event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM. *The International Journal of Robotics Research*. 2017. V. 36 (2). P. 142–149. https://doi.org/10.1177/0278364917691115
- Nawaz F., Janjua N.K., Hussain O.K. PERCEPTUS: Predictive complex event processing and reasoning for IoT-enabled supply chain. *Knowledge-Based Systems*. 2019. V. 180. P. 133–146. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.05.024
- Ramesh B., Zhang S., Lee Z.W., Gao Z., Orchard G., Xiang C. Long-term object tracking with a moving event camera. *In Proceedings of the 29th British Machine Vision Conference*. 2018. P. 241.
- Rebecq H., Horstschaefer T., Gallego G., Scaramuzza D. EVO: A Geometric approach to event-based 6-DOF parallel tracking and mapping in real time. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2017. V. 2 (2). P. 593–600. https://doi.org/10.1109/lra.2016.2645143
- Rinne M., Blomqvist E., Keskisärkkä R., Nuutila E. Event processing in RDF. In Proceedings of the 4th International Conference on Ontology and Semantic Web Patterns. 2013. V. 118. P. 52–64.
- Shaukat A., Shah K., Ullah I., Khan A., Inayat K. SmartOntoSensor: Ontology for Semantic Interpretation of Smartphone Sensors Data for Context-Aware Applications. *Journal of Sensors*. 2017. P. 1–26. https://doi.org/10.1155/2017/8790198
- Sokolova A., Konushin A. Human identification by gait from event-based camera. 16th International Conference on Machine Vision Applications (MVA). 2019. P. 1–6. https://doi.org/10.23919/MVA.2019.8758019
- Somov A., Baranov A., Savkin A., Spirjakin D., Spirjakin A., Passerone R. Development of wireless sensor network for combustible gas monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2011. V. 171 (2). P. 398–405. https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.07.016
- Taylor K., Leidinger L. Ontology-driven complex event processing in heterogeneous sensor networks. *In Extended Semantic Web Conference*. 2011. P. 285–299. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21064-8 20
- Thierry M. Ontology for Media Resources. 2012. URL: https://www.w3.org/ns/ma-ont# (accessed 20.10.2021)
- Yves Raimond, Samer Abdallah. The Event Ontology. URL: http://motools.sourceforge.net/event/event.html (accessed 20.10.2021)

Conceptual Model of Sensor System Ontology with Event Information Processing Method

E. O. Cherskikh^{a,#}

 ^a St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences 199178 St. Petersburg, 14th Line, 39, Russia
[#]E-mail: cherskikh.e@iias.spb.su

The main purpose of this work is to analyze the existing methods of event processing of information both at the sensors level of sensor systems and at the level of the system as a whole. To achieve this goal, we considered sensors with an event-driven principle of operation and found that the most used are cameras and dynamic audio sensors. For other types of sensors that transmit data continuously, methods of event processing using ontologies that work with homogeneous and heterogeneous sensor systems are considered. Methods of separating events from the general stream of data coming from sensors and methods of creating complex events have been determined. The most popular way to isolate an event from a stream of data coming from sensors is to match the data received from the sensors with a sample. To create complex events, in most of the works considered, templates and specialized systems for processing complex events are used. The disadvantages of the considered methods are highlighted, a method is proposed to eliminate them by developing an editable ontology of a sensor system with the ability to consider the consequences of adding or removing sensor nodes.

Key words: sensory systems, events, event sensors, information processing

REFERENCES

- Vatamaniuk I.V., Saveliev A.I. Mobil'naya robototekhnicheskaya platforma kak komponent kiberfizicheskogo intellektual'nogo prostranstva [Mobile robotic platform as a component of cyber-physical smart space]. *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics]. 2017. V. 1 (1). P. 37–42 (in Russian)
- Khaydarova R.R., Konev A.S., Lapaev M.V., Bondarenko I.B. Ontologicheskiy podkhod k avtomatizatsii protsessov kontrolya mikroklimata i bezopasnosti muzeynykh ob"yektov [Ontological approach to museum microclimate control process automation and security]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2019. V. 19 (1). P. 118–125 (in Russian)
- Kuznetsov B.F., Buzunova M.U. Ontology of the outdoor lighting control system. AgroEurasia. 2018. P. 217–222.
- Saveliev A.I., Khar'kov I.Y., Pavlyuk N.A., Karpov A.A. Mobil'naya avtonomnaya robototekhnicheskaya platforma s blochnoy izmenyayemoy strukturoy. [Mobile self-contained robotic platform with block variable structure]. Patent RF. №RU 2704048C1. 2019.
- Angsuchotmetee C., Chbeir R., Cardinale Y. MSSN-Onto: An ontology-based approach for flexible event processing in Multimedia Sensor Networks. *Future Generation Computer Systems*, 2020. V. 108. P. 1140–1158. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.01.044
- Anumula J., Ceolini E., He Z., Huber A., Liu S.-C. An event-driven probabilistic model of sound source localization using cochlea spikes. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2018. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/iscas.2018.8351856
- Belbachir A.N., Litzenberger M., Posch C., Schon P. Realtime vision using a smart sensor system. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2007.

P. 1968–1973.

https://doi.org/10.1109/ISIE.2007.4374909

- Belkaroui R., Bertaux A., Labbani O., Hugol-Gential C., Nicolle C. Towards events ontology based on data sensors network for viticulture domain. In Proceedings of the 8th International Conference on the Internet of Things. 2018. P. 1–7. https://doi.org/10.1145/3277593.3277619
- Bhargavi R., Vaidehi V., Bhuvaneswari P.T.V., Balamuralidhar P., Chandra M.G. Complex event processing
- for object tracking and intrusion detection in wireless sensor networks. In 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision. 2010. P. 848– 853.
 - https://doi.org/10.1109/ICARCV.2010.5707288
- Cao Q., Abdelzaher T., He T., Stankovic J. Towards optimal sleep scheduling in sensor networks for rare-event detection. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. 2005. P. 20–27. https://doi.org/10.1109/IPSN.2005.1440887
- Ceolini E., Frenkel C., Shrestha S.B., Taverni G., Khacef L., Payvand M., Donati E. Hand-gesture recognition based on EMG and event-based camera sensor fusion: A benchmark in neuromorphic computing. *Frontiers in Neuroscience*. 2020. V. 14. P. 637–645. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00637
- Dan Brickley, Geo Ontology. URL: https://www.w3.org/2003/01/geo/#development (accessed 20.10.2021)
- Dan Brickley, Libby Miller. FOAF Vocabulary Specification 0.99. http://xmlns.com/foaf/spec/ URL: (accessed 20.10.2021)
- Dunkel J. On complex event processing for sensor networks. International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. 2009. V. 1–6. https://doi.org/10.1109/ISADS.2009.5207376

134

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

Ghosh R., Mishra A., Orchard G., Thakor N.V. Real-time object recognition and orientation estimation using an event-based camera and CNN. *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS) Proceedings*. 2014. P. 544–547.

https://doi.org/10.1109/BioCAS.2014.6981783

- Glover A., Bartolozzi C. Robust visual tracking with a freely-moving event camera. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. P. 3769–3776. https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206226
- Herzog A., Jacobi D., Buchmann A. A3ME-an Agent-Based middleware approach for mixed mode environments. The Second International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. 2008. P. 191–196. https://doi.org/10.1109/UBICOMM.2008.78
- Jerry R. Hobbs, Feng Pan, Time Ontology. URL: https://www.w3.org/TR/owl-time/ (accessed 20.10.2021)
- Kasi M.K., Hinze A., Legg C., Jones S. SEPSen: Semantic event processing at the sensor nodes for energy efficient wireless sensor networks. In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems. 2021. P. 119–122. https://doi.org/10.1145/2335484.2335497
- Kim H., Leutenegger S., Davison A.J. Real-time 3D reconstruction and 6-DoF tracking with an event camera. In European Conference on Computer Vision. 2016. P. 349–364.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-46466-4_21

- Lee W., Bailer W. Ontology for Media Resources 1.0 https://www.w3.org/TR/mediaont-10/ (accessed 09.09.2021).
- Lefort L., Henson C., Taylor K. Semantic Sensor Network XG Final Report. URL: http://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/XGR-ssn-20110628/ (accessed 20.10.2021)
- Li C.H., Delbruck T., Liu S.C. Real-time speaker identification using the AEREAR2 event-based silicon cochlea. *IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS)*. 2012. P. 1159–1162. https://doi.org/10.1109/iscas.2012.6271438
- Liu H., Moeys D.P., Das G., Neil D., Liu S.-C., Delbruck T. Combined frame- and event-based detection and tracking. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2016. https://doi.org/10.1100/USCAS.2016.7520102

https://doi.org/10.1109/ISCAS.2016.7539103

- Mazo M., Tabuada P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks. *IEEE Transactions on Automatic Control.* 2011. V. 56(10).
 P. 2456–2461. https://doi.org/10.1109/TAC.2011.2164036
- Mueggler E., Huber B., Scaramuzza D. Event-based, 6-DOF pose tracking for high-speed maneuvers. IEEE/RSJ

International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2014. P. 2761–2768. https://doi.org/10.1109/iros.2014.6942940

- Mueggler E., Rebecq H., Gallego G., Delbruck T., Scaramuzza D. The event-camera dataset and simulator: Event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM. *The International Journal of Robotics Research*. 2017. V. 36 (2). P. 142–149. https://doi.org/10.1177/0278364917691115
- Nawaz F., Janjua N.K., Hussain O.K. PERCEPTUS: Predictive complex event processing and reasoning for IoTenabled supply chain. *Knowledge-Based Systems*. 2019. V. 180. P. 133–146. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.05.024
- Ramesh B., Zhang S., Lee Z.W., Gao Z., Orchard G., Xiang C. Long-term object tracking with a moving event camera. In Proceedings of the 29th British Machine Vision Conference. 2018. P. 241.
- Rebecq H., Horstschaefer T., Gallego G., Scaramuzza D. EVO: A Geometric Approach to Event-Based 6-DOF Parallel Tracking and Mapping in Real Time. IEEE Robotics and Automation Letters. 2017. V. 2 (2). P. 593–600.

https://doi.org/10.1109/lra.2016.2645143

- Rinne M., Blomqvist E., Keskisärkkä R., Nuutila E. Event processing in RDF. In Proceedings of the 4th International Conference on Ontology and Semantic Web Patterns. 2013. V. 118. P. 52–64.
- Shaukat A., Shah K., Ullah I., Khan A., Inayat K. SmartOntoSensor: Ontology for Semantic Interpretation of Smartphone Sensors Data for Context-Aware Applications. *Journal of Sensors*. 2017. P. 1–26. https://doi.org/10.1155/2017/8790198
- Sokolova A., Konushin A. Human identification by gait from event-based camera. 16th International Conference on Machine Vision Applications (MVA). 2019. P. 1–6. https://doi.org/10.23919/MVA.2019.8758019
- Somov A., Baranov A., Savkin A., Spirjakin D., Spirjakin A., Passerone R. Development of wireless sensor network for combustible gas monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2011. V. 171 (2). P. 398–405. https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.07.016
- Taylor K., Leidinger L. Ontology-driven complex event processing in heterogeneous sensor networks. In Extended Semantic Web Conference. 2011. P. 285–299. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21064-8 20
- Thierry Michel, Ontology for Media Resources. URL: https://www.w3.org/ns/ma-ont# (accessed 20.10.2021)
- Yves Raimond, Samer Abdallah. The Event Ontology. URL: http://motools.sourceforge.net/event/event.html (accessed 20.10.2021)

——— ЗРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ——

УДК 629.786 + 001.891.5 [594.3 + 591.484+591.169]

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОРГАНА ЗРЕНИЯ *HELIX LUCORUM* В 185-СУТОЧНОМ ОРБИТАЛЬНОМ ПОЛЕТЕ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2022 г. Г. И. Горгиладзе^{1,*}

¹ ФГБУН Государственный научный центр Российской Федерации, Институт медико-биологических проблем РАН 123007 Москва, Хорошевское шоссе, д. 76а, Россия

> **E-mail: gio119193@mail.ru* Поступила в редакцию 10.09.2021 г. После доработки 24.01.2022 г. Принята к публикации 04.02.2022 г.

В статье изложены результаты космического эксперимента (КЭ) "Регенерация-1" на брюхоногой наземной легочной улитке Helix lucorum. Улитки в количестве 101 особи были разделены на три экспериментальные группы: на полетную группу (ПГ) и на две контрольные группы – группу синхронного сопровождения (СГ) и виварийную группу (ВГ). За 10-11 ч перед началом КЭ у всех улиток ампутировали глазные шупальца. Улиток ПГ в специальном светонепроницаемом контейнере на пилотируемом космическом корабле (ПКК) "Союз ТМА-19" доставляли на Международную космическую станцию (МКС). Продолжительность экспозиции в орбитальном полете (ОП) составила 185 сут и 22 ч. Улитки СГ находились в аналогичном "полетному" контейнере при температуре, близкой к бортовой. Улитки ВГ содержались в просторных террариумах при нормальном световом режиме и температуре $20-22^{\circ}$ С и имели свободный доступ к пище и воде. Состояние зрения нативных и регенерировавших глаз оценивали по морфологическим параметрам, суммарной электрической активности сетчатки и спайковой активности зрительного нерва в ответ на одиночные и парные световые стимулы разной яркости и длительности. После завершения КЭ регенерация глазных шупалец с функционирующими глазами наблюдалась у 78% улиток ПГ. 69% улиток СГ и 96% улиток ВГ. Регенераты как полетных, так и контрольных улиток по морфологическим и электрофизиологическим показателям были схожи между собой и заметно уступали таковым нативных глазных щупалец в течение 4-летнего периода после завершения эксперимента. Световая депривация не влияла на характер регенерации. В регенерировавшем зрительном нерве отсутствовала "off"-реакция на выключение светового стимула.

Ключевые слова: улитка, регенерация, зрение, невесомость, международная космическая станция **DOI:** 10.31857/S0235009222020044

введение

Из всех абиотических факторов только гравитация, характеризующаяся величиной ускорения свободного падения $g = 9.8 \text{ м/c}^2$, оставалась неизменным фоном развития жизни на Земле. Такой уровень гравитации называют 1 g. Гравитация наложила отпечаток на структурно-функциональную организацию большинства земных существ. Выяснение значимости силы тяжести в различных жизненных процессах – парадигма космической биологии. Сохранится ли способность к восстановлению поврежденных или утраченных частей тела в такой необычной и незнакомой среде, какой является невесомость? Эта проблема имеет и практическое значение. Длительность пребывания человека в космосе увеличивается, объем работ, сложность операторских задач постоянно растет – все это повышает вероятность несчастного случая и получения различного рода травм, требующих хирургического вмешательства. По этой причине сведения по регенерации в космическом полете, полученные в модельных опытах на животных, окажутся полезными в системе мер по медицинскому обеспечению пилотируемых космических полетов. Животные первыми стали "осваивать" космос. Они были и остаются источником получения опережающей информации о возможных рисках для космонавта.

Улитка — один из первых биологических объектов, на котором опытным путем были исследованы регенерационные способности животного организма. Итальянский натуралист Ладзаро Спалланцани отрезал садовой улитке *Helix aspersa* (близкородственный вид улиток *Helix lucorum* и *Helix pomatia*) переднюю часть головы вместе с передними и задними (глазными) щупальцами.

Спустя некоторое время после операции удаленная часть головы вместе со всеми щупальцами полностью восстанавливалась (работа была опубликована в 1768 г., цитируется по Mattson, 1976). В дальнейшем этот эксперимент известного натуралиста, показав легкость манипуляции, наглядность результатов и доступность объекта, привлек внимание многих исследователей. Регенерацию глазных шупалец стали изучать на наземных, пресноводных и морских моллюсках. Значительное внимание было уделено выяснению зависимости регенерации от различных биотических и абиотических факторов (Сидельников, 1991; 1997, 2000; Gilary, 1983; Тартаковская, 2003).

Глаз улитки имеет камерное строение. Сетчатка неинвертированная, однослойная и состоит из первичночувствующих рабдомерных (микровиллярных) фоторецепторов и опорных (пигментных) клеток. Большая часть фоторецепторов содержит микровиллы длиной 9-11 мкм, меньшаямикровиллы длиной 4–6 мкм. Отходящие от фоторецепторов аксоны образуют зрительный нерв, соединяющий глаз с церебральными ганглиями. Опорные клетки сетчатки содержат только один фотопигмент – родопсин, из-за чего улитки лишены цветового зрения (Догель, 1981; Зайцева, 1992; Черноризов и др., 1992). Простота структурной организации органа зрения улитки подвигла сотрудников кафедры психофизиологии МГУ использовать глаз этого животного (Helix lucorum, Helix pomatia) в качестве модели для изучения механизмов кодирования яркости света. В диапазоне малых значений яркости пиковые значения электроретинограммы (ЭРГ) коррелировали с яркостью светового стимула. При больших значениях яркости света рост амплитуды реакции замедлялся, в дальнейшем достигая "плато насыщения". На включение света активировались фоторецепторы с длинными микровиллярными образованиями, на выключение – фоторецепторы с укороченными микровиллами. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что в глазу улитки интенсивность света кодируется соотношением активности "яркостной" и "темновой" фоторецепторных систем. Другими словами, сетчатка улитки функционирует как "двойная ретина" с яркостной и темновой системами фоторецепторов, и настроена только на восприятие яркости света и его градации (Chernorizov et al., 1994; Шехтер, Греченко, 2009; Шехтер и др., 2010). Чувствительность к свету высокая. Порог реагирования для Helix pomatia составляет 6 ×10⁻¹¹ Вт/см². Для человеческого глаза в тех же условиях требуется многоминутная темновая адаптация для различения источника света как слабо светящейся точки (von Berg, Schneider, 1967).

Цель настоящей работы — оценка воздействия невесомости на структурно-функциональное восстановление органа зрения в опытах на наземных легочных улитках *Helix lucorum* в полугодовом орбитальном полете (ОП) на МКС. В статье представлены результаты космического эксперимента (КЭ) "Исследование влияния различных факторов космического полета на процессы регенерации у биообъектов по морфологическим и электрофизиологическим показателям" (шифр "Регенерация-1"), проводимого по долгосрочной программе научно-прикладных исследований и экспериментов РКА и Роскосмоса на МКС.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Объект исследования. Наземная легочная двуполая улитка Helix lucorum var. taurica (Kryn., 1833) турецкая или горная улитка, подвид из рода *Helix* (L.). Голова улитки снабжена двумя парами подвижных щупалец-тентакулов. Передние короткие губные щупальца используются для ощупывания окружающей среды, задние - заметно большей длины являются глазными шупальцамиомматофорами. Масса взрослой улитки может достигать 25 г, средняя продолжительность жизни 5-6 лет. В сухую жаркую погоду и во время зимней спячки для предотвращения потери влаги устье раковины закрывается защитной известковой пленкой – эпифрагмой (Джавелидзе, 1972; Догель, 1981). Орган зрения *Helix lucorum* – пара глазных щупалец (рис. 1). Дистальный конец каждого шупальца расширен, образуя так называемый глазной пузырь. В его средней части расположен бокаловидный глаз камерного типа, состоящий из роговицы, хрусталика, стекловидного тела и сетчатки. Глаз заключен в глазную капсулу. В норме правые и левые глазные щупальца, бокаловидные глаза и сферической формы или формы эллипса хрусталики по своим размерам практически идентичны друг другу. Длина глазного щупальца взрослой улитки 20 мм, диаметр глазного бокала 300-320 мкм. Глаза неподвижны. Их подвижность достигается несущими структурами, каковыми являются сами щупальца. Благодаря последним глаза могут отклоняться по всем направлениям одновременно и симметрично, либо раздельно друг от друга и в разные стороны, и менять свое положение в щупальцах при помощи специального механизма ретракции. Глазные шупальца в отличие от тела улитки, защищенного довольно прочным известковым панцирем - раковиной, являющейся ее экзоскелетом, - наиболее выступающие и незащищенные образования. В ответ на механическое воздействие они вместе с глазными бокалами мускулом-ретрактором вворачиваются в тело улитки.

Подготовка КЭ. Предварительно отобранные улитки, прошедшие 1.5-месячный карантинный срок, были разделены на полетную группу (ПГ) и две контрольные группы — группу синхронного сопровождения (СГ) и виварийную группу (ВГ).

ГОРГИЛАДЗЕ



Рис. 1. Орган зрения *Helix lucorum* крупным планом.

a — глазные щупальца, в рамке глазной пузырь при большом увеличении; δ — извлеченные из тела улитки глазные щупальца с глазами; a — извлеченные из глазных щупалец глазные бокалы и хрусталики. Взрослая половозрелая улитка: масса 12 г, диаметр раковины 35 мм.

Для кормления улиток использовали морковь, огурец, листья салата, обильно смоченные водой. За восемь суток до начала КЭ прекращали кормление улиток ПГ и СГ. За трое суток до начала эксперимента улитки были доставлены на техническую позицию г. Байконур (Казахстан). Улиток взвешивали на электронных весах "Accula3 V-1 mg" и измеряли диаметр раковины штангенциркулем. За 10–11 ч перед стартом космического корабля улиток погружали на 2 мин в 1-процентный раствор нембутала и различные части глазных щупалец ампутировали специальными ножницами с одной или обеих сторон (рис. 2).

Научная аппаратура. Научная аппаратура (НА) состоит из светонепроницаемого контейнера "Улитка" и автоматического регистратора температуры (АРТ). Контейнер снабжен фильтрационной системой для предотвращения попадания в окружающую среду продуктов жизнедеятельности животных, а также летучих химических выделений и неприятного запаха, возникающих при возможной гибели отдельных особей (Горгиладзе и др., 2010). На МКС НА доставляли на пилотируемом космическом корабле (ПКК) "Союз ТМА-19М" № 719. Члены российского экипажа переносили НА в служебный модуль (СМ) российского сегмента (РС) и размещали на панели № 406, предварительно сняв крышку контейнера для доступа воздуха (рис. 3). Улитки СГ находились в аналогичном "полетному" контейнере при температуре, близкой к бортовой. Улитки ВГ содержались в просторном террариуме при нормальном световом режиме и температуре 20-22° и имели свободный доступ к корму и воде. Все улитки были пронумерованы арабскими цифрами, нанесенными на наружной поверхности раковины.

Методы исследования. Фотовидеосъемку интактных и регенерировавших глазных щупалец осуществляли при помощи фотоадаптера и цифровой видеокамеры ("Color digital camera Levenhuk C510 NG"), установленной на окуляре стереоскопического микроскопа "Микромед МС-2" с функцией захвата и сохранения изображений. Изображение в режиме реального времени отображалось на экране ноутбука и одновременно сохранялось в его памяти для последующей обработки. Регенераты, появившиеся на месте ампутации, сравнивались с ампутированными, а также с нативными глазными шупальцами у одной и той же улитки. Для регистрации ЭРГ использовали полуинтактный препарат улитки. Регистрирующий электрод располагался в центральной части роговицы. Световую стимуляцию глаз после 40-минутной темновой адаптации осуществляли одиночными и парными световыми стимулами. Яркость света регулировалась при помощи электрического тока напряжением 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 В, подаваемого на светодиод белого свечения от электрического стимулятора MSE-3R ("Nihon Kohden") (Горгиладзе, 2008). Длительность светового стимула составила 0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 1 и 2 с. Интервалы между парными световыми



Рис. 2. Уровни ампутации глазных щупалец.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОРГАНА ЗРЕНИЯ



Рис. 3. Этапы подготовки КЭ.

а — контейнер "Улитка" с улитками; *б* — контейнер "Улитка" закрывается герметически крышкой; *в* — контейнер "Улитка" в транспортировочном чехле; *г* — контейнер "Улитка" со снятой крышкой и АРТ (обозначен стрелкой) на панели № 406 в СМ РС МКС.

стимулами – 0.3, 5, 10 с, 0.5 мин, 1, 2, 3 и 4 мин. Каждый цикл световой стимуляции, состоящий из семи световых стимулов нарастающей яркости при заданной длительности 0.5 с, и 5 световых стимулов нарастающей длительности при заданной яркости света на 40 В, завершался повторением первого светового стимула. Для регистрации спайковой активности зрительного нерва использовали два метода: вольфрамовый микроэлектрод диаметром 20-30 мкм вводили в нерв непосредственно у выхода из глазного яблока; глазное щупальце рассекали продольным разрезом, и основание глазного бокала в месте выхода зрительного нерва обрабатывали в 0.6% проназы, приготовленном на физиологическом растворе для наземных гастропод. Спустя 30 мин, этот участок препарата отмывали физиологическим раствором, под зрительный нерв подводили крючок из платиновой проволочки диаметром 40 мкм и заливали приготовленным на физиологическом растворе агар-агаром. В ряде случаев из глазных бокалов извлекали хрусталики. Нативные и регенерировавшие глазные щупальца фиксировали в жидкости Буэна и после дегидратации заключали в парафин. Серийные срезы глазных бокалов толщиной 5–7 мкм окрашивали по методу Карачи и железным гематоксилином по Гейденгайну. Исследования проводили при комнатной температуре 19–22°С, начиная с 3–5 сут после завершения КЭ, и продолжались с определенной периодичностью в течение четырех лет.

Условия орбитального полета (ОП). Уровень гравитации на МКС составил $10^{-4}-10^{-5}$ g, параметры орбиты (апогей/перигей, км) — 390/375. Температура в зоне расположения НА регистрировалась АРТ каждые 3 ч в автоматическом режиме. Кроме того, через каждые двое суток показатели температуры с табло АРТ передавались в Центр управления полетом. В течение ОП параметры микроклимата в зоне расположения НА состояли из: температуры воздушной среды 19—21°С, относительной влажности 42—45%, парци-

ального давления кислорода 166–168 мм рт.ст., углекислого газа 1.0–1.8 мм рт.ст., атмосферного давления 735–740 мм рт.ст. За сутки перед завершением экспедиции космонавты закрывали контейнер крышкой, размещали в транспортировочный чехол и вместе с АРТ переносили в спускаемый аппарат ПКК "Союз ТМА-19М" № 719. Длительность ОП составила 185 сут и 22 ч (сеанс в экспедиции 46/47 на МКС с 15 декабря 2015 г. по 18 июня 2016 г.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПГ (16 улиток)

Масса улиток перед полетом составила 5.2 ± ± 0.9 г при диаметре раковины ~25.6 мм. У трех улиток было ампутировано правое глазное щупальце, у 11 левое глазное щупальце, у двух оба глазных шупальца. При вскрытии контейнера после полета у всех улиток устье раковины было затянуто эпифрагмой. Под ней на разной глубине имелась вторая и, в ряде случаев, третья эпифрагма. На вторые сутки после завершения КЭ определяли массу улиток и измеряли диаметр раковины. Средняя потеря массы составила 31%. Диаметр раковины оставался без изменений. Улиток размещали в просторный террариум, на дне которого был уложен смоченный водой лигнин. Спустя 2 ч улитки проснулись и начали медленно ползти. Улиток на 2 мин погружали в воду, после чего они стали более активными и стали поедать корм (листья салата, протертая морковь). На пятые сутки масса улиток приблизилась к предполетным показателям и через полгода превысила предполетные показатели на 27%. У них кроме роста массы отмечалось увеличение размеров раковины (рис. 4). Из 18 ампутированных глазных щупалец 14 щупалец регенерировали с глазными бокалами (78%) (табл. 1). В глазном пузыре одного регенерировавшего щупальца находились два глазных бокала. В двух регенератах отсутствовали глазные бокалы. Еще у двух улиток регенерат полностью отсутствовал. Часть глазного щупальца, оставшаяся после ампутации, представляла собой ампутационную культю конической формы, вершина которой была затянута соедини-



Рис. 4. Рост раковины в послеполетном периоде. Граница роста отмечена прерывистой линией. Спустя полгода после завершения КЭ.

тельной тканью, и она оставалась в таком виле практически без изменений по прошествии четырех лет после завершения КЭ (рис. 5, 6, 7, 8). Две улитки, подвергнутые перед полетом ампутации обоих глазных щупалец, демонстрировали регенераты с обеих сторон с глазными пузырями и глазными бокалами. У одной улитки глаз в правом регенерате был заметно крупнее в сравнении с глазом левого регенерата (рис. 9, 10). Все регенерировавшие глазные щупальца были короче, тоньше и с глазными пузырями в большинстве случаев меньшего размера. Некоторые регенераты выглядели как оголенные. У них отсутствовала присущая интактному щупальцу кожа с характерным окрасом и сквозь полупрозрачный покров просматривался мускул-ретрактор. Размеры глазных бокалов и их хрусталиков в регенерировавших щупальцах на 40-60% уступали таковым, извлеченным из ампутированных перед полетом глазных щупалец, а также из нативных глазных щупалец у той же улитки. По прошествии четырех лет после завершения КЭ не отмечалось полного восстановления изначальных размеров регенерировавших глазных щупалец и глазных бокалов, разве что щупальца могли несколько прибавиться в длину и кожный покров регенерата приобрести более темный окрас. Функция ретракции была восстановлена: на механическое воздействие регенерировавшее глазное щупальце вворачивалось в тело улитки.

Особенности регенерации глазных шулален улиток ПГ	Число щупалец			
Особенности регенерации глазных щуналец улиток ти	Справа	Слева	Справа и слева	Всего
Было ампутировано	3	11	4	18
Регенерировали с глазным пузырем и глазным бокалом	3	6	4	13
Регенерировали с двумя глазными бокалами в одном	—	1	—	1
глазном пузыре				
Регенерировали с глазным пузырем без глазного бокала	_	2	—	2
Регенерат отсутствовал	_	2	_	2

Таблица 1. Регенерация глазных щупалец улиток полетной группы

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОРГАНА ЗРЕНИЯ



Рис. 5. Ампутированы глазные щупальца с правой стороны.

Регенераты спустя: a – полгода и δ – 4 года после завершения КЭ; e – глазные пузыри с глазными бокалами нативного глаза (справа) и регенерата (слева) на пятые сутки (1) и спустя 4 года и 2 мес (2) при большом увеличении. Стрелками здесь и на остальных рисунках отмечены границы ампутации глазных щупалец.



Рис. 6. Ампутировано глазное щупальце с правой стороны. Регенерат: a - 4-е сутки после завершения КЭ; $\delta -$ извлеченные из тела улитки нативное и регенерировавшее глазные щупальца; e - извлеченные из щупалец глазные бокалы и хрусталики.



Рис. 7. Ампутированы глазные щупальца с левой стороны.

Регенераты спустя: *a* – 0.5 мес; *б* – 3 мес; *в* – полгода; *г*, *д*, *e* – 4 года. На *б* стрелкой обозначен просвечивающий сквозь кожный покров регенерата мускул-ретрактор; на *д* – глазной пузырь регенерата без глазного яблока; на *e* – отсутствие регенерата.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

ГОРГИЛАДЗЕ



Рис. 8. Ампутировано глазное щупальце с левой стороны.

В глазном пузыре регенерата два глазных бокала. После завершения КЭ спустя: *а* – полмесяца; *б* – излеченные из тела улитки глазные щупальца, 3 года и 8 мес; *в* – извлеченные из глазных щупалец глазные бокалы и хрусталики.



Рис. 9. Ампутированы оба глазных щупальца у основания.

После завершения КЭ спустя: *a* – 5-е сутки; *б* – 3 года и 1 мес. Глазной бокал в правом регенерате крупнее глазного бокала левого регенерата.



Рис. 10. *а* – глазные шупальца перед ампутацией и *б* – глазные бокалы и хрусталики, извлеченные из этих шупалец. После завершения КЭ: *в* – регенерировавшие глазные шупальца спустя 2 года и 6 мес; *г* – глазные бокалы и хрусталики регенератов.
РЕГЕНЕРАЦИЯ ОРГАНА ЗРЕНИЯ

	Число щупалец				
особенности регенерации глазных шупалец улиток ст	Справа	Слева	Справа и слева	Всего	
Было ампутировано	7	11	8	26	
Регенерировали с глазным пузырем и глазным бокалом	5	6	6	17	
Регенерировали с двумя глазными бокалами в одном	—	1	—	1	
глазном пузыре					
Регенерировали с глазным пузырем без глазного бокала	1	1	1	3	
Регенерат отсутствовал	1	2	2	5	

Таблица 2	 Регенерация 	глазных щупалец	улиток синх	ронного соп	ровождения
			~		1 / 1

СГ (22 улитки)

Масса улиток синхронного сопровождения перед полетом составила 5.2 \pm 1.2 г при диаметре раковины ~25.6 мм. У семи улиток было ампутировано правое глазное щупальце, у 11 – левое глазное щупальце, у четырех – оба глазных щупальца. Контейнер вскрывали на третьи сутки после завершения КЭ. Устье раковины улиток было затянуто 1–3 эпифрагмами. Масса составила 3.8 \pm \pm 0.9 г (уменьшение в сравнении с исходной на 27%). Они были помещены в просторный террариум, где имели свободный доступ к обильно увлажненному корму. Спустя полгода после завершения эксперимента масса улиток составила 6.4 \pm 1.1 г (увеличение в сравнении с исходной на 23%). У улиток отмечался рост диаметра раковины. Из 26 ампутированных глазных щупалец 18 щупалец регенерировали с глазными бокалами (69%) (табл. 2). У одной улитки в глазном пузыре регенерата на левой стороне имелись два глазных бокала. У трех улиток в глазном пузыре регенерата глазной бокал отсутствовал. У четырех улиток вместо регенерата имелась культя (рис. 11). Две улитки из четырех, перед началом эксперимента подвергнутых ампутации обоих глазных щупалец, демонстрировали регенераты с глазными бокалами. У одной из них глазной бокал в правом регенерате был заметно крупнее в сравнении с таковым на левой стороне. У оставшихся двух улиток левое глазное щупальце регенерировало с глазным бокалом. У одной из них на правой стороне в глазном пузыре регенерата глазной бокал



Рис. 11. Ампутированы глазные шупальца с правой стороны. После завершения КЭ спустя: *a* – 10 сут; *б* – 15 сут, стрелкой отмечена раневая поверхность на месте ампутированного у основания глазного щупальца; *e* – извлеченные глазные щупальца, вместо регенерата небольшой тканевой вырост; *г* – 2.5 года, регенерат отсутствует, культя.





После завершения КЭ спустя: *a* – 5 сут, с левой стороны вместо регенерата культя; *б* – спустя 2 мес; *в* – спустя полгода, глазной бокал в правом регенерате крупнее глазного бокала левого регенерата; *е* – спустя год и 4 мес, в глазном пузыре регенерата с правой стороны отсутствует глазной бокал.

ГОРГИЛАДЗЕ

	Число щупалец				
Особенности регенерации глазных шупалец улиток Б	Справа	Слева	Справа и слева	Всего	
Было ампутировано	23	29	22	74	
Регенерировали с глазным пузырем и глазным бокалом	23	28	19	70	
Регенерировали с двумя глазными бокалами в одном	—	-	1	1	
глазном пузыре					
Регенерировали с глазным пузырем без глазного бокала	—	1	1	2	
Регенерат отсутствовал	—	—	1	1	

Таблица З.	Регенерация глазны	іх щупалец улиток	виварийной ко	нтрольной группы
	· · ·		.	

отсутствовал, у другой раневая поверхность ампутированного щупальца на левой стороне зажила без появления регенерата (рис. 12).

ВГ (63 улитки)

Масса улиток этой контрольной группы составила 6.0 ± 1.3 г при диаметре раковины ~ 27.6 мм. Перед началом эксперимента 23 улиткам было ампутировано правое глазное щупальце, 29 улиткам левое глазное щупальце, 11 улиткам оба глазных щупальца. Спустя полгода после завершения КЭ масса улиток составила 8.6 ± 1.2 г (увеличение в сравнении с исходной на 30%). Все улитки находились в активном состоянии. Из 74 ампутированых глазных щупальц 71 щупальце регенери-

ровало с глазными бокалами (96%) (табл. 3). У одной улитки из 52, подвергнутых односторонней ампутации глазного шупальца, в глазном пузыре регенерата на правой стороне глазной бокал отсутствовал. У восьми улиток из 11 с двусторонней ампутацией глазных щупалец регенераты с обеих сторон имели глазные бокалы. В двух случаях глазной бокал в регенерате на правой стороне был крупнее в сравнении с таковым на левой стороне. У одной улитки в глазном пузыре регенерата на левой стороне находились два глазных бокала. У другой ампутированная часть левого щупальца регенерировала с глазным пузырем без глазного бокала. У третьей на левой стороне вместо регенерата имелась ампутационная культя. В течение всего периода наблюдения регенерировавшие



Рис. 13. Ампутированы глазные щупальца с левой стороны. После завершения КЭ спустя: *a* – 5 мес; *б* – полгода; *в* – 4 года; *е* – глазные пузыри регенерировавшего и нативного глазных щупалец с глазными бокалами спустя полгода *1* и 4 года 2 при большом увеличении.





После завершения КЭ спустя: *a* – 7 сут, правый глазной бокал в правом регенерате крупнее глазного бокала левого регенерата; *б* – 2 года, два глазных бокала в глазном пузыре регенерата с левой стороны; *в* – 3.5 года, отсутствие глазного бокала в регенерате с левой стороны; *е* – 3.5 года, отсутствие регенерата с правой стороны.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОРГАНА ЗРЕНИЯ

Показатели ЭРГ	ПГ		СГ		ΒΓ	
	1	2	1	2	1	2
Амплитуда, мВ	0.3-2.2	1.4–6.7	0.3-1.9	1.3-6.8	0.3-2.2	1.2-7.0
Латентность, мс	105-200	80-135	108-205	80-139	103-198	82-140

Таблица 4. Характеристики ЭРГ улиток ПГ, СГ и ВГ на световые стимулы

Примечание: *1* – регенерат; *2* – нативный глаз. На светодиод подается напряжение 40 В, длительность светового стимула 0.5 с.

глазные бокалы оставались практически без изменений. Кроме того, отсутствовало восстановление изначального размера и кожного покрова новообразованных щупалец (рис. 13, 14).

ЭРГ нативных глаз

На световой стимул от корнеальной поверхности темноадаптированного глаза регистрировалась ЭРГ в виде отрицательного потенциала пиковой амплитудой до 7.1 мВ (табл. 4). Передний фронт ЭРГ состоял из двух компонентов: быстрого и медленного. Быстрый компонент составлял не менее 2/3 переднего фронта. Довольно часто после быстрого компонента появлялась небольшая инцизура (выемка) с последующим кратковременным небольшим подъемом-реполяризацией. Помимо инцизуры переход быстрого в медленный компонент происходил через небольшое плато и перегибы, либо этот участок ЭРГ был сглажен, и быстрый компонент плавно переходил в медленный. Передний фронт мог состоять целиком из быстрого компонента. В этом случае медленный компонент развивался на заднем фронте ЭРГ (рис. 15). Такое разнообразие ЭРГ можно было увидеть в процессе тестирования глаза светом нарастающей яркости и длительности. Конфигурация и амплитудные характеристики ЭРГ на одни и те же световые стимулы при



Рис. 15. Конфигурация ЭРГ нативных глаз Helix lucorum.

Стрелками отмечены инцизура (1), плато (2) и перегибы (3, 4) между быстрым и медленным компонентами ЭРГ; плавный переход быстрого компонента ЭРГ в медленный (5); медленный компонент на заднем фронте ЭРГ (6). Яркость света на 40 В, длительность 0.5 с.



Рис. 16. ЭРГ нативных глаз на световые стимулы нарастающей яркости.

1 и *3* – правый глаз; *2* и *4* – левый глаз. Заданная длительность света 0.5 с. Здесь и на остальных рисунках цифровые значения над ЭРГ – подаваемое на светодиоды напряжение электрического тока в Вольтах, длительность света в секундах, отклонение вниз соответствует негативности.



Рис. 17. Пиковая амплитуда и плато насыщения ЭРГ на световые стимулы нарастающей яркости.

1 – нативные глаза; 2 – регенерировавшие глаза ПГ; 3 – регенерировавшие глаза СГ; 4 – регенерировавшие глаза ВГ. Средние значения от пяти улиток для каждой экспериментальной группы. По оси абсцисс – яркость световых стимулов, заданные напряжением электрического тока в Вольтах; по оси ординат – пиковая амплитуда ЭРГ.

одновременной регистрации с обоих глаз, как правило, были близки между собой. С увеличением яркости и длительности света крутизна быстрого компонента ЭРГ нарастала. В первом случае уменьшалась латентность ее появления с 0.35 до 0.1 с. Латентность медленного компонента колебалась в пределах 0.2–0.4 с. Увеличение длительности света при заданной яркости не отражалось сколько-нибудь заметно на латентность ЭРГ. На



Рис. 18. ЭРГ нативных глаз на световые стимулы нарастающей длительности.

1 и *3* – правый глаз; *2* и *4* – левый глаз. Заданная яркость света на 40 В.

выключение света ЭРГ, как правило, не реагировала, и потенциал медленно снижался до исходного состояния. На самый слабый световой стимул, используемый в настоящей работе, этот процесс занимал около 4 с. Увеличение яркости и ллительности света растягивал это время до 13-15 с. На световые стимулы нарастающей яркости наибольший прирост амплитуды ЭРГ отмечался в диапазоне 5-20 В, после чего рост амплитуды ЭРГ заметно снижался и при яркости света на 40-50 В наступало плато насышения (рис. 16, 17). Такая же нелинейность ЭРГ-реакции проявлялась на нарастающую длительность света. Наибольший прирост амплитуды ЭРГ отмечался в диапазоне 0.01-0.3 с, и плато насышения наступало при длительности света 1 с (рис. 18). После завершения каждого цикла световой стимуляции нарастающей яркости и длительности повторение первого светового стимула вызывало практически идентичную с исходной ЭРГ-реакцию. На парные световые стимулы реакция на второй стимул, отстающий от первого на 0.3 с, оставалась без ответа. Первая более или менее заметная реакция на второй стимул появлялась при интервале 5 с. С увеличением интервалов амплитуда ЭРГ на второй световой стимул увеличивалась, и при 3-4-минутном интервале достигала величины ЭРГ на первый световой стимул (рис. 19). Реги-



Рис. 19. ЭРГ нативных глаз на парные световые стимулы. 1, 3, 5 – правый глаз; 2, 4, 6 – левый глаз. Значения времени здесь и на остальных рисунках – интервалы между парными световыми стимулами. Заданная яркость света на 40 В, длительность 0.5 с.



Рис. 20. ЭРГ нативных глаз улиток ПГ (1), СГ (2) и ВГ (3) на световые стимулы нарастающей длительности. Заданная яркость света на 40 В. 187-е сутки после завершения КЭ.

страция ЭРГ нативных глаз не выявила скольконибудь заметной разницы на световую стимуляцию между улитками всех экспериментальных групп, вне зависимости от условий их содержания (рис. 20).

ЭРГ регенерировавших глаз

В регенерировавших глазах конфигурация ЭРГ в целом соответствовала таковой, описанной для ЭРГ нативных глаз. Она состояла из быстрого и медленного компонентов, с инцизурой и перегибами между ними. Отличие от ЭРГ нативных глаз проявлялось в ее амплитудно-временных параметрах. Она имела несколько большую латентность и меньшую (в 2–4 раза) пиковую амплитуду (табл. 4). Динамика ее возрастания на световые стимулы нарастающей яркости и длительности характеризовалась небольшим приростом. Плато



Рис. 21. ЭРГ регенерировавшего (1) и нативного (2) глаз улитки ВГ на световые стимулы нарастающей яркости (*a*) и длительности (*б*). 190-е сутки после завершения КЭ.



Рис. 22. ЭРГ регенерировавшего (*1*, *3*, *5*) и нативного (*2*, *4*, *6*) глаз улитки ВГ на парные световые стимулы. Заданная яркость света на 40 В, длительность 0.5 с. 190-е сутки после завершения КЭ.

насыщения наступало при яркости света на 20– 30 В и длительности света 0.3 с (рис. 17, 21).

На парные световые стимулы ЭРГ на второй стимул, аналогичный с реакцией на первый стимул, отмечалась при интервале 2 мин (рис. 22). Вышеописанная картина наблюдалась в регенератах как полетных улиток, так и улиток наземного контроля. У одной улитки ПГ с ампутированными перед полетом глазными щупальцами на обе стороны, регенерировавшие глаза по-разному реагировали на одни и те же световые стимулы (рис. 23). Два глаза, появившиеся в регенерировавшем глазном пузыре улитки ПГ, реагировали ЭРГ-реакцией на световую стимуляцию значительно меньшей амплитудой в сравнении с ЭРГ нативного глаза той же улитки. Кроме того, ам-



Рис. 24. ЭРГ нативного глаза (1) и двух регенерировавших глаз улитки ПГ из одного глазного пузыря регенерата (2, 3) на нарастающие по длительности световые стимулы. На 2 – стрелками отмечены положительные потенциалы. 97-е сутки после завершения КЭ.



Рис. 23. ЭРГ регенерировавших глаз улитки ВГ на световые стимулы нарастающей яркости (a) и длительности (δ).

a - 1, 3 - правый глаз; 2, 4 - левый глаз. Заданная длительность света 0.5 с; 6 - 1 - правый глаз; 2 - левый глаз. Заданная яркость света на 40 В. Стрелками отмечены небольшие колебания потенциала. 188-е сутки после завершения КЭ.



Рис. 25. ЭРГ регенерировавших глаз на правой и левой стороне улитки ПГ на парные световые стимулы. 1, 3, 5 – правый глаз; 2, 4, 6 – левый глаз. Цифровые значения – интервалы между парными световыми стимулами. Яркость света на 40 В, длительность 0.5 с. Стрелками отмечены небольшие колебания потенциала. 97-е сутки после завершения КЭ.



Рис. 26. Спайковая активность на световые стимулы в зрительном нерве нативного и регенерировавшего глаз после завершения КЭ:

 $a - улитка ВГ, 9-е сутки; <math>\delta - улитка ПГ, 11-е сутки.$ 1 - нативный зрительный нерв; 2 - регенерат. Яркость света на 40 В, длительность 1 с.

плитуда и конфигурация ЭРГ этих "близнецов" заметно отличались друг от друга (рис. 24). У двух улиток ПГ на фон медленного затухания ЭРГ накладывались небольшие колебания потенциала, как правило, отсутствующие в ЭРГ нативных глаз (рис. 25).

Спайковая активность зрительного нерва

В зрительном нерве нативного глаза включение света вызывал высокочастотный "on"-ответ спайковой активности, его отключение — относительно более слабый "off"-ответ. В зрительном нерве регенерировавшего глаза на включение света регистрировался "on"-ответ, уступающий



Рис. 27. Сагиттальный срез нативных (1, 3) и регенерировавших (2, 4) глаз улиток ПГ (а) и ВГ (б). Стрелками отмечены последовательно сверху-вниз пигментный слой сетчатки, стекловидное тело и хрусталик. Спустя три года после завершения КЭ.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

таковому нативного нерва. На отключение света "off"-ответ отсутствовал (рис. 26).

Структура глазного бокала

В регенерировавших глазах представлены все элементы, присущие этим образованиям. На препаратах различимы капсула, окружающая глазной бокал, роговица, сетчатка, стекловидное тело и хрусталик. Все регенераты имели значительно меньшие размеры по сравнению с нативными структурами (рис. 27).

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе КЭ выявлены несколько сценариев восстановления удаленного органа зрения - глазного щупальца улитки *Helix lucorum*: регенерация с функционирующим глазом; избыточность регенерации в виде появления двух глаз в регенерате; регенерация глазного щупальца без глаза; полное отсутствие регенерации. Регенерация ампутированных глазных щупалец в невесомости, в реальных условиях полугодового ОП, завершалась восстановлением органа зрения у 78% полетных улиток и 69% улиток синхронного сопровождения. Они отращивали новые структуры взамен утраченных, "рассчитывая" исключительно на свои внутренние ресурсы. Причинами отставания регенерации глазных щупалец этих улиток в сравнении со свободно живущими и кормящимися улитками (96%) могли быть исчерпание внутренних ресурсов и невозможность их восполнения из-за отсутствия корма. Ни в одном случае регенераты не стали копией удаленному органу. Они были короче и тоньше в сравнении с ампутированными и нативными глазными щупальцами. У большинства регенератов отсутствовал присущий нативным глазным шупальцам пигментированный кожный покров. Глазные пузыри, и особенно, глазные бокалы и их хрусталики, как правило, были заметно меньшего размера, тоньше был зрительный нерв. У трех улиток (по одной из каждой экспериментальной группы) глазное щупальце регенерировало с двумя глазными бокалами в глазном пузыре. Подобная аномалия довольно характерна для регенерировавших глазных щупалец наземной легочной улитки Achatina fuliса (Сидельников, 1991; Тартаковская, 2003). Глазные щупальца регенерировали при полной световой депривации, максимальном ограничении двигательной активности. отсутствии пиши и в состоянии спячки. Близкие результаты в лабораторных условиях были получены на морском моллюске Strombus luhuanus (Gillary, 1983) и Achatina fulica (Тартаковская, 2003). В регенерировавших глазах зрительная функция была сохранена в рабочем состоянии, но с определенными изъянами. На световые стимулы ЭРГ имела несколько большую латентность и небольшую пиковую амплитуду в сравнении с реакцией нативных глаз. и плато насышения было слвинуто в сторону меньших значений светового воздействия. Спайковая активность на свет в регенерировавшем зрительном нерве была слабее реакции нативного зрительного нерва. Кроме того, в регенерировавшем зрительном нерве отсутствовал "off"-ответ на отключение света. Таким образом, регенерировавший глаз из "двойной ретины" превратился в "одинарную ретину" и в результате отсутствия темновых фоторецепторов утратил "векторность кодирования яркости", что вместе со сдвигом плато насыщения влево не могло не отразиться на восприятии света в сторону его ухудшения. Исчезновение "off"-ответа в регенерировавших глазах после ампутации глазных щупалец было показано на Strombus luhuanus (Gillary, 1972, 1983). Слабая реакция регенерировавших глаз на свет очевидно связано с меньшим в сравнении с нативными глазами числом фотоэлементов в сетчатке регенерата (Flores, de Iraldi, 1973; Chase, Kamil, 1983; Тартаковская, 2003).

Невесомость повышает результативность восстановительного морфогенеза глазных щупалец. Она оказала стимулирующее влияние на регенерацию органа зрения у большего числа улиток в сравнении с улитками синхронного сопровождения при 1 g. Этот феномен впервые был обнаружен в 163-суточном ОП на МКС, в ходе которого ампутированные глазные щупальца регенерировали вместе с глазами у 69% улиток против 48% улиток синхронного сопровождения (Горгиладзе, 2011). С этими данными, полученными нами на беспозвоночном животном, созвучны исследования лаборатории проблем регенерации Института биологии РАН им. Кольцова на низших позвоночных — хвостатых амфибиях Pleurodeles waltl (тритон иглистый) и Triturus vulgaris (тритон обыкновенный). У этих животных, подвергнутых ампутации конечности и хвоста, а также удалению сетчатки и хрусталика глаза и экспонированных в ОП на автоматических беспилотных космических аппаратах "Космос", "Фотон" и "Бион" длительностью от 7 до 30 сут, был прослежен ход восстановления тканей. Согласно полученным результатам, невесомость "ускоряла" дедифференцировку клеток – источников регенерации, а также их пролиферацию и последующую дифференцировку регенерирующих структур (сетчатки, хрусталика и конечности), приводящую к образованию более развитых регенератов, чем в контроле при 1g". Симуляция микрогравитации клиностатированием показала аналогичные результаты (Grigoryan, Radugina, 2019). Повышенная центрифугированием доза гравитации, напротив, приводила к задержке и несовершенной регенерации (Grigoryan et al., 2017).

Таким образом, генетическая программа восстановительного морфогенеза на примере органа зрения улитки реализуется вне зависимости от гравитационного фактора среды. Вместе с тем этот процесс привязан к изменениям гравитационного поля: ускоряется при утрате веса и угнетается при его повышении. Орган зрения улитки глазное щупальце регенерирует, заметно уступая первоначальному образу. Несовершенная регенерация присуща не только органу зрения улитки, и примеров достаточно много (Короткова, 1997). Такой тип регенерации обозначен термином гипоморфоз, соответствующий ему регенерат — гипоморфотическим регенератом (Воронцова, 1949; Воронцова, Лиознер, 1957).

Автор выражает благодарность командиру ПКК "Союз ТМА-19М" № 719 летчику-космонавту Ю.И. Маленченко, сотрудникам РКК "Энергия" им. С.П. Королева и ФГБУ "НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина" за содействие при выполнении настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воронцова М.А. Регенерация органов у животных. М., 1949. 270 с.
- Воронцова М.А., Лиознер Л.Д. Бесполое размножение и регенерация. М., 1957. 416 с.
- Горгиладзе Г.И. Регенерационная способность у планарий и улиток, экспонированных в невесомости в орбитальном полете на Международной космической станции. Доклады акад. наук. 2008. Т. 421. № 1. С. 1–4.
- Горгиладзе Г.И. Регенерация органа зрения в 163-суточном орбитальном полете на Международной космической станции. Доклады акад. наук. 2011. Т. 440. № 4. М. 553–556.
- Горгиладзе Г.И., Короткова Е.В., Кузнецова Е.Е., Мухамедиева Л.Н., Бегров В.В., Пепеляев Ю.В. Аппаратура для проведения биологических экспериментов с улитками на пилотируемых орбитальных станциях. *Авиакосм. и экол. мед.* 2010. Т. 44. № 3. С. 61–64.
- Джавелидзе Г. Определитель наземных моллюсков Грузии. Тбилиси. Изд-во "Тбилисского Гос. ун-та". 1972. (На груз. яз.).
- Догель В.А. Зоология беспозвоночных. Под ред. Полянского Ю.И. 7-е изд. перераб. и доп. М. Изд-во "Высш. школа". 1981. 606 с.
- Зайцева О.В. Структурная организация сенсорных систем улитки. *Журн. высш. нервн. деят.* 1992. Т. 42. № 6. С. 1132–1149.
- Короткова Г.П. *Регенерация животных*. СПб. Изд-во "С.-Петербург. ун-та", 1997. 480 с.
- Сидельников А.П. Регенерация глазного шупальца у гигантской африканской улитки Achatina fulica. Известия РАН. Сер. биол. 1991. № 5. С. 716–725.
- Сидельников А.П. Регенерация глазного щупальца у улитки Achatina fulica и ее регуляция. *Автореф. дис. канд. биол. наук.* Санкт-Петербург. 1997. 16 с.
- Сидельников А.П. Влияние плотности популяции на рост и регенерационную способность улитки Ach-

atina fulica. Известия РАН. Сер. биол. 2000. № 5. С. 525–532.

- Тартаковская О.С. Влияние экологических факторов (плотность популяции, световой режим) и возраста на регенерацию периферического отдела зрительного аппарата брюхоногого моллюска Achatina fulica. Дис. канд. биол. наук. Калининград. 2003. 138 с.
- Черноризов А.М., Шехтер Е.Д., Аракелов Г.Г., Зимачев М.М. Зрение виноградной улитки: спектральная чувствительность темно-адаптированного глаза. Журн. высш. нерв. деят. 1992. Т. 42. Вып. 6. С. 1150–1155.
- Шехтер Е.Д., Греченко Т.Н. Два типа фоторецепторов в ахроматической зрительной системе виноградной улитки. Экспериментальная психология. 2009. Т. 2. № 2. С. 5–15.
- Шехтер М.С., Черноризов А.М., Гадельшина Д.Ф. Модульная организация механизмов ахроматического зрения: от человека к простым нервным системам. *Национальный психологический журнал.* 2010. № 2 (4). С. 92–99.
- Berg E., von, Schneider G. Langsame Belichtungspotentiale des Auges von Helix pomatias L. *Naturwissenschaften*. 1967. 54 Jahrgang. H. 22. S. 591–592.

- Chase R., Kamil R. Morphology and odor sensitivity of regenerated snail tentacles. J. Neurobiol. 1983. V. 14. № 1. P. 43–50.
- Chernorizov A.M., Shekhter E.D., Arakelov G.G., Zimachev M.M. The Vision of the Snail: The Spectral Sensitivity of the Dark- Adapted Eye. *Neurocsi. & Behav. Physiol.* 1994. V. 24. № 1. P. 59–62.
- Flores S.V., de Iraldi A. On the regeneration of the eye in Helix aspersa and Cryptomphallus aspersa. Z. Zellforsch. 1973. V. 142. P. 63–68.
- Gillary H.L. The regenerating eye of Strombus: anatomy and electrophysiology. *American zoologist.* 1972. V. 12. № 4. P. 691.
- Gillary H. Electrical potentials from the regenerating eye of Strombus. J. exp. biol. 1983. V. 107. P. 293–310.
- Grigoryan E.N., Dvorochkin N., Poplinskaya V.A., Yousuf R., Radugina E.A., Almeida E.A. The effect of hypergravity on the lens, cornea and tail regeneration in Urodela. *Acta Astronautica*. 2017. V. 138. P. 423–433.
- Grigoryan E.N., Radugina E.A. Behavior of stem-like cells, precursors for tissue regeneration in Urodela, under conditions of microgravity. *Stem Cells and Development*. 2019. V. 28. № 7. P. 1–15.

https://doi.org/10.1089/scd.2018.0220

Mattson P. Regeneration. Bobbs-Merrill comp. inc. Indianapolis. 1976.

Regeneration of the *Helix lucorum* visual body in a 185-day orbital flight et the International Space Station

G. I. Gorgiladze^{*a*,#}

^a Institute of Biomedical Problems RAS 123007 Moscow, Khoroshevskoe higyway, 76a, Russia [#]E-mail: gio119193@mail.ru

The article presents the results of the space experiment (SE) "Regeneration-1" on the gastropod ground pulmonary mollusk *Helix lucorum*. The 101 Snails were divided into three experimental groups: a flight group (FG) and two control groups – a synchronized escort group (SG) and a vivarium group (VG). Eye tentacles were amputated in all snails 10–11 hours before the onset of SE. The FG snails were transported to the International Space Station in a special lightproof container on the Soyuz TMA-19 manned spacecraft. The duration of the exposure in the orbital flight was 185 days and 22 hours. The SG snails were kept in a similar flight container at a temperature close to the onboard one. VG snails were kept in spacious terrariums under normal light conditions and temperatures of $20-22^{\circ}$ C, and had free access to food and water. The state of vision of native and regenerated eyes was assessed by morphological parameters, total electrical activity of the retina and spike activity of the optic nerve to single and paired light stimuli of different brightness and duration. After the completion of the experiment, regeneration of the eye tentacles with functioning eyes was observed in 75% of FG snails, 64% of SG snails and 94% of VG snails. The morphological and electrophysiological parameters of the regenerates of both flight and control snails were similar to each other and were noticeably inferior to the native eye tentacles during the 4-year period after the experiment was completed. Light deprivation did not affect the nature of the regeneration. In the regenerated optic nerve, there was no "off"– reaction to switching off the light stimulus.

Key words: mollusk, regeneration, vision, electroretinogram, weightlessness, International Space Station

REFERENCES

- Vorontsova M.A. *Regeneratsiya organov u zhivotnykh* [Regeneration of organs in animals]. M. 1949. 270 p. (in Russian).
- Vorontsova M.A., Liozner L.D. Bespoloye razmnozheniye i regeneratsiya [Asexual reproduction and regeneration]. M. 1957. 416 p. (in Russian).

- Chernorizov A.M., Shekhter E.D., Arakelov G.G., Zimachev M.M. Vision of the grape snail: spectral sensitivity of the dark-adapted eye. *Zurnal vusshei nervnoi deytelynosti* [Journal. higher. nerve. active]. 1992. V. 42. Issue 6. P. 1150–1155.
- Gorgiladze G.I. Regeneratsionnaya sposobnost' u planariy i ulitok, eksponirovannykh v nevesomosti v orbital'nom polete na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Re-

generative capacity in planarians and snails exposed to zero gravity in orbital flight on the International Space Station]. *Doklady akad. nauk.* 2008. V. 421. № 1. P. 1–4 (in Russian).

- Gorgiladze G.I. Regeneratsiya organa zreniya v 163-sutochnom orbital'nom polete na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Regeneration of the organ of vision in a 163-day orbital flight on the International Space Station]. *Doklady akad. nauk.* 2011. V. 440. № 4. P. 553–556 (in Russian).
- Gorgiladze G.I., Korotkova E.V., Kuznetsova E.E., Mukhamedieva L.N., Begrov V.V., Pepelyaev Yu.V. Apparatura dlya provedeniya biologicheskikh eksperimentov s ulitkami na pilotiruyemykh orbital'nykh stantsiyakh. [Equipment for biological experiments with snails at manned space stations]. *Aviakosm. i ekol. med.* [Aerospace and environ. Med.]. 2010. V. 44. № 3. P. 61–64 (in Russian).
- Grigoryan E.N., Dvorochkin N., Poplinskaya V.A., Yousuf R., Radugina E.A., Almeida E.A. The effect of hypergravity on the lens, cornea and tail regeneration in Urodela. *Acta Astronautica*. 2017. V. 138. P. 423–433.
- Grigoryan E.N., Radugina E.A. Behavior of stem-like cells, precursors for tissue regeneration in Urodela, under conditions of microgravity. *Stem Cells and Development*. 2019. V. 28. N 7. P. 1–15.
 - https://doi.org/10.1089/scd.2018.0220
- Dogel V.A. Zoologiya bespozvonochnykh. Pod red. Polyanskogo Y.U. I. 7-ye izd., pererab. i dop. M. Izd-vo "Vyssh. shkola". [Zoology of invertebrates]. Ed. Polyansky Yu.I. 7th ed., Revised. and add. M. Publishing house "Higher School". 1981. 606 p. (in Russian).
- Javelidze G. Identifier of Georgian terrestrial mollusks. Tbilisi. Publishing house of "Tbilisi University". 1972. (In Georgian).
- Korotkova G.P. *Regeneratsiya zhivotnykh*. SPb. Izd-vo "S.-Peterburg. un-ta", [Regeneration of animals]. SPb. Publishing house "St. Petersburg University", 1997. 480 p. (in Russian).
- Sidelnikov A.P. Regeneratsiya glaznogo shchupal'tsa u gigantskoy afrikanskoy ulitki Achatina fulica. [Regeneration of the eye tentacle in the giant African snail Achatina fulica]. *Izv. RAN. Ser. biol.* [Izv. RAS. Ser. biol.]. 1991. № 5. P. 716–725 (in Russian).

- Sidelnikov A.P. Regeneratsiya glaznogo shchupal'tsa u ulitki Achatina fulica i yeye regulyatsiya. Avtoref. dis. kand. biol. nauk. Sankt-Peterburg. [Regeneration of the optic tentacle in the snail Achatina fulica and its regulation]. [*Abstract of the thesis. dis. cand. biol. sciences*]. St. Petersburg. 1997. (in Russian).
- Sidelnikov A.P. Vliyaniye plotnosti populyatsii na rost i regeneratsionnuyu sposobnost' ulitki Achatina fulica. [Influence of population density on the growth and regeneration capacity of the snail Achatina fulica]. *Izv. AN. Ser. biol.* 2000. № 5. P. 525–532 (in Russian).
- Tartakovskaya O.S. Vliyaniye ekologicheskikh faktorov (plotnosť populyatsii, svetovoy rezhim) i vozrasta na regeneratsiyu perifericheskogo otdela zriteľ nogo apparata bryukhonogogo mollyuska Achatina fulica. *Dis. kand. biol. nauk.* Kaliningrad. 2003. 138 p.
- Shekhter Ye.D., Grechenko T.N. Dva tipa fotoretseptorov v akhromaticheskoy zritel'noy sisteme vinogradnoy ulitki. Eksperimental'naya psikhologiya. 2009. V. 2. № 2. P. 5–15 (in Russian).
- Shekhter M.S., Chernorizov A.M., Gadel'shina D.F. Modul'naya organizatsiya mekhanizmov akhromaticheskogo zreniya: ot cheloveka k prostym nervnym sistemam. *Natsional'nyy psikhologicheskiy zhurnal*. 2010. № 2 (4). S. 92–99.
- Zaitseva O.V. Strukturnaya organizatsiya sensornykh sistem ulitki [Structural organization of snail sensory systems] *Zhurn. vyssh. nervn. deyat.* [J. higher. nervous active]. 1992. V. 42. № 6. P. 1132–1149 (in Russian).
- Berg E., von Schneider G. Langsame Belichtungspotentiale des Auges von Helix pomatias L. Naturwissenschaften. 1967. 54 Jahrgang. H. 22. S. 591–592.
- Chase R., Kamil R. Morphology and odor sensitivity of regenerated snail tentacles. J. Neurobiol. 1983. V. 14. № 1. P. 43–50.
- Flores S.V., de Iraldi A. On the regeneration of the eye in Helix aspersa and Cryptomphallus aspersa. Z. Zellforsch. 1973. V. 142. P. 63–68.
- Gillary H.L. The regenerating eye of Strombus: anatomy and electrophysiology. *American zoologist*. 1972. V. 12. № 4. P. 691.
- Gillary H. Electrical potentials from the regenerating eye of Strombus. J. Exp. Biol. 1983. V. 107. P. 293–310.
- Mattson P. Regeneration. Bobbs-Merrill comp. inc. Indianapolis. 1976.

УДК 535.646.1

МУЛЬТИПЛИКАТИВНО ЗАМКНУТЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА

© 2022 г. Д. П. Николаев^{1,*}, И. А. Коноваленко¹, П. П. Николаев¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН 127051 Москва, Большой Каретный переулок, 19, Россия *E-mail: dimonstr@iitp.ru Поступила в редакцию 11.01.2022 г.

После доработки 25.01.2022 г. Принята к публикации 08.02.2022 г.

Работа посвяшена методам и инструментам решения проблем цветовосприятия, реализующих в акте зрения объективное описание наблюдаемого. В статье рассмотрен ряд содержательных примеров задания малопараметрических спектральных описаний, обеспечивающих формальную связь пространств излучений и реакций сенсора. Эти структуры называются спектральными моделями. Описаны и объяснены на конкретных примерах (с анализом достоинств и недостатков) их принципиальные разновидности и внутритиповые модификации. Приведены с соответствующими мотивировками ограничения на физоптические характеристики сцены, регистрируемой сенсором, и варианты аппроксимации спектральных описаний ее элементов, обеспечивающие разрешимость упрощаемой таким образом обратной задачи, в общем случае не имеющей решения. В контексте требований к спектральным моделям рассмотрены проблемы, возникающие при моделировании феноменов цветовой константности, а также при постановках задачи калибровки камер. Обсуждены преимущества использования гауссовской спектральной модели (как нелинейной и мультипликативно замкнутой) в ее сопоставлении с оптимальными линейными моделями, а также описаны три ее модификации, расширяющие цветовой охват, в исходном варианте не воспроизводящей цветов пурпурного сегмента. На языке гауссовской модели – с переходом к оптимизирующим свойствам фонмизесовской модели – описан и показан итогом численных экспериментов (с привлечением "реальных" спектральных данных) метод оценки цветности источника по цветовой картине внутренних переотражений (интеррефлексов) в наборе разноокрашенных складчатых образцов. Текст сочетает анализ теоретических положений с обсуждением результатов компьютерного моделирования и физического эксперимента.

Ключевые слова: спектральные модели, гауссовская спектральная модель, фонмизесовская спектральная модель, мультипликативная замкнутость, цветовой анализ, цветовой охват, цветоконстантность, цветовая калибровка камер, переотражения в складках

DOI: 10.31857/S0235009222020056

введение

В предлагаемой статье авторы поставили для себя цель изложить (вместе с кратким историческим экскурсом) эволюцию подходов к решению одной из основных проблем восприятия наблюдаемого мира — проблемы спектрального описания цветных объектов. На протяжении последних десятилетий исследователями феноменов цветовосприятия и разработчиками систем зрительного распознавания были предприняты значительные усилия, чтобы выяснить, как (и насколько хорошо) спектры излучений и характеристики окраски могут быть восстановлены по трем компонентам цветового сигнала, регистрируемого цветовым сенсором, включая зрительную систему человека. Проблема спектрального описания цветных объектов реального мира была исходно связана с проблемой цветоконстантности (ЦК). Явление ЦК, как способность зрительной системы человека и животных оценивать отражательные свойства поверхностей (их окраску) в условиях меняющейся цветности освещения наблюдаемой сцены, достаточно подробно изучено и описано, но в плане его формализации, как практической задачи зрительной объектной интерпретации, проблема ЦК не решена ввиду того, что является в общем случае некорректной обратной задачей (в силу неизбежного оптического и спектрального вырождения предмета анализа — картины, полученной сенсором).

Для того чтобы задача построения вычислительной схемы ЦК стала реализуемой, требуется введение тех или иных априорных ограничений на оптические свойства среды, в которой функционирует сенсорная система, при этом язык описания спектральных свойств тел и первичных источников освещения необходимо согласовать с их "цветовой" размерностью, что предполагает введение малопараметрических приближений в описании всех спектральных функций, фигурирующих в акте цветовосприятия. Именно они (целенаправленно вводимые ограничения и аппроксимации) делают задачу разрешимой, позволяя построить математическую модель ЦК (Brill, West, 1986; Maloney, Wandell, 19866; Nikolaev, 1989; Macleod, Golz, 2003; Nikolaev , Nikolaev, 2005; Николаев 2007a; Logvinenko, 2013).

Следует заметить, что вопрос аппроксимации спектральных характеристик возникает и в существенно более широком классе задач обработки цветных изображений. Варианты таких аппроксимаций, позволяющие с допустимыми погрешностями связывать спектральные характеристики тел, излучателей и сенсоров на языке трехпараметрических описаний, получили в цветовой теории название "спектральные модели".

Алгоритмы обработки изображений в биоинформатике, как правило, создают для трихроматических систем, что диктуется размерностью цветового пространства человека-трихромата. При этом надо понимать, что для решения технических задач, когда отсутствует необходимость в ограничениях на размерность цветового пространства специализированного сенсора, уже "не обязанного" следовать законам трихроматичности человеческого цветовосприятия, могут привлекаться многопараметричекие спектральные аппроксимации, при помощи которых описания функций процесса становятся существенно более реалистичными. Это направление, не связанное с визуализацией результатов обработки изображений для человека-трихромата, заслуживает отдельного рассмотрения, здесь же основные продвижения в совершенствовании спектральных моделей обсуждаются в рамках трехканальных систем, поскольку именно они в состоянии обеспечить высокое качество цветовоспроизведения на экранах мониторов и мобильных телефонов, а также и реалистичную цветопередачу печатных иллюстраций.

Как в отечественной, так и зарубежной литературе не имеется обзорных работ, в которых рассматриваются общие принципы построения спектральных моделей, пригодных для использования в алгоритмах технического зрения, и проводится их сравнительный анализ. Как правило, такого рода материал обсуждается в связи с конкретными задачами цветового зрения (Brill, West, 1986; Nikolaev et al., 2006; Mizokami, Webster, 2012). Вместе с тем в последнее время появляются публикации с описанием новых семейств спектральных моделей, которые предлагаются в качестве более адекватных гипотез о малопараметрической репрезентации спектральных стимулов. В связи с расширением списка подобных предложений, цель настоящей статьи — представить по возможности детализированный анализ различных вариантов спектральных моделей, включая те, которые предложены самими авторами, и провести их сравнение друг с другом по точности работы и оценкам полноты цветового охвата (границ цветовоспроизведения).

Статья структурирована следующим образом. В первом разделе описываются задачи цветового анализа, формально неразрешимые в общем случае, а именно: некоторые проблемы цветовой константности и аналитические задачи оптимальной калибровки сенсора. На материале этих (столь различных по своим целям) постановок демонстрируется необходимость введения спектральных моделей. Показывается, что с их помощью задачу оценки спектра отражения окрашенных тел - по наблюдаемому их цвету и известной цветности доминирующего источника освещения, как и задачу цветовой калибровки сенсора, удается сделать корректными. Далее рассматриваются различные типы спектральных моделей, как классических, так и относительно новых. Кратко изложена история создания самых старых и наиболее исследованных линейных спектральных моделей (ЛСМ), приведено несколько наиболее интересных их вариантов и обсуждены причины недостаточно точной работы схем с ЛСМ. В качестве альтернативы подходу с ЛСМ описаны варианты нелинейной гауссовской спектральной модели (ГСМ). На теоретическом уровне рассмотрены достоинства ГСМ (относительно принципиальных возможностей семейства ЛСМ) и проведено сравнение трех ее версий (сопоставление в границах ГСМ) по цветовому охвату в пурпурной области, критичной для всех видов спектральных моделей.

Во втором разделе статьи произведен анализ точности спектральных моделей при использовании в конкретных задачах цветного зрения: в оценке наблюдаемого спектра по его цвету (т.е. в задаче перехода из цветового пространства в спектральное); в оценке спектра отражения по наблюдаемому цвету при известной цветности источника (т.е. в задаче "поправки на спектр освещения"). Представляется, что для первой задачи ГСМ оказывается не менее удобной, чем ЛСМ, а для второй – ГСМ и удобнее и точнее, чем лучшие трехпараметрические ЛСМ.

В третьем разделе формально вводится понятие семейства мультипликативно замкнутых спектральных моделей (M3CM), в качестве замкнутых относительно операции умножения. Рассматривается его представитель — фонмизесовская спектральная модель (ФСМ). Обсуждаются свойства ФСМ на примере задачи оценки цветности источника по картине изменений цветовых характеристик излучения, регистрируемого в складке/лунке окрашенной поверхности. Показывается, что ФСМ имеет лучшую среди прочих M3CM цветопередачу и охват в пространстве тристимулов, а оценка цветности источника в приближении учета интеррефлексов в вогнутостях объектов — выполняется с хорошей точностью в практических реализациях.

1. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ МОДЕЛИ И ИХ РОЛЬ В ЦВЕТОВОМ АНАЛИЗЕ

Задача цветовой константности состоит в оценивании свойств окраски тел, регистрируемых сенсором (глазом наблюдателя либо камерой цветораспознающей системы), но как проверить, что цель достигнута и оценки адекватны свойствам объектов сцены? Можно считать, что свойства окраски наблюдаемых тел известны некой системе цветового анализа, если для любого освещения она может предсказать цвет объекта, регистрируемого ее сенсором. Пусть сенсор линеен и функции его спектральной чувствительности $\mathbf{X}(\lambda)$ известны. Положим также, что источник света простой и известен относительный спектральный состав $S(\lambda)$ испускаемого им света; и, наконец, пусть объект имеет унихроматическую окраску и в сцене, его содержащей, нет переотражений (что выполняется для плоских ее участков). В такой максимально простой сцене пространственное распределение c(x, y) цвета объекта будет подчиняться следующему соотношению:

$$\mathbf{c}(x,y) = \mathbf{g}(x,y) \int_{0}^{\infty} \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{R}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda, \qquad (1)$$

где $R(\lambda)$ – единственная спектральная компонента унихроматической окраски объекта. Рассматривая семейство источников монохроматического излучения ($S(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_0)$), легко убедиться, что для решения поставленной задачи необходимо знать $R(\lambda)$ всюду, где $X(\lambda) \neq 0$, т.е. при таком понимании задачи цветовой константности мы должны построить оценку $R(\lambda)$ по известному изображению объекта.

Цвет изображения объекта является функцией не только параметров окраски объекта, но и параметров его освещения. Разумно считать, что параметры освещения существенно менее вариабельны в пределах одного изображения, чем параметры окрасок. Поэтому подавляющее большинство методов цветовой константности включают оценку параметров освещения как ключевую подзадачу (Gijsenij et al., 2011). Предположим,

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

что эта задача тем или иным образом решена. Пусть известен цвет \mathbf{c}_{s} источника, определяемый следующим образом:

$$\mathbf{c}_{s} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda.$$
 (2)

Пусть нам также известен цвет **c**_{sr} окраски под этим освещением, определяемый как

$$\mathbf{c}_{\rm sr} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{R}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda. \tag{3}$$

Для полного решения задачи цветовой константности требуется оценить $R(\lambda)$ при известном $X(\lambda)$. Очевидно, что поставленная задача неразрешима без дополнительных априорных ограничений, даже несмотря на вынесение за скобки проблемы верного оценивания параметров освещения.

Рассмотрим теперь другой вопрос, связанный с проблемой цветовой калибровки сенсора для реализации точной цветопередачи. Пусть нам известна реакция с технического сенсора с чувствительностями $X(\lambda)$ на освещенность $F(\lambda)$, создаваемую некоторой точкой сцены

$$\mathbf{c} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{F}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda.$$
 (4)

В линейной модели реакция $\mathbf{c}_{\mathbf{x}}$ человека (стандартного наблюдателя) на тот же стимул записывается аналогично

$$\mathbf{c}_{\mathbf{x}} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{F}(\lambda) \mathbf{X}_{\mathbf{x}}(\lambda) d\lambda.$$
 (5)

Как определить c_x , зная c? Этот вопрос, строго говоря, выходит за рамки проблематики цветовой константности, но при этом весьма актуален в широком круге задач технического зрения, — в последние годы по теме цветовой калибровки опубликованы десятки статей (Bianco et al., 2013; Vazquez-Corral et al., 2014; Finlayson et al., 2015; Can Karaimer, Brown, 2018; Kordecki, 2019).

Нетрудно показать, что задача цветовой калибровки имеет решение, если выполнено так называемое условие Максвелла–Лютера–Айвза: $\mathbf{X}_{\mathbf{x}}(\lambda) = M\mathbf{X}(\lambda)$, где M – матрица линейного преобразования. В таком случае верно следующее простое выражение: $\mathbf{c}_{\mathbf{x}} = M\mathbf{c}$. Если же условие не выполнено, то между цветами сенсоров нет однозначного соответствия, поскольку в этом случае существуют такие $F(\lambda)$, для которых **c** совпадают, а $\mathbf{c}_{\mathbf{x}}$ – нет. Задачу цветовой калибровки в таком случае приходится решать приближенно.

Проблему калибровки можно переформулировать следующим образом: требуется решить



Рис. 1. Примеры реальных спектров a – освещения, δ – отражения из базы Кринова (Krinov, 1953).

уравнение (4) относительно $F(\lambda)$. После этого c_x находится подстановкой в (5). Удается показать, что любая калибровка, выражаемая однозначным отображением из {**c**} в {**c**_x}, может быть переформулирована указанным образом.

В обоих рассмотренных случаях ставится задача оценки спектра по его цвету. Потребовались серьезные теоретические усилия и объемные экспериментально вычислительные проверки, чтобы выяснить, каким образом – и насколько хорошо – спектры излучений и компонент окраски могут быть восстановлены по трем координатам цветового сигнала, регистрируемого цветовым сенсором. Если бы спектры освещения и окрасок варьировались случайным и произвольным образом, тогда поставленная задача вряд ли была разрешима. Оказалось, что спектры компонент окрасок природных материалов, как правило, не имеют большого числа резких перепадов в видимой области (рис. 1), что создает предпосылки их описания функциями с небольшим числом параметров. При постулировании принадлежности спектральных функций (участвующих в акте зрения) достаточно "хорошему" трехпараметрическому семейству сформулированная выше задача оказывается разрешимой в общем случае. Варианты таких (как правило, но не обязательно трехпараметрических) семейств получили в цветовой теории название "спектральные модели".

До последнего времени большинство исследователей, занимающихся проблемами цветного зрения и цветовой константности, для их разрешения привлекали так называемые линейные спектральные модели (ЛСМ) (Yilmaz, 1962; Brill, 1978; Maloney, 1986a, Marimont, Wandell, 1992). В ЛСМ пространство спектральных функций ограничивается некоторым линейным подпространством:

$$\mathbf{M}_{\mathbf{B}}^{\pm}(\lambda,\mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{p} \cdot \mathbf{B}(\lambda), \qquad (6)$$

где **р** — вектор параметров спектральной модели, а ее базис **B**(λ) заранее фиксирован.

При dim p = 3 задача цветовой калибровки сенсора становится разрешимой в общем случае, причем решение линейно, аналогично случаю с выполненным условием Максвелла—Лютера— Айвза. Довольно очевидно, что решение, использующее ЛСМ, при выполнении этого условия даст верный ответ. Во всех прочих случаях точность ответа будет зависеть от того, насколько хорошо та или иная ЛСМ описывает реальное (для среды функционирования) распределение спектральных функций.

Кратко изложим историю создания ЛСМ и отметим несколько наиболее интересных ее вариантов. Илмаз первым в 1962 г. применил разложение в усеченный ряд Фурье для моделирования источников света и отражательной способности объектов. Салстром, по-видимому, первым сформулировал проблему оценивания спектральных функций в терминах разложений с использованием произвольных базисных функций (Sällström, 1973). В работах Брилла (Brill, 1978; 1979), Боксбаума (Buchsbaum, 1980), Мейлони (Malonev. 1986а), а также Мейлони и Вандела (Malonev. Wandell, 1986б) представление о базисных спектральных функциях было использовано для теоретического описания цветоконстантного трихроматического светочувствительного устройства (как модели цветовой константности человеческого восприятия). Именно Мейлони и Вандел назвали разложения спектров по базисным функциям линейными спектральными моделями.

В ряду известных линейных моделей следует отметить несколько наиболее интересных. В зональной спектральной модели (3CM) M_Z^{\pm} базисом являются функции-ступеньки:

$$\mathbf{M}_{Z}^{\pm}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{p} \cdot \mathbf{B}^{Z}(\lambda),$$
$$\mathbf{B}_{i}^{Z}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} [\lambda \in \Lambda_{i}], \quad i \neq j \Rightarrow \Lambda_{i} \cap \Lambda_{j} = \emptyset, \quad (7)$$
$$1 \le i, j \le 3,$$

где [•] — скобка Айверсона. В ЗСМ Λ_i — базисные множества длин волн — как правило, выбираются в виде конкатенирующихся диапазонов. ЗСМ, по-видимому, была впервые предложена Айвзом в 1912 г. (Ives, 1912; Brill, 1995), а полувеком позже переизобретена независимо Стайлзом, Лэндом и П.П. Николаевым и соавт. (Stiles, Wyszecki, 1962; Land, McCann, 1971; Нюберг и др., 1971б). Модель

Илмаза (Yilmaz, 1962) M_Y^{\pm} использует гармонический базис

$$M_{Y}^{\pm}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{p} \cdot \mathbf{B}^{Y}(\lambda),$$

$$\begin{cases} B_{1}^{Y}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} 1 \\ B_{2}^{Y}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \sin \phi, \quad \phi \stackrel{\text{def}}{=} 2\pi \frac{\lambda - \lambda_{V}}{\lambda_{R} - \lambda_{V}}, \\ B_{3}^{Y}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \cos \phi \end{cases}$$
(8)

где $[\lambda_V; \lambda_R]$ — видимый диапазон длин волн. В модели Ли (Lee et al., 1995) M_L^{\pm} в качестве базисных выступают функции чувствительности сенсора

$$\mathbf{M}_{\mathrm{L}}^{\pm}(\lambda,\mathbf{p}) \stackrel{\mathrm{def}}{=} \mathbf{p} \cdot \mathbf{B}^{\mathrm{L}}(\lambda), \quad \mathbf{B}^{\mathrm{L}}(\lambda) \stackrel{\mathrm{def}}{=} \mathbf{X}(\lambda).$$
(9)

Коэн был, вероятно, первым, кто построил линейную модель не аналитически, а численно — по набору доступных реальных спектральных данных (Cohen, 1964). Методом главных компонент он вычислил трехпараметрическую модель для спектров отражения 150 образцов цветового атласа Манселла, оцифрованных с шагом 10 нм, и показал, что она объясняет 99.18% их вариации.

Здесь следует заметить, что ценность спектральной модели для решения задач цветового анализа существенно зависит от ее размерности. В классическую обработку цветных цифровых изображений вовлекается три цветовых канала, в согласии с трихроматическим устройством зрительной системы человека. В таких конвейерах обработки изображений наибольшую ценность имеют модели с dim $\mathbf{p} \leq 3$ (хотя для автоматических цветовых систем опознания, где в участии человека-эксперта нет необходимости, подобное

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

ограничение размерности может стать препятствием их эффективности). По этой причине работа Коэна вызвала большой резонанс в профессиональном сообществе.

Впоследствии его данные были перепроверены несколькими авторами, увеличившими размер выборки (Maloney, Wandell, 1986б), уменьшившими шаг дискретизации (Parkkinen et al., 1989) и расширившими набор спектров за счет других атласов цветов (Vrhel et al., 1994). Их вывод оказался иным: число параметров линейной модели, обеспечивающее приемлемую точность аппроксимации расширенного набора атласов, составляет не три, а пять-семь, в зависимости от варианта постановки (Maloney, 1999).

Здесь следует отметить, что во всех упомянутых работах ставился вопрос о точности аппроксимации в спектральном пространстве. Очевидно, что если бы малопараметрическая спектральная модель была достаточно точной в этом смысле, то ее можно было бы использовать в алгоритмах цветовой константности; обратное же неверно. Приведем пример: если малопараметрическая модель обеспечивает большую ошибку аппроксимации в спектральном пространстве, но эта ошибка сосредоточена на краях видимого диапазона, то в цветовом пространстве подобная ошибка практически не окажет влияния ввиду низкой чувствительности сенсора в этих областях. Таким образом, вопрос практической адекватности трехпараметрических линейных моделей остается открытым.

Одним из главных недостатков трехпараметрических ЛСМ является принципиальная невозможность моделировать с приемлемой точностью спектры насыщенных цветов более чем трех цветовых тонов спектрального локуса стандартного наблюдателя. Это связано с тем, что цвета предельной насыщенности, лежащие на спектральном локусе, порождаются исключительно монохроматическими излучениями (и их парными комбинациями), каковые линейно независимы. В том числе по этой причине некоторые исследователи начали предлагать и изучать обстоятельства приемлемости и преимущества нелинейных спектральных моделей.

Наиболее известной среди них является гауссовская спектральная модель (ГСМ):

$$\mathbf{M}_{\mathrm{G}}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\mathrm{def}}{=} p_{1} \exp\left(-\frac{(\lambda - p_{3})^{2}}{2p_{2}^{2}}\right).$$
(10)

Гауссианы в качестве альтернативы линейным моделям были предложены, по-видимому, независимо Вайнбергом (Weinberg, 1976), П.П. Николаевым (Николаев, 1985), а также МакЛеодом и Гольцем (Macleod, Golz, 2003). При $p_2 \rightarrow 0$ излучения со спектрами $M_G(\lambda, \mathbf{p})$ приближаются к мо-



Рис. 2. Примеры представителей гауссовской спектральной модели $M_G(\lambda, \mathbf{p})$, отличающиеся только параметром p_1 *a* – спектральные функции на фоне базиса X_x стандартного наблюдателя, δ – их цветность в этом базисе.

нохроматическим с произвольной длиной волны, задаваемой p_3 , что недостижимо для ЛСМ. Кроме того, ГСМ обеспечивает наглядную связь между параметрами модели и естественными характеристиками цвета. Параметры p_1 , $1/p_2$ и p_3 довольно хорошо характеризуют соответственно яркость, насыщенность и цветовой тон цветового отклика стандартного наблюдателя на гауссовский стимул (Николаев, 1985).

На рис. 2 изображена серия представителей модели $M_G(\lambda, \mathbf{p})$, отличающихся только параметром p_1 ("параметром яркости"), значения которого пробегают отрезок [0.05; 0.95] с шагом 0, 1. Остальные параметры неизменны: $p_2 = 55$,



Рис. 3. Примеры представителей гауссовской спектральной модели $M_G(\lambda, \mathbf{p})$, отличающиеся только параметром p_2 a – спектральные функции на фоне базиса $\mathbf{X}_{\mathbf{x}}$ стандартного наблюдателя, δ – их цветность в этом базисе.

 $p_3 = 510$. Цветности излучений с такими спектрами совпадают.

На фрагменте б рис. 2 звездочкой отмечен их образ на стандартной диаграмме цветности. Крестиком отмечена нейтральная (серая) точка.

На рис. 3 изображена серия представителей той же модели, отличающихся параметром p_2

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 Nº 2 2022

("параметром обратной насыщенности"), значения которого пробегают отрезок [5; 95] с шагом 10.

Остальные параметры фиксированы: $p_1 = 0, 5$, $p_3 = 510$. На фрагменте б звездочками отмечены образы спектров серии на стандартной диаграмме цветности. По мере роста p_2 насыщенность цвета падает, а цветность спектра приближается к ней-



Рис. 4. Примеры представителей гауссовской спектральной модели $M_G(\lambda, \mathbf{p})$, отличающиеся только параметром p_3 *a* – спектральные функции на фоне базиса $\mathbf{X}_{\mathbf{x}}$ стандартного наблюдателя, δ – их цветность в этом базисе.

тральной точке (при этом изменение уменьшается с каждым шагом). Цветовой тон при этом изменяется незначительно: последовательность точек не сильно уклоняется от луча с началом в нейтральной точке.

На рис. 4 представлена заключительная серия спектров ГСМ. В этом случае параметр p_3 ("пара-

метр тона") принимает значения из отрезка [460; 640] с шагом 20. Оставшиеся параметры имеют следующие значения: $p_1 = 0, 5, p_2 = 5$.

На фрагменте б звездочками отмечены образы спектров серии на стандартной диаграмме цветности. Видно, что цветности спектров близки к



Рис. 5. Хроматические диаграммы цветового тела базовой ГСМ в стандартной (CIE xyY) и равномерной (proLab) системах цветовых координат. Цветами показан цветовой охват sRGB, серый фон соответствует остальным цветам цветового конуса. Черным контуром ограничен цветовой охват всевозможных спектров из M_G.

максимально насыщенным и покрывают практически весь спектральный локус.

Итак, одним из достоинств ГСМ является то, что модель адекватно аппроксимирует узкополосные спектры, тогда как никакая ЛСМ таким свойством не обладает. Но возможность аппроксимации сколь угодно узкополосных спектров еще не обеспечивает описание всевозможных цветов предельной насыщенности. Действительно, насыщенно пурпурные цвета могут быть реакцией только на излучения с мультимодальным спектральным распределением, т.е. никакой гауссовский спектр не моделирует излучение пурпурного цвета. На рис. 5 в различных цветовых координатах изображен цветовой охват модели M_G .

По диаграмме в равномерных цветовых координатах proLab (Konovalenko et al., 2021) можно судить, что значительная доля площади цветового треугольника недостижима для базовой ГСМ.

Для преодоления этого недостатка исследователи, включая авторов ГСМ, предложили несколько модификаций базовой модели. Так, Вейнберг (Weinberg, 1976), Николаевы (Николаев, Николаев, 1997), а также МакЛеод и Гольц (Macleod, Golz, 2003) предложили использовать выражение, являющееся в зависимости от знака *p*₂ члена либо гауссианой, либо обратной к ней функцией. Предложенную ими модель можно параметризовать, например, так

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

$$\mathbf{M}_{\mathrm{G}*}\left(\lambda,\mathbf{p}\right) \stackrel{\mathrm{def}}{=} p_{1} + \exp\left(-p_{2}\left(\lambda-p_{3}\right)^{2}\right). \tag{11}$$

П.П. Николаев (Николаев, 2007б), а также Мизоками и Вебстер (Мізокаті, Webster, 2012) предложили также "субтрактивную" модель $M_{G^{\uparrow}}$, в которую помимо гауссовских спектров $M_G(\lambda, \mathbf{p})$ входят спектры вида $p_1 - M_G(\lambda, \mathbf{p})$:

$$\mathbf{M}_{G^{\uparrow}}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} [p_2 < 0] p_1 + (2[p_2 \ge 0] - 1) p_1 \exp(-|p_2|(\lambda - p_3)^2),$$
(12)

где $[\bullet]$ — скобка Айверсона. В отличие от модели M_{G*} , эта модель позволяет производить репрезентацию пурпурных окрасок, не выводя значение коэффициента отражения за пределы физически осмысленного диапазона [0; 1]. Логвиненко предложил другой подход для описания гауссоподобными функциями спектров, в том числе пурпурных окрасок, обладающий тем же свойством физической их адекватности. Он ввел периодическую функцию, повторяющую центральный фрагмент гауссианы (Logvinenko, 2013):

$$\mathbf{M}_{G^{\circ}}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} = p_{1} \exp\left(-p_{2}\left(\left(\lambda - p_{3} + \Delta_{\lambda}/2\right) mod\Delta_{\lambda} - \Delta_{\lambda}/2\right)^{2}\right),$$
(13)



Рис. 6. Представители трех расширений ГСМ, использующихся для моделирования пурпурных цветов a – спектральные функции на фоне базиса X_x стандартного наблюдателя, δ – их цветность в этом базисе. Звездами обозначена модель M_{G*} , ромбами – $M_{G^{\uparrow}_{\circ}}$, кружками – $M_{G^{\circ}_{\circ}}$.

где Δ_{λ} — ширина видимого диапазона длин волн, а операция *mod* определена для вещественных аргументов следующим образом: *a modb* = $a - \lfloor a/b \rfloor b$.

На рис. 6 приведены представители всех трех упомянутых выше расширений ГСМ (M_{G*} , $M_{G\uparrow}$, и $M_{G\circ}$), соответствующие практически неразличимым между собой оттенкам пурпурного цвета.

Вектора их параметров при этом равны
$$\begin{bmatrix} 0.15 - \frac{1}{95^2} 520 \end{bmatrix}^T$$
, $\begin{bmatrix} 0.6 - \frac{1}{70^2} 510 \end{bmatrix}^T$ и $\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{120^2} 715 \end{bmatrix}^T$ соответственно.

Мизоками и Вебстер исследовали вопрос, является ли в сравнении с ЛСМ расширенная субтрактивная ГСМ $M_{G\uparrow}$ достаточно хорошей аппроксимацией спектров отражения природных

٢

объектов (Mizokami, Webster, 2012). Для этого использовались распределения коэффициента отражения большого числа натуральных объектов, опубликованных к тому моменту в открытых базах данных. Количество достаточно точных гауссовских аппроксимаций оказалось сопоставимо с числом таковых в линейных моделях: в среднем на них приходилось 56% несоответствий по сравнению с 60% для протестированных линейных моделей. Значимым классом "плохих" для ГСМ оказались, что было довольно очевидно изначально, спектры с мультимодальным распределением.

В 2014 г. Мирзай и Фант сравнили цветовой охват всех трех обсуждаемых обобщений гауссиан на плоскости цветности стандартного наблюдателя (для излучений) и в цветовом теле стандартного источника света СІЕ D65 (для окрасок) (Мігzaei, Funt, 2014) и пришли к выводу, что наибольший охват демонстрируют "периодизованные" гауссианы M_{G°}. Кроме того, авторы заявили, что впервые предложили метод предсказания цвета неизвестной окраски под одним известным освещением по цвету, наблюдаемому под другим источником, основанный на гауссовской оценке окраски. Их исследование показало, что использование гауссовской модели в варианте М_G, для спектров отражения $R(\lambda)$ при решении уравнения (3) дает в среднем более точные оценки, чем использование предложенных ранее линейных метолов.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАУССОВСКОЙ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА

Подход, в котором ценность спектральной модели определяется ее точностью при использовании в конкретных задачах цветового анализа, представляется, как минимум, разумным дополнением к теоретическим оценкам цветового охвата (в качестве репрезентативной оценки качества модели).

Рассмотрим общую часть рассмотренных в разд. 1 задач цветового анализа — оценить спектр $F(\lambda)$ наблюдаемого излучения по его цвету **c**:

$$\int_{0}^{\infty} F(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda = \mathbf{c}, \qquad (14)$$

где чувствительности $X(\lambda)$ считаются известными. Для ЛСМ эта задача имеет тривиальное аналитическое решение почти для всех базисов **B**(λ):

$$F(\lambda) = \mathbf{p} \cdot \mathbf{B}(\lambda), \quad \mathbf{p} = A_{\mathbf{B}\mathbf{X}}^{-1}\mathbf{c},$$

$$A_{\mathbf{B}\mathbf{X}} \stackrel{\text{def}}{=} \int_{0}^{\infty} \mathbf{B}^{T}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda.$$
(15)

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

Для $F \in \{M_{G*}\}$ аналитическое решение этой задачи в общем случае неизвестно. Построим приближенное решение и оценим его точность. Рассмотрим линейный сенсор со следующими функциями чувствительности:

$$X_{Gi}(\lambda, \sigma, \mu) \stackrel{\text{def}}{=} M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_i), \quad p_{i1} = 1, \quad (16)$$
$$p_{i2} = \sigma > 0, \quad p_{i3} = \mu_i.$$

Будем называть его равноселективным гауссовским сенсором. Для такого сенсора задача определения параметров спектра из M_{G*} по реакциям на него имеет аналитическое решение. Пусть известен цвет с гауссовского спектра, регистрируемого равноселективным гауссовским сенсором

$$\mathbf{c} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{M}_{G*} \left(\lambda, \begin{bmatrix} l & s & h \end{bmatrix}^{T} \right) \mathbf{X}_{\mathbf{G}}(\lambda, \sigma, \mu) d\lambda, \qquad (17)$$

тогда параметры $\{l, s, h\}$ этого спектра можно найти следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{1}{s} = \frac{\sum_{i=1}^{3} \mu_{i} \mu_{(i+1)mod3}(\mu_{i} - \mu_{(i+1)mod3})}{(\mu_{1} - \mu_{2}) \ln\left(\frac{c_{3}}{c_{2}}\right) + (\mu_{2} - \mu_{3}) \ln\left(\frac{c_{1}}{c_{2}}\right)} - \frac{1}{\sigma} \\ h = \frac{(c_{1} - c_{2})(s + \sigma) + 2\mu_{1} + 2\mu_{2}}{2s\sigma(\mu_{1} - \mu_{2})} \\ l = \frac{\sqrt{s + \sigma} \sum_{i=1}^{3} c_{i} \exp\left(\frac{-s\sigma(h - \mu_{i})^{2}}{s + \sigma}\right)}{\sqrt{\pi} \sum_{i=1}^{3} \exp\left(\frac{-2s\sigma(h - \mu_{i})^{2}}{s + \sigma}\right)} \end{cases}$$
(18)

Как стандартный наблюдатель, так и современные технические цветовые сенсоры не могут быть с достаточной точностью аппроксимированы моделью равноселективного гауссовского сенсора, однако хорошо приближаются моделью сенсора, связанного линейным преобразованием с равноселективным гауссовским.

Для оценки характеристик "улучшенного" сенсора решим такую оптимизационную задачу:

$$\langle A_x, \sigma_x, \mu_x \rangle = \underset{\langle A, \sigma, \mu \rangle}{\operatorname{argmin}} \|A\mathbf{X}_{\mathbf{G}}(\lambda, \sigma, \mu) - \mathbf{X}_x(\lambda)\|_2.$$
 (19)

Применим прямой метод оптимизации Нелдера—Мида (Nelder, Mead, 1965) по кортежу параметров $\langle \sigma, \mu \rangle$, а оптимальную матрицу A_i будем на каждой итерации *i* искать аналитически методом наименьших квадратов. В качестве начального приближения возьмем $\sigma = 30$ и $\mu = [600\ 550\ 450]^T$. За 1000 итераций получим следующее решение:

$$\begin{cases} A_x = \begin{bmatrix} 1.1353 & 0.233 & 0.3116 \\ 0.5711 & 1.029 & 0.0655 \\ -0.0045 & 0.0226 & 1.7698 \end{bmatrix} \\ \sigma_x = 24.94 , \qquad (20) \\ \boldsymbol{\mu}_x = \begin{bmatrix} 600.4 & 544.4 & 451.0 \end{bmatrix}^T \end{cases}$$

с остаточной среднеквадратичной ошибкой 0.0581.

Решим ту же задачу для сенсора фотоаппарата Canon 5D Mark III с опубликованными значениями функции чувствительности $X_c(\lambda)$ (Smagina et al., 2020):

$$\langle A_c, \sigma_c, \boldsymbol{\mu}_c \rangle = \underset{\langle A, \sigma, \boldsymbol{\mu} \rangle}{\operatorname{arg\,min}} \| A \mathbf{X}_{\mathbf{G}}(\lambda, \sigma, \boldsymbol{\mu}) - \mathbf{X}_c(\lambda) \|_2 . \quad (21)$$

При тех же параметрах алгоритма получим следующее решение:

$$\begin{cases} A_c = \begin{bmatrix} 0.6311 & 0.0148 & 0.0168 \\ 0.1175 & 0.9962 & 0.1161 \\ 0.0576 & -0.0232 & 0.6983 \end{bmatrix} \\ \sigma_c = 35.06 \qquad (22) \\ \boldsymbol{\mu}_c = \begin{bmatrix} 601.2 & 535.7 & 471.6 \end{bmatrix}^T \end{cases}$$

с остаточной среднеквадратичной ошибкой.

Чтобы качественно оценить величину погрешности, полученной в этих численных экспериментах, воспользуемся следующим соображением. Сенсоры фотоаппаратов изготавливаются так, чтобы функции чувствительности были как можно ближе к колориметрическим, т.е. линейно связанным с функциями стандартного наблюдателя $X_x(\lambda)$.

Найдем наилучшую линейную аппроксимацию $X_x(\lambda)$, используя функции чувствительности фотоаппарата в качестве базиса:

$$A_{c}^{x} = \underset{A}{\operatorname{argmin}} \|A\mathbf{X}_{c}(\lambda) - \mathbf{X}_{x}(\lambda)\|_{2} .$$
 (23)

Методом наименьших квадратов получим следующее решение:

$$A_c^x = \begin{bmatrix} 1.6048 & -0.0545 & 0.2997 \\ 0.6047 & 0.8246 & -0.2531 \\ 0.1326 & -0.4697 & 2.2337 \end{bmatrix},$$
 (24)

с остаточной среднеквадратичной ошибкой 0.1532.

Итак, реальный сенсор фотоаппарата можно считать эквивалентным равноселективному гауссовскому с точностью, почти в 4 раза превосходящей точность, с которой он может считаться колориметрическим (что необходимо для корректной цветопередачи). На рис. 7 результаты численных экспериментов представлены графически. Из иллюстрации ясно, что при гауссовской аппроксимации (a, δ) в сравнении с колориметрической аппроксимацией сенсора камеры (b) не только выше точность, но и практически отсутствуют участки отрицательной чувствительности, т.е. гауссовская аппроксимация в рассмотренных случаях является физически адекватной.

Рассмотрим теперь задачу предсказания цветности окраски под эквиэнергетическим освещением по цвету, наблюдаемому под другим источником. Пусть известен цвет c_s источника, определяемый следующим образом:

$$\mathbf{c}_{s} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda.$$
 (25)

Положим также известным цвет c_{sr} окраски под этим освещением, задаваемый согласно такому определению:

$$\mathbf{c}_{\rm sr} = \int_{0}^{\infty} \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{R}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda.$$
 (26)

Требуется оценить цветность **с**_г этой окраски под эквиэнергетическим освещением:

$$\mathbf{c}_{\mathbf{r}} = \frac{\int_{0}^{\infty} \mathbf{R}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda}{\left\| \int_{0}^{\infty} \mathbf{R}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda \right\|_{2}}.$$
(27)

Сформулируем алгоритм гауссовской оценки окраски по цвету (ГООЦ) для предсказания цветности окраски $\mathbf{c}_{\mathbf{r}}$ (выражение (27)) под эквиэнергетическим освещением по цвету $\mathbf{c}_{\mathbf{sr}}$ (выражение (26)), наблюдаемому под другим источником, при известном цвете $\mathbf{c}_{\mathbf{s}}$ источника (выражение (25)). Параметры $\langle A_c, \sigma_c, \boldsymbol{\mu}_c \rangle$ оптимальной гауссовской аппроксимации чувствительности сенсора считаем вычисленными заранее.

1. Аппроксимация спектральных стимулов в гауссовской модели. Зная $\langle \boldsymbol{\sigma}_{c}, \boldsymbol{\mu}_{c} \rangle$, подставим $A_{c}^{-1} \mathbf{c}_{s}$ в (18) и получим параметры $\mathbf{p}_{s} = \begin{bmatrix} l_{s} & s_{s} & h_{s} \end{bmatrix}^{T}$ спектра $M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_{s})$, аппроксимирующего спектр S(λ). Аналогично получим параметры $\mathbf{p}_{sr} = \begin{bmatrix} l_{sr} & s_{sr} & h_{sr} \end{bmatrix}^{T}$ спектра $M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_{sr})$, аппроксимирующего спектр S(λ).

2. Оценивание спектральной компоненты окраски. Найдем параметры $\mathbf{p}_{\mathbf{r}}$ гауссовского спектра такие, что $M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_{\mathbf{r}}) \propto \frac{M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_{sr})}{M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_{s})}$. (Здесь знак \propto обозначает пропорциональность.) Для этого положим $\mathbf{p}_{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} 1 \ s_{sr} - s_s \ \frac{h_{sr}}{s_{sr} - s_s} \end{bmatrix}^T$.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

164



Рис. 7. Линейная аппроксимация (a, e) функций чувствительности стандартного наблюдателя и (δ) камеры Canon 5D Mark III, при использовании в качестве базиса (a, δ) равноселективной гауссовской модели или (e) базиса камеры Canon 5D Mark III. Целевая функция отмечена точками, результат аппроксимации – сплошной линией. Красным, зеленым и синими цветами обозначены первая, вторая и третья компоненты вектора $X(\lambda)$ соответственно.

3. Оценивание цветности окраски под эквиэнергетическим освещением. Подставим $M_{G*}(\lambda, \mathbf{p}_r)$ в качестве $R(\lambda)$ в (27) и вычислим оценку \mathbf{c}_r численным интегрированием. Для сравнения возьмем алгоритм, решающий ту же задачу, но в варианте использования ЛСМ. Алгоритм состоит из тех же трех шагов, что и алгоритм ГООЦ:

Таблица 1. Результаты сравнения точности спектральных моделей в задаче оценки окраски по цвету. Жирным шрифтом выделены значения метрики, меньшие единицы

(C(1))	$\{R(\lambda)\}$	Χ(λ)	Модель			
{ S (λ)}			M_L^{\pm}	M_Z^{\pm}	M_{G*}	
Р	K	Н	0.23	0.078	5.1	
		С	5.0	9.1	7.3	
	Μ	Н	0.37	0.33	3.4	
		С	5.1	10.0	8.0	
	Ν	Н	0.080	0.18	5.7	
		С	3.7	7.2	13.0	
Ν	K	Н	1.6	4.2	3.3	
		С	3.5	6.5	3.2	
	Μ	Н	1.4	2.5	2.5	
		С	4.0	6.5	4.3	
	Ν	Н	0.41	4.0	4.7	
		С	3.1	5.5	5.6	

1. Аппроксимация спектральных стимулов в

ЛСМ. Вычислим параметры \mathbf{p}_{s} спектра $M_{\mathbf{B}}^{\pm}(\lambda, \mathbf{p}_{s})$, аппроксимирующего спектр S(λ), пользуясь соотношением (15). Аналогично вычислим параметры \mathbf{p}_{sr} спектра $M_{\mathbf{B}}^{\pm}(\lambda, \mathbf{p}_{sr})$, аппроксимирующего спектр S(λ) R(λ).

2. Оценивание спектральной компоненты окраски. Оценим R(λ) численным делением

$$R(\lambda) = \frac{M_{B}^{\pm}(\lambda, \mathbf{p}_{sr})}{M_{B}^{\pm}(\lambda, \mathbf{p}_{s})} (R(\lambda) \notin \left\{M_{B}^{\pm}\right\}).$$

3. Оценивание цветности окраски под эквиэнергетическим освещением. Получим c_r согласно (27) численным интегрированием.

В качестве оценки точности алгоритма, испытанного на множестве пар $\langle S_i(\lambda), R_i(\lambda) \rangle$, будем вычислять отношение средней ошибки оценки цветности тривиального алгоритма к средней ошибке оценки цветности испытываемого алгоритма. Под результатом тривиального алгоритма станем понимать цвет, совпадающий по цветности с наблюдаемым под освещением $S_i(\lambda)$ (так называемая аконстантная оценка), а координаты цветности (α , β) определим следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}^{\text{def}} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{3\sqrt{2}} & \frac{-1}{3\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{c}.$$
 (28)

Для численных экспериментов были взяты 170 спектров отражения "естественных окрасок" (natural colorants) и 355 спектров отражения "окрасок Кринова" (Krinov colorants) из базы Лаборатории вычислительного зрения Университета им. С. Фрезера, Канада (http://www.cs.sfu.ca/colour). Дополнительный набор данных был любезно предоставлен В.В. Максимовым (Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН). Он состоял из 27 спектров отражения бумаги с нанесенной типографской краской различных цветов. Для моделирования источников света из базы Лаборатории вычислительного зрения были выбраны четыре спектра "естественных источников" с максимально различающихся цветностью. Дополнительно были смоделированы 11 планковских источников с цветовой температурой от 20 до 300 тысяч градусов Кельвина.

Результаты измерения точности рассматриваемых алгоритмов на различных комбинациях наборов данных сведены в табл. 1.

Алгоритм, использующий ЛСМ, был протестирован с двумя моделями, рассмотренными в разд. 1: зональной M_Z^{\pm} и моделью Ли M_L^{\pm} . В первой колонке таблицы символ "Р" обозначает набор планковских, а "N" – естественных источников света. Во второй колонке символ "К" обозначает набор Кринова, "М" – Максимова, а "N" – "естественных" окрасок. В третьей колонке символ "Н" обозначает зрительную систему человека, а "С" – фотокамеру. Вывод очевиден: только ГСМ дала улучшение оценки (метрика больше единицы) в каждом из экспериментов.

На рис. 8 проиллюстрирован разброс оценок цветности при использовании каждой из трех сравниваемых спектральных моделей в эксперименте с естественными источниками света, "естественными" окрасками и фотокамерой.

Красным цветом обозначены координаты ошибки цветности при применении алгоритма, черным – ошибки при использовании аконстантной оценки в качестве ответа ("наивный" подход).

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКЛАДОК ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦВЕТНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ И ФОНМИЗЕСОВСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим следующий класс спектральных моделей:

$$\mathbf{M}_{\mathbf{B}}^{*}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \exp\left(-\mathbf{p} \cdot \mathbf{B}(\lambda)\right), \quad \mathbf{B}_{1}(\lambda) = 1, \qquad (29)$$

где **р** — вектор параметров спектральной модели, а ее базис **B**(λ) заранее фиксирован.

Любая модель, представленная в виде (29), замкнута относительно перемножения элементов и умножения на неотрицательное число. Назовем представителей этого класса мультипликативно замкнутыми спектральными моделями (M3CM).



Рис. 8. Сравнение точности решения задачи цветовой константности при известной цветности источника в зависимости от используемой спектральной модели

а – модели Ли; *б* – зональной; *в* – гауссовской.

Для любой M3CM в параметризации (29) выполняется следующее свойство:

$$\mathbf{M}_{\mathbf{B}}^{*}(\lambda,\mathbf{p}_{1})\mathbf{M}_{\mathbf{B}}^{*}(\lambda,\mathbf{p}_{2}) = \mathbf{M}_{\mathbf{B}}^{*}(\lambda,\mathbf{p}_{1}+\mathbf{p}_{2}), \qquad (30)$$

откуда следует, что вектор параметров спектральной яркости унихроматического объекта можно найти, сложив параметры его спектральной компоненты окраски и спектральной освещенности. Прикладное значение этого математического факта следующее. Если алгоритм цветовой константности построен по стандартной двухэтапной схеме, то в нем решается задача оценки цвета окраски по наблюдаемому цвету и цветности источника (как на шаге 2 алгоритма ГООЦ). Для МЗСМ в параметризации (29) решение стоящей целевой задачи производится вычитанием векторов параметров.

Еще одним замечательным свойством семейства M3CM является то, что все их элементы – спектры (т.е. неотрицательные функции). Кроме того, у M3CM с неотрицательным базисом $\mathbf{B}(\lambda) \ge 0$ конус неотрицательных параметров $\mathbf{p} \ge 0$ соответствует физически осмысленным окраскам $\left(0 \le M_{\mathbf{B}}^{*}(\lambda, \mathbf{p}) \le 1\right).$

Модель M_{G*} можно переписать как M3CM с полиномиальным базисом, при этом изменится параметризация модели, но никак не множество ее спектральных элементов ($p_1 > 0$). Будем обозначать такую параметризацию M_{G}^{*} :

$$M_{G}^{*}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \exp\left(-\mathbf{p} \cdot \mathbf{B}^{G}(\lambda)\right), \qquad (31)$$
$$B_{i}^{G}(\lambda) = \lambda^{i-1}, \quad 1 \le i \le 3.$$

Ни $M_{G \updownarrow},$ ни M_{G° подобным свойством не обладают.

Из рассмотренных выше спектральных моделей перепараметризацию в виде M3CM допускает также линейная 3CM M_Z^{\pm} при условии, что ее базисные множества покрывают всю полупрямую длин волн. Ее мультипликативно замкнутый

вариант обозначим М_Z*:

$$M_{Z}^{*}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \exp(-\mathbf{p} \cdot \mathbf{B}^{Z}(\lambda)),$$

$$\begin{cases} B_{1}^{Z}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} 1 \\ B_{2}^{Z}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} [\lambda \in \Lambda_{2}], \quad \Lambda_{2} \cap \Lambda_{3} = \emptyset, \\ B_{3}^{Z}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} [\lambda \in \Lambda_{3}] \end{cases}$$
(32)

где [•] — скобка Айверсона. Разумеется, не-спектры, входящие в M_Z^{\pm} , не являются элементами M_Z^{*} . ЗСМ — единственная ЛСМ, позволяющая подобную перепараметризацию.

Заметим, что в эксперименте по оцениванию окраски по цвету, описанному в разд. 2, 3СМ отстала от ГСМ незначительно, а линейная модель, не сводимая к МЗСМ, показала существенно менее стабильный результат. Можно предположить, что часть выбросов в оценках связаны с операцией деления неточно известных спектров. При численном делении, неизбежном при использовании ЛСМ, могут возникать большие ошибки в тех областях спектра, где деноминатор мал. Отношение же двух элементов МЗСМ вычисляется аналитически и является в некотором смысле регуляризованным.

Вернемся теперь к первой части задачи цветовой константности, а именно — к оценке цветности источника. Одним из возможных способов решения этой задачи является использование эффекта переотражения света, возникающего в

складках. Описать его можно на примере, приведенном в пионерской работе 1971 г. (Нюберг и др., 1971а). В ней рассматривалась объемная сцена, освещенная единственным источником, а конфигурация поверхности тестового объекта была складчатой, и в освещение отдельных ее точек существенный вклад вносили рефлексы от других участков той же поверхности. Экспериментально было показано, что наличие складок на наблюдаемой поверхности дает человеку достаточные признаки реальной цветности освещения даже в отсутствие всех других (не исключая и вполне достаточных признаков, получаемых от бликующих объектов, что методически достигалось отсутствием зеркальных отражений в направлении наблюдателя). Благодаря возникающим в результате переотражений в глубине складок более насыщенным цветам испытуемые уверенно отличали красную гофрированную поверхность, освещенную белым светом, от белой поверхности, освещенной красным светом. Пары спектров были подобраны таким образом, что при однократном отражении цвет тестовых объектов колориметрически совпадал:

$$\int_{0}^{\infty} S_{1}(\lambda) R_{1}(\lambda) X_{x}(\lambda) d\lambda = \int_{0}^{\infty} S_{2}(\lambda) R_{2}(\lambda) X_{x}(\lambda) d\lambda,$$
(33)
$$\int_{0}^{\infty} S_{1}(\lambda) X_{x}(\lambda) d\lambda \qquad \not \approx \int_{0}^{\infty} S_{2}(\lambda) X_{x}(\lambda) d\lambda,$$

где \leq обозначает отсутствие пропорциональности, $S_i(\lambda)$ – спектральный состав освещения в *i*-м варианте предъявления, а $R_i(\lambda)$ – спектральное распределение коэффициента отражения поверхности в нем же. Подбор колориметрического совпадения цветов тестовых объектов подтверждался контрольным экспериментом, в котором испытуемые не могли различить те же два варианта сцены – при условии ровной (плоской и гладкой) поверхности объектов. Покажем возможность построения алгоритма технического зрения, обеспечивающего численную оценку цветности источника, основываясь на этом эффекте.

Известно (Nikolaev, Nikolaev, 2004), что оптическое изображение однородно окрашенного объекта с учетом конечного числа переотражений можно записать следующим образом:

$$F(\lambda, x, y) = \sum_{i=1}^{n} g_i(x, y) S_{z_i}(\lambda) R_{1, r_i}(\lambda) \times \prod_{j=1}^{m_i} R_{p_{i,j}, q_{i,j}}(\lambda),$$
(34)

где n — число учитываемых членов суммы с различным спектральным составом, m_i — число переотражений, учитываемых в *i*-м члене суммы, рассматриваемый объект имеет индекс 1, а z_i , r_i , $p_{i,j}$ и $q_{i,j}$ – индексные функции, перечисляющие спектральные компоненты в должном порядке.

Будем рассматривать однородно окрашенную унихроматическую складку. Последнее уточнение имеет своей целью не упрощение задачи, а сосредоточение на наиболее интересном случае. Действительно, наличие в сцене дихроматических (глянцевых, бликующих) поверхностей позволяет установить цветность источника вне зависимости от наличия складок. Пусть также в сцене присутствует только один доминирующий источник света со спектральным составом $S(\lambda)$, цветность которого и требуется установить. При таких ограничениях выражение (34) упростится до следующего:

$$\mathbf{F}(\lambda, x, y) = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{g}_i(x, y) \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{R}^i(\lambda), \qquad (35)$$

где $R(\lambda)$ — единственная спектральная компонента окраски рассматриваемого унихроматического объекта, а $g_{i+1}(x, y) < g_i(x, y)$, поскольку часть света при каждом отражении рассеивается за пределы складки.

Пусть R – элемент M3CM. Тогда R^{*i*}(λ) при $i \in \mathbf{N}$ – элементы той же M3CM, причем векторы их параметров $[p_2 \ p_3]^T$ в параметризации (29) лежат на одной прямой, проходящей через **0**. Предположим дополнительно, что $g_i(x, y)$ и R(λ) таковы, что практически приемлемым является следующее приближение:

$$\tilde{R}(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} g_i(x, y) R^i(\lambda) \approx$$

$$\approx g(x, y) R^{\alpha(x, y)}(\lambda) = \hat{R}(\lambda),$$
(36)

где $g(x,y) \ge 0$, а $\alpha(x,y) \ge 1$. Формально это означает, что на указанной прямой лежат не только отдельные компоненты рассеянного в сторону сенсора излучения, но и их композиции (разные в разных точках складки).

Чем ценно приближение (36)? Если оно адекватно, то будет работоспособен следующий алгоритм (Nikolaev, Nikolaev, 2007): зафиксируем M3CM; найдем на изображении сцены две складки разной окраски; для цвета каждого пикселя каждой из них оценим спектр и его параметры $\langle p_2, p_3 \rangle$; аппроксимируем получившиеся две выборки прямыми; построим спектр с параметрами, соответствующими точке пересечения этих прямых (p_1 при этом положим равным 1); цветность излучения с получившимся спектром примем в качестве оценки точности источника.

Оценим, насколько приближение (36) неточно при использовании ГСМ. В качестве метрики



Рис. 9. Пример аппроксимации суммы степенного ряда гауссиан одной гауссианой. Пунктиром обозначен спектр \tilde{R} , сплошной линией – его аппроксимация \hat{R} , штриховой линией – их разность. Цветными линиями для сравнения обозначены функции чувствительностей X_x стандартного наблюдателя.

ошибки будем использовать относительную ошибку е по норме L₂:

$$e = \frac{\int_{0}^{\infty} (\tilde{R}(\lambda) - \hat{R})^{2} d\lambda}{\int_{0}^{\infty} \tilde{R}^{2}(\lambda) d\lambda},$$
(37)

где \tilde{R} – аппроксимируемый спектр, а \hat{R} – наилучший соответствующий ему элемент модели. Разумеется, характеристики приближения существенно зависят от конкретных значений коэффициентов $g_i(x, y)$. Менее очевидно, что для ГСМ параметр *е* ошибки аппроксимации не зависит от параметров $R(\lambda)$. Это связано с тем, что все гауссианы аффинно подобны, а функционал (37) инвариантен как относительно аффинного преобразования аргумента λ , так и относительно домножения \tilde{R} и \hat{R} на одно и то же отличное от 0 число.

Очевидно, что приближение (36) будет иметь высокую точность, если ряд коэффициентов *g* спадает достаточно быстро. Рассмотрим более интересный вариант. Пусть $g_i(x, y) = \frac{1}{2^{i-1}}$. В этом случае половина освещенности в наблюдаемой точке создается вторичными источниками –

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

сторонами складки. Воспользуемся параметризацией M_{G*} (согласно определению (11)). Пусть параметры гауссианы R равны $\begin{bmatrix} 1 \ 1 \times 10^{-4} \ 510 \end{bmatrix}^T$. При этом наилучшая по *е* аппроксимация \hat{R} имеет параметры $\begin{bmatrix} 1.937 \ 1.506 \times 10^{-4} \ 510 \end{bmatrix}^T$, а относительная ошибка *е* составляет менее 4%. На рис. 9 изображены соответствующие спектры \tilde{R} и \hat{R} , а также их разность.

Как видно из рисунка и по значению e, исследуемая аппроксимация имеет высокую точность при выбранных параметрах, что является аргументом для использования ГСМ в алгоритмах оценивания цветности источника по изменению цвета в складках. Однако в разд. 1 обсуждалось, что модель M_{G*} существенно уступает по цветовому охвату другим спектральным гауссоподобным моделям, не являющимся МЗСМ. Возникает вопрос: существует ли МЗСМ, имеющая параметры цветового охвата, сопоставимые с M_{G*} , и при этом удовлетворяющая приближению (36)?

Рассмотрим M3CM M^{*}_M с базисом, совпадающим с ЛСМ Илмаза:

$$\mathbf{M}_{\mathbf{M}}^{*}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} \exp\left(-\mathbf{p} \cdot \mathbf{B}^{\mathbf{M}}(\lambda)\right),$$

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{1}^{\mathbf{M}}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} 1 \\ \mathbf{B}_{2}^{\mathbf{M}}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \sin \phi, \quad \phi \stackrel{\text{def}}{=} 2\pi \frac{\lambda - \lambda_{V}}{\lambda_{R} - \lambda_{V}}, \\ \mathbf{B}_{3}^{\mathbf{M}}(\lambda) \stackrel{\text{def}}{=} \cos \phi \end{cases}$$
(38)

где $[\lambda_{\nu}; \lambda_{R}]$ — видимый диапазон длин волн. M_{M}^{*} задает распределение фон Мизеса, поэтому по аналогии с гауссовской будем называть ее фонмизесовской спектральной моделью (ФСМ). Помимо канонической МЗСМ-параметризации ФСМ будем рассматривать ее "натуральную" параметризацию, в которой параметры соответствуют естественным характеристикам цвета в восприятии человека, аналогично ГСМ. ФСМ в натуральной параметризации обозначим M_{M} :

$$M_{M}(\lambda, \mathbf{p}) \stackrel{\text{def}}{=} p_{1} \exp(p_{2} \cos(\phi - p_{3}) - p_{2}),$$

$$\phi \stackrel{\text{def}}{=} 2\pi \frac{\lambda - \lambda_{V}}{\lambda_{R} - \lambda_{V}}.$$
(39)

На рис. 10 изображена серия представителей модели $M_M(\lambda, \mathbf{p})$, отличающихся только параметром p_1 ("параметром яркости"), значения которого пробегают отрезок [0.05; 0.95] с шагом 0.1.

Остальные параметры неизменны: $p_2 = 1.5$, $p_3 = 2.5$. Цветности излучений с такими спектрами, очевидно, совпадают. На фрагменте δ рис. 11 звездочкой отмечен их образ на стандартной диаграмме цветности. Крестиком отмечена нейтральная (серая) точка.

На рис. 11 изображена серия представителей той же модели, отличающихся параметром p_2 ("параметром насыщенности").

Величина $\frac{1}{p_2}$ пробегает здесь отрезок [0.05; 0.95] с шагом 0, 1. Остальные параметры фиксированы: $p_1 = 0.5$, $p_3 = 2.5$. На фрагменте б рис.11 звездочками отмечены образы спектров серии на стандартной диаграмме цветности. По мере уменьшения p_2 насыщенность цвета падает, а цветность спектра приближается к нейтральной точке (при этом изменение уменьшается с каждым шагом). Цветовой тон в серии изменяется незначительно: последовательность точек не сильно уклоняется от луча с началом в нейтральной точке.

На рис. 12 представлена заключительная серия спектров ФСМ. В этом случае параметр p_3 ("параметр тона") принимает значения из отрезка [0; 1.8 π] с шагом 0.2 π .

Оставшиеся параметры имеют следующие значения: $p_1 = 0.5$, $p_2 = 50$. На фрагменте δ рис. 12 звездочками отмечены образы спектров серии на стандартной диаграмме цветности. Нетрудно заметить, что цветности спектров близки к максимально насыщенным и покрывают не только спектральный локус, но и отрезок, замыкающий локус пурпурных цветов. Таким образом, ФСМ можно считать еще одним приближенным расширением ГСМ на область пурпурных цветов. Из

рассмотренных ранее расширений M_M^* ближе всего к M_{G° . Они обе построены на "замыкании" видимого диапазона в кольцо и обе не в точности совпадают с ГСМ на области ее определения. При этом M_{G° не является M3CM и для нее не существует способа аналитического пересчета спектров при учете параметров освещения.

Вернемся к анализу мультипликативного приближения эффективного спектра отражения в складке (36). Как и при использовании ГСМ, положим $g_i(x, y) = \frac{1}{2^{i-1}}$. В отличие от ГСМ, для ФСМ ошибка (37) инвариантна только относительно изменения p_1 и p_3 , но никак не p_2 . Рассмотрим поэтому худший случай. Параметры R, максимизирующие ошибку *e*, для ФСМ в натуральной параметризации равны [1 1.1428 2.5133]^T. Для такого R наилучшая по *e* аппроксимация \hat{R} имеет параметры [1.925 1.6767 2.5133]^T, а относительная ошибка *e* составляет немногим более 4.6%. На рис. 13 изображены соответствующие спектры \tilde{R} и \hat{R} , а также их разность.

Вполне наглядно, что поведение остаточной ошибки у ГСМ и ФСМ схожи, а величина ошибки у ФСМ незначительно выше.

Приведем здесь еще одно подтверждение тому, что аппроксимация (36) имеет практическое значение. В работе (Gusamutdinova et al., 2017) были измерены спектральные яркости набора тканевых складок. Для каждой точки складки были рассчитаны цвета CIE XYZ стандартного наблюдателя. Для каждого цвета были найдены параметры $\langle q1', q2', q3' \rangle$ спектра ФСМ, имеющего такой же цвет. (Использованная в работе (Gusamutdinova et al., 2017) параметризация ФСМ аффинно подобна введенной выше натуральной параметризации.) На рис. 14 приведены полученные (численной оценкой) распределения.

Нетрудно заметить, что при использовании ФСМ основное предположение алгоритма оценивания цветности источника с опорой на складки выполнено: цветовые распределения достаточно точно оцениваются отрезками прямых, проходящих через точку, соответствующую цветности источника.



Рис. 10. Элементы ФСМ в натуральной параметризации $M_M(\lambda, \mathbf{p})$, отличающиеся только параметром p_l *a* – спектральные функции на фоне базиса $\mathbf{X}_{\mathbf{x}}$ стандартного наблюдателя, δ – их цветность в этом базисе.

Сравним теперь ФСМ с ранее известными моделями по цветовому охвату. Ограничимся моделями M_Z^* , M_G^* , M_M^* и M_{G° и будем исследовать два вопроса. Во-первых, оценим, какая область цветового треугольника достижима спектрами, удовлетворяющими той или иной модели. Излучения с цветностью, лежащей вне этой области, не могут быть адекватно промоделированы соответствующей спектральной моделью. Во-вторых, вслед за Мирзаем и Фантом введем понятие цветового тела спектральной модели.



Рис. 11. Элементы ФСМ в натуральной параметризации $M_M(\lambda, \mathbf{p})$, отличающиеся только параметром p_2 *a* – спектральные функции на фоне базиса $\mathbf{X}_{\mathbf{x}}$ стандартного наблюдателя, δ – их цветность в этом базисе.

Цветовые векторы **с**, составляющие цветовое тело Лютера-Нюберга, представимы в следующем виде:

$$\mathbf{c} = \alpha \int_{0}^{\infty} \mathbf{S}(\lambda) \mathbf{R}(\lambda) \mathbf{X}(\lambda) d\lambda, \quad 0 \le \mathbf{R}(\lambda) \le 1, \quad (40)$$

где α — фиксированный коэффициент, зависящий от геометрии рассматриваемой сцены и конкретного вида СДФОС объекта, а спектральный состав S(λ) освещения и чувствительности X(λ) также фиксированы. Цветовым же телом модели M(λ , **p**) будем называть множество векторов **c**,

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

172



Рис. 12. Элементы ФСМ в натуральной параметризации $M_M(\lambda, \mathbf{p})$, отличающиеся только параметром p_3 *a* – спектральные функции на фоне базиса $\mathbf{X}_{\mathbf{x}}$ стандартного наблюдателя, *б* – их цветность в этом базисе.

удовлетворяющих выражению (40) при $R \in \{M\}$. Доля цветового тела Лютера—Нюберга, занимаемая цветовым телом спектральной модели, характеризует ее цветовой охват не для излучений (как в первом случае), но теперь уже для окрасок. Будем считать освещение эквиэнергетическим (S(λ) = 1), а сенсор — удовлетворяющим модели стандартного наблюдателя (X(λ) = X_x(λ)). Границы видимого диапазона [λ_V ; λ_R] для моделей M^{*}_M



Рис. 13. Пример аппроксимации суммы ряда элементов ФСМ одним распределением фон Мизеса. Пунктиром обозначен спектр \tilde{R} , сплошной линией – его аппроксимация \hat{R} , штриховой линией – их разность. Цветными линиями для сравнения обозначены функции чувствительностей X_x стандартного наблюдателя.

и М_{G°} примем равными [360; 830]. Базис моде-

ли M_Z^* выберем среди трехступенчатых так, чтобы ее цветовое тело было максимальным. Под трехступенчатой ЗСМ здесь понимается модель с базисными множествами в виде тройки непересекающихся отрезков, покрывающих видимый диапазон. При фиксированном видимом диапазоне трехступенчатая ЗСМ определяется двумя параметрами — границами λ_{BG} и λ_{GR} между тремя базисными отрезками.

Цветовые тела всех выбранных спектральных моделей звездчатые, т.е. любой отрезок, соединяющий точку цветового тела и начало координат, лежит в цветовом теле. При этом максимальная светлота окраски достигается при $\max_{\lambda} R(\lambda) = 1$. Воспользуемся этим фактом для определения объема цветового тела. Введем сетку 1000 × 1000 на диаграмме цветности. Для каждого узла сетки либо найдем параметры модели, соответствующие данной цветности, либо убедимся, что решение отсутствует. Максимизируем светлоту окраски. Вычислим объем как сумму объемов тетраэдров, три вершины которых являются узлами сетки, а четвертая — началом координат.

В табл. 2 приведены результаты численной оценки цветового охвата для M3CM (зональной, гауссовской и фонмизесовской), а также, для сравнения – и модели Логвиненко M_G.

Оцененные меры приведены как в системе координат CIE XYZ (для возможного сравнения с классическими работами), так и в равномерной системе цветовых координат proLab, понятие меры в которой согласовано со свойствами цветоразличения человека (Konovalenko et al., 2021). Оптимальный объем в proLab для зональной модели был достигнут при трехступенчатом базисе с параметрами $\lambda_{BG} = 489$ и $\lambda_{GR} = 572$. Модель Логвиненко показала лучшие результаты по цветовому охвату для окрасок (доля объема цветового тела), но она не является мультипликативно замкнутой.

Незначительно отстающая от $M_{G^{\circ}}$ зональная модель, оптимизированная по объему цветового тела, обеспечивает очень плохой цветовой охват для излучений. На рис. 15 видно, что область цве-

тового треугольника, доступная для модели M_Z^* , почти совпадает с проекцией цветового тела sRGB-дисплея.

При этом стандарт sRGB (Stokes et al., 1996) на сегодняшний день считается устаревшим именно из-за недостаточного цветового охвата. Все остальные рассмотренные модели не имеют проблем с передачей насыщенных цветов излучений, причем ФСМ показывает наилучший среди оставшихся M3CM цветовой охват для окрасок, что делает эту модель наиболее перспективной



Рис. 14. Экспериментальная проверка точности выполнения основного предположения алгоритма оценивания цветности источника с опорой на складки. На плоскости параметров $\langle q2', q3' \rangle$ ФСМ отрезками отмечены линейные модели цветовых распределений реальных складок тканей различных окрасок. Звездой отмечена точка, соответствующая цветности источника. Иллюстрация взята из работы (Gusamutdinova et al., 2017).

при разработке методов цветового анализа, опирающихся на мультипликативную замкнутость. Дополнительно заметим, что задача оптимального выбора спектральных моделей применительно к организации цветоконстантных схем рассмотрена в работе (Николаев и др., 2008). На рис. 16 показана форма цветовых тел исследованных моделей в системе координат proLab.

Очевидно, что натуральное расширение ГСМ практически не справляется с цветопередачей светлых пурпурных окрасок. При этом ФСМ,

Ограничение	Объем цвет	гового тела	Площадь достижимой цветности		
	CIE XYZ	proLab, ×10 ⁵	CIE XYZ	proLab	
$0 \le \mathbf{R}(\lambda) \le 1$	0.418	4.54	0.334	2.69	
$R\in\{M_Z^*\}$	0.272 (65%)	2.5 (56%)	0.138 (41%)	1.09 (41%)	
$R\in\{M_G^*\}$	0.142 (34%)	1.79 (39%)	0.334 (100%)	2.69 (100%)	
$R\in\{M_M^{\ast}\}$	0.162 (39%)	2.26 (50%)	0.334 (100%)	2.69 (100%)	
$R\in\{M_{G\circ}\}$	0.181 (43%)	2.58 (57%)	0.334 (100%)	2.69 (100%)	

Таблица 2. Результаты сравнения спектральных моделей по цветовому охвату



Рис. 15. Цветовой охват ЗСМ, оптимизированной по объему цветового тела, на диаграмме цветности в системе координат proLab. Цветами показан цветовой охват стандарта sRGB, черным контуром – исследуемой зональной модели.

хоть и уступает модели Логвиненко, справляется с этим значительно лучше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Текст, предложенный вниманию читателей, достаточно разнороден в отношении обсуждавшихся в нем формальных проблем и актуальных технических задач цветовой тематики. Вопросы корректных физоптических постановок, позволяющих успешно моделировать психофизически изученные феномены человеческого цветовосприятия с целью разработки путей решения этой в общем виде некорректной обратной задачи зрения, равно как и не связанные с цветоконстантной проблематикой задачи создания устройств, обеспечивающих для "трихромата-пользователя" максимально комфортные условия получения цветовой информации об излучениях и окрасках, связывает здесь в логическое целое фундаментальная роль той общей части описания спектральных категорий, что принято именовать спектральной моделью (что можно понимать и как ключевой фрагмент математического языка, связывающего мир излучений с массивом реак-

ций на них сенсора, и в качестве совокупности теоретических упрощений и ограничений, "заложенных в конструкцию модели" и позволяющих реализовать цели поставленной цветовой задачи). Знание биоинформатических законов зрительного процесса – при разработке эффективной вычислительной его модели - позволяет обеспечить в свою очередь и совершенствование процедур цветовоспроизведения (в полиграфии и технологии дисплеев). Действительно, в технических схемах оптического распознавания моделирование визуального процесса (как пример подхода к решению обратной задачи) предполагает опору на изученные особенности человеческого зрения, требуя привлечения формального языка для описания его фаз и физических атрибутов. В нашем случае акценты теории связаны со спектральными свойствами излучения, доносящего информацию о наблюдаемой сцене, и с цветометрическим характером сенсора, передающего эти данные в сильно обедненном виде "блоку цветовых оценок и гипотез об окраске тел в поле зрения"

Компьютерный бум середины прошлого века, породивший, в том числе, лавину технических задач зрительного интеллекта, вызвал к жизни необходимость "освоения в практических целях" ранее накопленных знаний о психофизике цветовосприятия. Законы Грассмана и открытый Гельмгольцем феномен цветовой константности побудили исследователей найти подходы к "автоматизации объектного цветовосприятия", каковые и выразились в предложениях использовать в этих целях язык упомянутых выше линейных моделей. Просуммируем теперь основные тезисы и декларации данной работы. Хотя ЛСМ и весьма удобны математически для регуляризации некорректных задач цветового анализа, невозможность в трехканальной ЛСМ описать семейство насыщенных окрасок произвольного цветового тона, ограничивает их применение в обработке изображений, предназначенных для предъявления человеку. Этот существенный недостаток ЛСМ стимулировал разработку ряда нелинейных спектральных моделей, среди которых самыми перспективными на сегодняшний день представляются ГСМ (гауссовская, в различных модификациях) и ФСМ (фонмизесовская). Обе эти модели имеют два замечательных преимущества. Выходные тристимулы описываются в них непосредственно через три структурных параметра кривой, а сами эти параметры естественным образом коррелируют с независимыми цветовыми качествами у человека-трихромата: тоном (hue), насыщенностью (saturation) и светлотой/яркостью (lightness/brightness). Обе модели обладают свойством замкнутости при перемножении произвольного числа членов этого семейства и при возведении кривой в степень с любым положи-



Рис. 16. Цветовые тела моделей $a - M_G^*$; $6 - M_M^*$; $e - M_{G^\circ}$ для эквиэнергетического источника света в системе координат proLab. Для сравнения приведено также c – полное цветовое тело Лютера–Нюберга.

тельным показателем, что создает возможность производить оценку цветовых параметров излучения (первичного от источника или отраженного телом) аналитически — и при вычислении цветности источника, и при оценивании триады цветовых характеристик тела. Кроме того, для ГСМ авторы показали, что она, подобно ЛСМ, позволяет аналитически оценивать характеристики спектра по реакциям сенсора. В отличие от ЛСМ речь идет о приближенном решении, но численные эксперименты показали, что ошибка такой аппроксимации в 4 раза меньше, чем ошибка цветовоспроизведения, обеспечиваемая сенсором реальной камеры (фотоаппарата Canon).

Полученные для ГСМ результаты стимулировали произвести сравнительный численный анализ ее поведения в задаче предсказания цветности окраски под эквиэнергетическим освещением (при известном цвете источника) по цвету, наблюдаемому под другим источником, причем сравнение проводилось с двумя ЛСМ (трехзональной и Ли) для репрезентативной (552 образца) базы окрасок и двух семейств их освещения

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

("натурального" и планковского). Выведенные в таблицу 1 итоги моделирования по предложенным авторами алгоритмам демонстрируют лидерство ГСМ по всем вариантам испытаний: только у ГСМ не было зафиксировано ни одной серии экспериментов, где метрика оценки точности (в сравнении с "наивным аконстантным" алгоритмом) была бы меньше единицы, что говорит о практической перспективности использования ГСМ ("улучшенной" версии) для решения задач цветовой константности.

Наряду с перечисленными достоинствами, у ГСМ есть существенный недостаток: невозможность представительства излучений пурпурного сектора (семейства бимодальных спектров вида линейной смеси излучений насыщенного синего и красного цветов). Попытки разрешить проблемы ГСМ с описанием пурпурных излучений завершились созданием трех модификаций исходного ее базиса, где одна из версий — модель так называемой "периодизованной" ГСМ Логвиненко — оценена наилучшей в категории "объем цветового охвата", от нее весьма незначительно отстала модель ФСМ, мультипликативно замкнутая (МЗСМ). ГСМ в варианте Логвиненко не принадлежит числу МЗСМ, не фигурировала в качестве конкурента для ФСМ, перспективные для технического внедрения свойства которой продемонстрированы в последнем разделе статьи, где рассматривается работоспособность ФСМ в задаче оценки цветности доминирующего освещения по картине цветовых изменений (оценка параметра насыщенности) излучения, отражаемого из разных точек окрашенной складчатой поверхности. Компьютерный эксперимент, основанный на реальных спектрометрических данных для семи "гофрированных" разноокрашенных тканей, показал. что авторский (2007 г.) алгоритм оценки иветности источника с учетом переотражений в складках (аппроксимация суммы степенного ряда кривых отражательной способности одним членом в степени *n* интервала n > 1) можно охарактеризовать рекомендуемым в качестве схемы решения задачи ЦК для сцен, где в качестве единственно возможного ее ключа (признака цветности источника) в наличии только карта рефлексов в неплоской сцене.

В силу двух этих независимых требований – полноты представительства излучений, отраженных фиксированным источником для стандартного наблюдателя, – в цветовом теле Лютера– Нюберга, в сочетании с не ставшим стандартным для разработчиков процедур ЦК одним из ключевых признаков в гетерархических ее схемах (где системой проверок – в зависимости от свойств сцены – выбирается максимально подходящий признак цветности доминирующего источника) из числа предложенных МЗСМ именно фонмизесовская спектральная модель может быть рекомендована для практического внедрения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-29-09075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Николаев П.П. Гауссовская модель и процедуры цветовой константности для сцен двойного освещения. І. Цветность и светлота. *Сенсорные системы*. 2007а. Т. 21 № 3. С. 195–214.
- Николаев П.П. Модель константности цветовосприятия для случая непрерывных спектральных функций. *Биофизика*. 1985. Т. 30. № 1. С. 112–117.
- Николаев П.П. О новых методах оценки цветности освещения в алгоритмах цветовой константности. *Сенсорные системы.* 20076. Т. 21. № 1. С. 29–44.
- Николаев П.П. Трихроматическая модель константности восприятия окраски объектов. *Биофизика*. 1989. Т. 34. № 2. С. 287–294.
- Николаев П.П., Карпенко С.М., Николаев Д.П. Спектральные модели цветовой константности: правила отбора. *Труды Института системного анализа*

Российской академии наук (ИСА РАН). 2008. Т. 38. С. 322–335.

- Николаев П.П., Николаев Д.П. Модели константного зрительного восприятия. III. Спектральные и перцептивные инварианты в процедурах зрительной обработки. *Сенсорные системы*. 1997. Т. 11. № 2. С. 181–204.
- Нюберг Н.Д., Бонгард М.М., Николаев П.П. О константности восприятия окраски І. *Биофизика*. 1971а. Т 16. № 2. С. 285–293.
- Нюберг Н.Д., Николаев П.П., Бонгард М.М. О константности восприятия окраски II. *Биофизика*. 1971б. Т. 16. № 6. С. 1052–1063.
- Bianco S., Bruna A.R., Naccari F., Schettini R. Color correction pipeline optimization for digital cameras. *Journal of Electronic Imaging*. 2013. V. 22 (2). P. 1–11. https://doi.org/10.1117/1.JEI.22.2.023014
- Brill M.H. A device performing illuminant-invariant assessment of chromatic relations. *Journal of Theoretical Biology*. 1978. V. 71 (3). P. 473–478. https://doi.org/10.1016/0022-5193(78)90175-3
- Brill M.H. Further features of the illuminant-invariant trichromatic photosensor. *Journal of Theoretical Biology*. 1979. V. 78 (2). P. 305–308. https://doi.org/10.1016/0022-5193(79)90271-6
- Brill M.H. The relation between the color of the illuminant and the color of the illuminated object. *Color Research* & *Application*. 1995. V. 20 (1). P. 70–76. https://doi.org/10.1002/col.5080200112
- Brill M.H., West G. Chromatic adaptation and color constancy: A possible dichotomy. *Color Research & Application*. 1986. V. 11 (3). P. 196–204. https://doi.org/10.1002/col.5080110306
- Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception. *Journal of the Franklin Institute*. 1980. V. 310 (1). P. 1–26.
 - https://doi.org/10.1016/0016-0032(80)90058-7
- Can Karaimer H., Brown M.S. Improving color reproduction accuracy on cameras. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. P. 6440–6449.

https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00674

- Cohen J. Dependency of the spectral reflectance curves of the munsell color chips. *Psychonomic Science*. 1964. V. 1 (1). P. 369–370. https://doi.org/10.3758/BF03342963
- Finlayson G.D., Mackiewicz M., Hurlbert A. Color correction using root-polynomial regression. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015. V. 24 (5). P. 1460–1470. https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2405336
- Gijsenij A., Gevers T., Van De Weijer J. Computational color constancy: Survey and experiments. *IEEE Transactions* on *Image Processing*. 2011. V. 20 (9). P. 2475–2489. https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2118224
- Gusamutdinova N., Ershov E., Gladilin S., Nikolaev D. Verification of applicability two multiplicative closed spectral models for multiple reflection effect description. *Proc. SPIE 10253, 2016 International Conference*
on Robotics and Machine Vision. 2017. V. 10253. P. 16–20. https://doi.org/10.1117/12.2266404

- Ives H.E. The relation between the color of the illuminant and the color of the illuminated object. *Transactions of* the Illuminating Engineering Society. 1912. V. 7. P. 62–72.
- Konovalenko I.A., Smagina A.A., Nikolaev D.P., Nikolaev P.P. Prolab: perceptually uniform projective colour coordinates system. *IEEE Access.* 2021. V. 9. P. 133023–133042. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115425
- Kordecki A. Practical testing of irradiance-independent camera color calibration. Proc. SPIE 11041, Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018). 2019. V. 11041. P. 340–345. https://doi.org/10.1117/12.2522907
- Krinov E.L. Spectral reflectance properties of natural formations. Technical report. National Research Council of Canada. 1953. 268 p.
- Land E.H., McCann J.J. Lightness and retinex theory. *J. Opt. Soc. Am.* 1971. V. 61 (1). P. 1–11. https://doi.org/10.1364/JOSA.61.000001
- Lee S.D., Kim C.Y., Seo Y.S. Linear model of surface and scanner characterization method. *Proc. SPIE 2414, Device-Independent Color Imaging II.* 1995. V. 2414. P. 84–93.

https://doi.org/10.1117/12.206536

- Logvinenko A.D. Object-colour manifold. International Journal of Computer Vision. 2013. V. 101 (1). P. 143–160. https://doi.org/10.1007/s11263-012-0555-2
- Macleod D.I., Golz J.A. Computational Analysis of Colour Constancy. In Rainer Mausfeld & Dieter Heyer (eds.), *Colour Perception: Mind and the Physical World*. Oxford University Press, 2003. P. 205–246. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198505006.001.0001
- Maloney L.T. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *J. Opt. Soc. Am. A.* 1986a. V. 3 (10). P. 1673–1683. https://doi.org/10.1364/JOSAA.3.001673
- Maloney L.T., Wandell B.A. Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance. J. Opt. Soc. Am. A. 19866. V. 3 (1). P. 29–33. https://doi.org/10.1364/JOSAA.3.000029
- Maloney L.T. Physics-based approaches to modeling surface color perception. In K. R. Gegenfurtner, & L. T. Sharpe (Eds.), *Color vision: From genes to perception*. Cambridge University Press, 1999. P. 387–422.
- Marimont D.H., Wandell B.A. Linear models of surface and illuminant spectra. J. Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9 (11). P. 1905–1913. https://doi.org/10.1364/JOSAA.9.001905
- Mirzaei H., Funt B. Object-color-signal prediction using
- wraparound gaussian metamers. J. Opt. Soc. Am. A. 2014. V. 31 (7). P. 1680–1687. https://doi.org/10.1364/JOSAA.31.001680
- Mizokami Y., Webster M.A. Are gaussian spectra a viable perceptual assumption in color appearance? J. Opt. Soc.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

Am. A. 2012. V. 29 (2). P. A10–A18. https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.000A10

Nelder J.A., Mead R.A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. 1965. V. 7 (4). P. 308– 313.

https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308

- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P. Comparative analysis of gaussian and linear spectral models for colour constancy. Proceedings of 19th European Conference on Modelling and Simulation. 2005. P. 300–305.
- Nikolaev D.P., Nikolaev P.P. On spectral models and colour constancy clues. *Proceedings of 21st European Conference on Modelling and Simulation*. 2007. P. 318–323.
- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P. Linear color segmentation and its implementation. *Computer Vision and Image Understanding. Special Issue: Colour for Image Indexing and Retrieval.* 2004. V. 94 (1). P. 115–139. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2003.10.012
- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P., Bozhkova V.P. Efficiency comparison of analytical gaussian and linear spectral models in the same colour constancy framework. *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.* 2006. V. 7 (3). P. 21–36.
- Parkkinen J.P.S., Hallikainen J., Jaaskelainen T. Characteristic spectra of munsell colors. J. Opt. Soc. Am. A. 1989. V. 6 (2). P. 318–322. https://doi.org/10.1364/JOSAA.6.000318
- Sällström P. Color and physics: Some remarks concerning the physical aspects of human colour vision. Technical Report 9. Un. Stockholm Inst. of Phys. 1973.
- Smagina A., Ershov E., Grigoryev A. Multiple light source dataset for colour research. Proc. SPIE 11433, Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019). 2020. V. 11433. P. 635–642. https://doi.org/10.1117/12.2559491
- Stiles W.S., Wyszecki G.W. Counting metameric object colors. J. Opt. Soc. Am. 1962. V. 52 (3). P. 313–328. https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000313
- Stokes M., Anderson M., Chandrasekar S., Motta R. A standard default color space for the internet – srgb, version 1.10. Technical report. International Color Consortium. 1996.
- Vazquez-Corral J., Connah D., Bertalmío M. Perceptual color characterization of cameras. *Sensors*. 2014. V. 14 (12). P. 23205–23229. https://doi.org/10.3390/s141223205
- Vrhel M.J., Gershon R., Iwan L.S. Measurement and analysis of object reflectance spectra. *Color Research & Application*. 1994. V. 19 (1). P. 4–9. https://doi.org/10.1111/j.1520-6378.1994.tb00053.x
- Weinberg J.W. The geometry of colors. *General Relativity* and Gravitation. 1976. V. 7 (1). P. 135–169. https://doi.org/10.1007/BF00762021
- Yilmaz H. Color Vision and a New Approach to General Perception. In Bernard E.E., Kare M.R. (eds)*Biological Prototypes and Synthetic Systems*. Springer, Boston, MA., 1962. P. 126–141. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1716-6 22

Multiplicatively Closed Spectral Models in Color Analysis

D. P. Nikolaev^{a,#}, I. A. Konovalenko^a, and P. P. Nikolaev^a

^a Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) 127051 Moscow, B. Karetny per., 19, Russia

[#]E-mail: dimonstr@iitp.ru

This paper describes methods and tools used in research on color perception. The latter is an integral part of the visual system which should objectively expose the observed scenes. A number of substantial examples regarding the construction of low-parameter spectral representations are provided. Such representations, referred to as spectral models, establish a formal link between luminosity and sensor response spaces. The main types of spectral models including intra-type modifications are explained and illustrated by the examples along with the analysis of advantages and disadvantages. We specify and justify the restrictions on the physical and optical characteristics of a scene registered by a sensor as well as approximation alternatives for spectral models of the scene's elements. Restrictions and approximations simplify the inverse problem, ensuring its solvability since in the general case, such a problem cannot be solved. In the context of the requirements for spectral models, the issues related to the modeling of color constancy phenomena as well as the camera calibration problem are considered. The advantages of the Gaussian spectral model (as nonlinear and multiplicatively closed), when compared to optimal linear models, are discussed. We also describe three modifications of the Gaussian model which extend the color gamut, since the original model does not reproduce the colors of the magenta segment. In terms of the Gaussian model – with a transition to the optimizing properties of the von Mises model – we describe a method for the chromaticity estimation of the source based on a color picture of internal interreflections within a set of multicolored folded samples. We illustrate the method via numerical experiments employing real spectral data. The manuscript combines an analysis of theoretical premises with a discussion of the results of numerical modeling and physical experiment.

Key words: spectral models, Gaussian spectral model, von Mises spectral model, closure under multiplication, color analysis, color gamut, color constancy, color sensor calibration, fold reflexes

REFERENCES

- Nikolaev P.P. Gaussovskaja model' i procedury cvetovoj konstantnosti dlja scen dvojnogo osveshhenija. I. Cvetnost' i svetlota [Gaussian Spectral Model and Colour Constancy Procedures in Scenes under Double Illumination. I. Chromaticity and Lightness]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2007. V. 21 (3). P. 195–214 (in Russian).
- Nikolaev P.P. Model' konstantnosti cvetovosprijatija dlja sluchaja nepreryvnyh spektral'nyh funkcij [Color Perception Constancy Model for the Case of Continuous Spectral Functions]. *Biofizika* [Biophysics]. 1985. V. 30 (1). P. 112–117 (in Russian).
- Nikolaev P.P. O novyh metodah ocenki cvetnosti osveshhenija v algoritmah cvetovoj konstantnosti [About New Estimation Methods for Primary Illuminant Chromaticity in Colour Constancy Algorithms]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2007. V. 21 (1). P. 29–44 (in Russian).
- Nikolaev P.P. Trihromaticheskaja model' konstantnosti vosprijatija okraski ob"ektov [Trichromatic model of object color perception constancy]. *Biofizika* [Biophysics]. 1989. V. 34 (2). P. 287–294 (in Russian).
- Nikolaev P.P., Karpenko S.M., Nikolaev D.P. Spektral'nye modeli cvetovoj konstantnosti: pravila otbora [Spectral models of color constancy: selection rules]. Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossijskoj akademii nauk (ISA RAN) [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (ISA RAS)]. 2008. V. 38. P. 322–335 (in Russian).

- Nikolaev P.P., Nikolaev D.P. Modeli konstantnogo zritel'nogo vosprijatija. III. Spektral'nye i perceptivnye invarianty v procedurah zritel'noj obrabotki [The models of constant visual perception. III. Spectral and perceptive invariants in image processing]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 1997. V. 11 (2). P. 181–204 (in Russian).
- Njuberg N.D., Bongard M.M., Nikolaev P.P. O konstantnosti vosprijatija okraski.I [On the constancy of color perception.I] *Biofizika* [Biophysics]. 1971. V 16 (2). P. 285–293 (in Russian).
- Njuberg N.D., Nikolaev P.P., Bongard M.M. O konstantnosti vosprijatija okraski.II [On the constancy of color perception.II] *Biofizika* [Biophysics]. 1971. V. 16 (6). P. 1052–1063 (in Russian).
- Bianco S., Bruna A.R., Naccari F., Schettini R. Color correction pipeline optimization for digital cameras. *Journal of Electronic Imaging*. 2013. V. 22 (2). P. 1–11. https://doi.org/10.1117/1.JEI.22.2.023014
- Brill M.H. A device performing illuminant-invariant assessment of chromatic relations. *Journal of Theoretical Biology*. 1978. V. 71 (3). P. 473–478. https://doi.org/10.1016/0022-5193(78)90175-3
- Brill M.H. Further features of the illuminant-invariant trichromatic photosensor. *Journal of Theoretical Biology*. 1979. V. 78 (2). P. 305–308. https://doi.org/10.1016/0022-5193(79)90271-6
- Brill M.H. The relation between the color of the illuminant and the color of the illuminated object. *Color Research*

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

& Application. 1995. V. 20 (1). P. 70–76. https://doi.org/10.1002/col.5080200112

- Brill M.H., West G. Chromatic adaptation and color constancy: A possible dichotomy. *Color Research & Application*. 1986. V. 11 (3). P. 196–204. https://doi.org/10.1002/col.5080110306
- Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception. *Journal of the Franklin Institute*. 1980. V. 310 (1). P. 1–26. https://doi.org/10.1016/0016-0032(80)90058-7
- Can Karaimer H., Brown M.S. Improving color reproduction accuracy on cameras. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 6440–6449. http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2018.00674
- Cohen J. Dependency of the spectral reflectance curves of the munsell color chips. *Psychonomic Science*. 1964. V. 1 (1). P. 369–370. https://doi.org/10.3758/BF03342963
- Finlayson G.D., Mackiewicz M., Hurlbert A. Color correction using root-polynomial regression. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015. V. 24 (5). P. 1460–1470. https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2405336
- Gijsenij A., Gevers T., Van De Weijer J. Computational color constancy: Survey and experiments. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011. V. 20 (9). P. 2475–2489. https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2118224
- Gusamutdinova N., Ershov E., Gladilin S., Nikolaev D. Verification of applicability two multiplicative closed spectral models for multiple reflection effect description. Proc. SPIE 10253, 2016 International Conference on Robotics and Machine Vision. 2017. V. 10253. P. 16–20.

https://doi.org/10.1117/12.2266404

- Ives H.E. The relation between the color of the illuminant and the color of the illuminated object. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. 1912. V. 7. P. 62– 72.
- Konovalenko I.A., Smagina A.A., Nikolaev D.P., Nikolaev P.P. Prolab: perceptually uniform projective colour coordinates system. *IEEE Access.* 2021. V. 9. P. 133023–133042. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115425
- Kordecki A. Practical testing of irradiance-independent camera color calibration. *Proc. SPIE 11041*, Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018). 2019. V. 11041. P. 340–345. https://doi.org/10.1117/12.2522907
- Krinov E.L. Spectral reflectance properties of natural formations. Technical report. *National Research Council of Canada*. 1953. 268 p.
- Land E.H., McCann J.J. Lightness and retinex theory. *J. Opt. Soc. Am.* 1971. V. 61 (1). P. 1–11. https://doi.org/10.1364/JOSA.61.000001
- Lee S.D., Kim C.Y., Seo Y.S. Linear model of surface and scanner characterization method. Proc. SPIE 2414, Device-Independent Color Imaging II. 1995. V. 2414.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

P. 84-93.

https://doi.org/10.1117/12.206536

- Logvinenko A.D. Object-colour manifold. *International Journal of Computer Vision*. 2013. V. 101 (1). P. 143–160. https://doi.org/10.1007/s11263-012-0555-2
- Macleod D.I., Golz J.A. Computational Analysis of Colour Constancy. In Rainer Mausfeld & Dieter Heyer (eds.), Colour Perception: Mind and the Physical World. Oxford University Press, 2003. P. 205–246. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198505006.001.0001
- Maloney L.T. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters. *J. Opt. Soc. Am. A.* 1986. V. 3 (10). P. 1673–1683. https://doi.org/10.1364/JOSAA.3.001673
- Maloney L.T., Wandell B.A. Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance. J. Opt. Soc. Am. A. 1986. V. 3 (1). P. 29–33. https://doi.org/10.1364/JOSAA.3.000029
- Maloney L.T. Physics-based approaches to modeling surface color perception. In K. R. Gegenfurtner, & L.T. Sharpe (Eds.), Color vision: From genes to perception. Cambridge University Press, 1999. P. 387–422.
- Marimont D.H., Wandell B.A. Linear models of surface and illuminant spectra. J. Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9 (11). P. 1905–1913. https://doi.org/10.1364/JOSAA.9.001905
- Mirzaei H., Funt B. Object-color-signal prediction using wraparound gaussian metamers. J. Opt. Soc. Am. A. 2014. V. 31 (7). P. 1680–1687. https://doi.org/10.1364/JOSAA.31.001680
- Mizokami Y., Webster M.A. Are gaussian spectra a viable perceptual assumption in color appearance? J. Opt. Soc. Am. A. 2012. V. 29 (2). P. A10–A18. https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.000A10
- Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. 1965. V. 7 (4). P. 308– 313.

https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308

- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P. Comparative analysis of gaussian and linear spectral models for colour constancy. Proceedings of 19th European Conference on Modelling and Simulation. 2005. P. 300–305.
- Nikolaev D.P., Nikolaev P.P. On spectral models and colour constancy clues. Proceedings of 21st European Conference on Modelling and Simulation. 2007. P. 318–323.
- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P. Linear color segmentation and its implementation. Computer Vision and Image Understanding. Special Issue: Colour for Image Indexing and Retrieval. 2004. V. 94 (1). P. 115–139. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2003.10.012
- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P., Bozhkova V.P. Efficiency comparison of analytical gaussian and linear spectral models in the same colour constancy framework. *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.* 2006. V. 7 (3). P. 21–36.
- Parkkinen J.P.S., Hallikainen J., Jaaskelainen T. Characteristic spectra of munsell colors. J. Opt. Soc. Am. A.

1989. V. 6 (2). P. 318–322. https://doi.org/10.1364/JOSAA.6.000318

- Sällström P. Color and physics: Some remarks concerning the physical aspects of human colour vision. Technical Report 9. Un. Stockholm Inst. of Phys. 1973.
- Smagina A., Ershov E., Grigoryev A. Multiple light source dataset for colour research. Proc. SPIE 11433, Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019). 2020. V. 11433. P. 635–642. https://doi.org/10.1117/12.2559491
- Stiles W.S., Wyszecki G.W. Counting metameric object colors. J. Opt. Soc. Am. 1962. V. 52 (3). P. 313–328. https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000313
- Stokes M., Anderson M., Chandrasekar S., Motta R. A standard default color space for the internet – srgb, version 1.10. Technical report. *International Color Consortium*. 1996.

- Vazquez-Corral J., Connah D., Bertalmío M. Perceptual color characterization of cameras. *Sensors*. 2014. V. 14 (12). P. 23205–23229. https://doi.org/10.3390/s141223205
- Vrhel M.J., Gershon R., Iwan L.S. Measurement and analysis of object reflectance spectra. *Color Research & Application*. 1994. V. 19 (1). P. 4–9. https://doi.org/10.1111/j.1520-6378.1994.tb00053.x
- Weinberg J.W. The geometry of colors. *General Relativity* and Gravitation. 1976. V. 7(1). P. 135–169. https://doi.org/10.1007/BF00762021
- Yilmaz H. Color Vision and a New Approach to General Perception. In Bernard E.E., Kare M.R. (eds) *Biological Prototypes and Synthetic Systems*. Springer, Boston, MA., 1962. P. 126–141. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1716-6_22

УДК 616-073.756.8+004.8

О МОНИТОРИНГОВОМ ПОДХОДЕ К ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

© 2022 г. М. В. Чукалина^{1,2,*}, А. С. Ингачева^{2,3}, К. Б. Булатов^{2,4}, К. О. Кутукова⁵, Э. Чех⁵, В. В. Арлазаров^{2,4}

¹ ФНИЦ Кристаллография и фотоника 119333 Москва, Ленинский проспект, 59, Россия
 ² Смарт Энджинс Сервис 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, 9, Россия
 ³ Институт проблем передачи информации РАН 127051 Москва, Большой каретный пер., 19, Россия
 ⁴ ФИЦ ИУ РАН 119333 Москва, 60-летия Октября, 9, Россия
 ⁵ deepXscan GmbH, Дрезден, Германия
 *E-mail: chukalinamarina@gmail.com
 Поступила в редакцию 14.01.2022 г.
 После доработки 28.01.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Метод рентгеновской томографии находит широкое применение в медицине, промышленности, таможенном контроле и, конечно, в научных исследованиях, как неразрушающий метод визуализации внутренней морфологической структуры исследуемых объектов. Каждое из применений накладывает на метод свои ограничения. Так, медицинские применения требуют ограничения дозовой нагрузки на организм, а использование на таможне требует сокращения времени досмотра. Недавно нами был предложен принципиально новый подход к работе с томографическими данными, названный мониторинговой реконструкцией. От классического двухэтапного "съемка по заданному протоколу – реконструкция" предложенный подход отличается тем, что реконструкция цифрового изображения начинает выполняться после съемки нескольких первых проекций (пачки проекций). Следующим этапом проводится анализ промежуточного результата и автоматически принимается решение продолжить съемку следующей "пачки" проекций, или рассматривать результат как финальный и остановить процесс съемки. В статье детально обсуждаются основные принципы мониторингового подхода, определяются функция суммарных потерь, стоимость ошибки реконструкции, стоимость наблюдений. Рассмотрены параметры, влияющие на вид функции стоимости наблюдений в зависимости от области применения метода. Проанализированы результаты модельного мониторингового эксперимента с использованием проекций, собранных на томографической установке с нанометровым разрешением. Показано, что применение подхода мониторинговой реконструкции к данным модельного эксперимента позволило в среднем на 10% уменьшить число требуемых проекций для достижения 5%-ного отклонения от "точного" ответа, по сравнению со случаем классического двухэтапного подхода.

Ключевые слова: рентгеновская томография, двухэтапная реконструкция, мониторинговая реконструкция, стоимость наблюдения, функция суммарных потерь

DOI: 10.31857/S0235009222020032

введение

Метод компьютерной томографии предназначен для визуализации внутренней структуры объектов неразрушающим образом. Термин "неразрушающее исследование" при рентгеновском зондировании связан с понятиями радиационной безопасности и дозовой нагрузки (Постановление, 2009). Допустимая дозовая нагрузка на человека, помещенного в рентгеновский томограф медицинского назначения (диагностический или терапевтический) (Оta, 2022), или на объекты, помещенные в томографические дефектоскопы (Riis, 2018), установки для контроля багажа (Manerikar, 2021) и исследовательские томографы, существенно различается.

Вопросы оптимизации дозовой нагрузки и времени проведения исследования, которое включает зондирование объекта плюс максимально точную реконструкцию 3D цифрового изображения объекта (Симонов, 2017), являются актуальными по сегодняшний день. Дозовая нагрузка и точность реконструкции связаны между собой, поскольку уменьшение дозовой нагрузки означает либо уменьшение числа регистрируемых томографических проекций (Riis, 2021), либо сокращение времени регистрации одной проекции (Dixon, 2003). В том и в другом случае результат томографической реконструкции с применением классических алгоритмов, типа методов свертки и обратной проекции FBP или FDK (Buzung, 2008), становится непредсказуемым по точности. Поэтому наряду с созданием новых измерительных томографических схем постоянно ведется разработка новых алгоритмов реконструкции, удовлетворяющих требованиям по точности (Dabli, 2021) и быстродействию (Nourazar, 2021).

В данной работе мы исследуем новый мониторинговый подход к томографии (Bulatov, 2020), в котором оптимальность выбранной измерительной схемы и оптимальность применяемого для реконструкции алгоритма могут влиять непосредственно на дозовую нагрузку. Чтобы описать преимущества мониторингового подхода, опишем сначала классический. Классический полход к проведению томографического исследования предполагает последовательное выполнение двух этапов. На первом этапе объект помещается в томограф, и сканирование объекта ведется согласно заданному протоколу. На получаемой в ходе сканирования рентгенограмме могут быть распланированы срезы, подлежащие реконструкции (Хофер, 2010). На втором этапе все рентгенограммы (томографические проекции) передаются в вычислитель, где выполняется второй этап – томографическая реконструкция. Аппаратная и "программная" части метода сегодня уже могут быть разделены. Создатели программного обеспечения предлагают на рынке решения, которые позволяют производителям томографического оборудования подключать ПО непосредственно к измерительной аппаратуре. Однако зафиксированный протокол измерения фиксирует и дозовую нагрузку на объект, т.е. для создания оптимизированного с точки зрения дозовой нагрузки протокола съемки необходимо обладать максимально доступной информацией, не только об измерительной части, но и об объекте исследования (Prodi, 2021). Проиллюстрируем это на примере. Во время дентальной томографической съемки пациенту плохо зафиксировали челюсть. При условии дрожания или шевеления челюстью порождаются некачественные проекции, которые будут переданы на реконструкцию. Качество реконструкции не удовлетворяет врача и, как правило, такому пациенту будет назначено повторное сканирование. Как результат – удвоится дозовая нагрузка. Причем неудовлетворительное сканирование не всегда найдет свое место в системе мониторинга количества сканирований. Если бы томографическая реконструкция началась после съемки первых нескольких проекций, то факт плохой фиксации челюсти можно было бы отследить. Мониторинговый подход в томографии предполагает следующую модель томографического процесса. Данная модель описывает процесс томографической реконструкции anytime алгоритмом. Any-time алгоритм – это алгоритм, который может вернуть действительное решение проблемы, даже если выполнение алгоритма было прервано до его завершения. Например, останов в работе алгоритма произошел в момент, когда стоимость дальнейших вычислений (с точки зрения времени или других параметров) стала высокой по отношению к стоимости ошибки. Тогда задача томографии формулируется следующим образом. Необходимо автоматически определить точку остановки при регистрации рентгенограмм, которая соответствует одному из двух случаев: достигнута ли требуемая точность реконструкции для зондируемого объекта и получено ли заключение о невозможности достигнуть заданной точности. Так как точность реконструкции, которая зависит не только от количества собранных проекций (что оказывается определяющим), не может непрерывно расти, то в текущих условиях съемки конкретного объекта существует минимально требуемое количество проекционных углов для достижения требуемой точности, или точность никогда не будет достигнута.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель процесса мониторинговой реконструкции

Рассмотрим процесс томографической реконструкции как процесс с контролируемым результатом. Основы данного подхода детально описаны в работе (Bulatov, 2020). Задача мониторинговой реконструкции может быть сформулирована следующим образом: необходимо остановить процесс томографического сканирования ровно в тот момент, когда достигнута требуемая точность реконструкции, но еще не достигнут предел допустимого значения стоимости измерений.

Стоимость томографичеких измерений будем описывать некоторой функцией. Вид этой функции определяется областью, в которой применяется томографический метод, и вид функции будет отличаться от применения к применению. Чтобы разъяснить ситуацию, рассмотрим два примера применения. Первый пример – в томограф помещается живой объект. Величина радиационной нагрузки (Little, 2022) начинает играть решающую роль, т.е. измерение дополнительной проекции должно увеличивать значение функции стоимости. Второй пример – рассмотрим случай томографических измерений с высоким разрешением. Для индустриальных приложений решающим становится вопрос времени сканирования. Измерение объекта размером пять микрон с разрешением десять нанометров на источнике синхротронного излучения заняло полтора часа (Andrade, 2021). На лабораторном томографе в схожей оптической схеме результаты с нанометровым разрешением удается получить за десятки часов. Количество проекционных углов в используемых протоколах сканирования было равно нескольким тысячам. Такие условия делают неприемлемым использование томографического метода сегодня в качестве диагностического инструмента для контроля с высоким разрешением внутренней структуры функциональных приборов в полупроводниковой и микроэлектронной промышленности. Во втором случае функция стоимости должна описывать время. Причем для разных томографических установок время будет разным. Для томографов с быстрой автоматической юстировкой это только время измерения одной проекции. В противном случае время юстировки системы источник-образец-детектор для

очередного проекционного угла суммируется со

временем измерения проекции.

К вопросу точности томографической реконструкции обращались и обращаются множество исследователей на протяжении нескольких десятилетий (Hartepep, 1990; Gladilin, 2014; Nikolaev, 2016; Симонов, 2017; Mitsuyama, 2022). Точность томографической реконструкции, например, медицинских изображений, легко оценить, если измерения проводились на антропоморфных тканеэквивалентных фантомах. Проводят сравнение 3D распределения КТ-индексов фантома и результата реконструкции. Однородность областей восстановленного объема можно оценить интегрально на всем восстановленном объеме или только в отдельных интересующих врача областях; если в объекте произошло смещение, его легко локализовать; определить четкость края границы и прочее. Каждый из перечисленных признаков на медицинском изображении говорит о наличии или об отсутствии у пациента фактора риска или группы факторов. Приведенный выше список параметров является репрезентативной, но сильно укороченной версией полного списка, параметрами которого можно охарактеризовать медицинское изображение. Значения этих параметров врачи анализируют при постановке диагноза (Хофер, 2010). Измерения на фантомах используются при построении функциональной зависимости величины интегрального или локального критерия, используемого для оценки точности реконструкции, от параметров режима съемки томографа (напряжения, тока). Для исследования патологий анатомических структур (шеи, головы, грудной клетки или брюшной полости) используются разные локальные критерии. В данной статье мы не будем останавливаться на классификации интегральных и локальных критериев точности реконструкции, а воспользуемся далее в численных экспериментах абсолютным значением среднеквадратичного отклонения восстановленного изображения ОТ

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

"идеала". Поскольку проведенный нами численный эксперимент не включает измерений на фантомах, определение "идеала" будет дано в разделе описания численного эксперимента. Таким образом, нами введены понятия функции стоимости измерений и точности реконструкции. Чтобы формализовать задачу мониторинговой реконструкции объекта θ по проекциям X, регистрируемым последовательно, но согласно реализуемому протоколу, определим функцию суммарных потерь L:

$$L_n(\theta, x_1, ..., x_n) = \epsilon(R_n(x_1, ..., x_n)) + c_n(x_1, ..., x_n).$$
(1)

Здесь $\theta \in \Theta$ — объект исследования, *n* — текущее число уже собранных от объекта проекций, R_n — изображение, восстановленное по *n* проекциям, ϵ — ошибка реконструкции, c_n — суммарная стоимость проведенных *n* измерений. Ошибкой реконструкции далее будем называть абсолютное значение среднеквадратичного отклонения текущего восстановленного изображения от "идеала" R^{ideal} :

$$RSRE(R_n, R^{ideal}) = \left\| R_n - R^{ideal} \right\|_2.$$
(2)

Если любой новый сканируемый объект с высокой степенью точности аппроксимировать каким-то фантомом из набора доступных фантомов, то протоколы съемки можно табулировать, решив для каждого из фантомов единожды задачу (1) для функций ошибки и стоимости фиксированного вида. Это и есть путь построения протокола для томографического устройства-дефектоскопа, установленного на производственном конвейере, но наборы томографических проекций, собранных во время сканирования людей, различаются. Во-первых, анатомическое строение каждого отдельного человека отличается в той или иной мере от антропоморфного фантома. Во-вторых, как было упомянуто во введении со ссылкой на стоматологический случай, человеку бывает трудно находиться в неподвижном состоянии. Наборы проекций, снятые на одном и том же приборе в одном и том же режиме, порой для одного и того же человека, оказываются различны, т.е. вектор собранных проекций – величина случайная. Для того, чтобы восстанавливать изображения с заданной точностью, может потребоваться разное число проекций при разных томографических съемках.

Модель процесса реконструкции с мониторингом, предложенная в работе (Bulatov, 2020), позволяет рассматривать процесс томографической реконструкции как any-time алгоритм. На рис. 1 представлена принципиальная схема anytime алгоритма, которая описывается последовательностью шагов:

 регистрация нескольких томографических проекций (количество проекций является вход-



Рис. 1. Принципиальная схема, иллюстрирующая работу any-time алгоритма.

ным параметром алгоритма K, K = 1, 2...), согласно выбранной последовательности проекционных углов;

2 – выполнение реконструкции выбранным алгоритмом реконструкции (Натеррер, 1990; Buzung, 2008);

3 – проверка условий правил остановки;

4 — если условия не выполнены, то переходим к шагу 1; если условия выполнены, то процесс реконструкции завершается.

Наличие функции ошибки $\epsilon(R_n(x_1,...,x_n))$ в выражении суммарных потерь (1) свидетельствует о том, что существует количественная оценка, позволяющая сделать вывод о состоянии решаемой задачи. Все свойства any-time алгоритмов сформулированы и проклассифицированы в работе (Zilberstein, 1996). Из предполагаемого свойства монотонности должно следовать, что значение ошибки уменьшается с увеличением *n*. Это свойство используется для выбора количества проекций, измеряемых за один шаг алгоритма. Невыполнение этого условия может свидетельствовать о возникших во время измерения проекций проблемах и служить указанием к остановке процесса сканирования. Даже при отсутствии ограничений на время вычислений и на объем вычислительных ресурсов можно выделить три основные момента при выборе алгоритма реконструкции в any-time алгоритме. Первый момент связан с используемой схемой сканирования. Для схемы томосинтеза, круговой и спиральной схем, используемых для сбора томографических проекций. разработаны разные алгоритмы. Следующий момент — это уровень шума в измеряемых проекциях. Итерационные методы с регуляризацией являются более устойчивыми при наличии высокого уровня шума. Еще одним важным фактором, который следует учитывать при выборе алгоритма, — это потенциальная возможность проводить

измерения в диапазоне углов от 0 до 180°. Если такой возможности нет, то не следует использовать интегральные методы, поскольку это отодвинет точку остановки от начала съемки.

Описание правил остановки. Как было сказано выше, вектор зарегистрированных томографических проекций – это случайный вектор $X = (X_1, X_2, ...)$. Каждой последовательности зарегистрированных проекций (реализаций) $(x_1, x_2, ..., x_n) \in \chi^n$, собранных от объекта θ , поставим в соответствие результат томографической реконструкции $R_n(x_1,...,x_n)$. Реконструкция выполняется после регистрации K проекций. Пусть K = 1, тогда реконструкция выполняется после очередной вновь измеренной проекции. Для каждого момента времени n мы имеем последовательность функций стоимости наблюдений $C = (c_0, c_1(x_1), c_2(x_1, x_2), ...)$. Причем значение функции стоимости растет с числом проведенных измерений

$$c_n(x_1, x_2, ..., x_n) < c_{n+1}(x_1, x_2, ..., x_n, x_{n+1}).$$
 (3)

Удобно рассмотреть построение правила остановки на конкретном примере. Пусть функция стоимости наблюдений растет пропорционально числу измеренных проекций

$$c_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = cn.$$
 (4)

Данное выражение хорошо описывает множество медицинских приложений томографического метода. Измерение очередной проекции увеличивает полученную пациентом дозу. Если время экспозиции (время измерения одной проекции) постоянно, то увеличение дозовой нагрузки хорошо аппроксимируется выражением (4).

Сформулируем правило остановки последовательностью функций $\phi = (\phi_0, \phi_1(x_1), \phi_2(x_1, x_2), ...),$ определенных на χ^n и $0 \le \phi_n(x_1, x_2, ..., x_n) \le 1, n = 0,$ 1, 2, ... Величина ϕ_0 – это вероятность не собрать ни одной проекции. Если задано правило остановки, то может быть определена случайная величина N, которая определяет момент остановки измерений. Правило остановки — это условная вероятность того, что при собранных проекциях $x_1, x_2, ..., x_n$ останов произойдет в момент времени N. при условии, что не произошел раньше:

$$\phi_n(x_1,...,x_n) = P(N = n | N \ge n, X_1 = x_1,...X_n = x_n).(5)$$

Функции вероятности (вероятность того, что останов произойдет в момент времени *N*) при реализованных наблюдениях (собранных проекциях) $X_1 = x_1, X_2 = x_2, ...$ определяются как $\psi = (\psi_0, \psi_1(x_1), \psi_2(x_1, x_2), ...)$, где

$$\begin{split} \psi_n(x_1,...,x_n) &= P(N = n | X_1 = x_1,...X_n = x_n), \\ \psi_{\infty}(x_1,x_2...) &= P(N = \infty | X_1 = x_1, X_2 = x_2,...). \end{split}$$
(6)

Функции вероятности (вероятность остановки в момент времени N) при реализованных наблюдениях $X_1 = x_1, X_2 = x_2, ...$ и правила остановки связаны следующим соотношением:

 $\psi_0 = \phi_0,$

$$\Psi_{n}(x_{1},...,x_{n}) = \phi_{n}(x_{1},...,x_{n}) \prod_{i=0}^{n-1} (1 - \phi_{i}(x_{1},...,x_{i},)),
\Psi_{\infty}(x_{1},x_{2}...) = 1 - \prod_{i=0}^{\infty} \phi_{i}(x_{1},...,x_{n}).$$
(7)

Задача остановки включает выбор такого правила остановки ϕ , чтобы оно минимизировало ожидаемые потери $V(\phi)$ при любой реализации случайного вектора зарегистрированных проекций:

$$V(\phi) = E\left(\sum_{n=0}^{\infty} \psi_n(X_1, ..., X_n) L(X_1, ..., X_n)\right).$$
 (8)

В терминах случайного времени остановки, ожидаемые потери могут выражаться следующим образом:

$$V(\phi) = L_N(X_1, ..., X_n).$$
 (9)

Одним из специальных случаев задач остановки является класс монотонных задач с конечным горизонтом (Ferguson, 2008). Понятие "задачи с конечным горизонтом" предполагает, что существует шаг, на котором процесс гарантированно остановится. Класс монотонных задач предполагает, в случае, если ожидаемые потери на текущем шаге не превосходят ожидаемых потерь на следующем шаге, то это будет сохраняться на всех последующих шагах процесса. Для монотонных задач остановки существует оптимальное правило, так называемое "близорукое" правило:

$$N = \min\{n \ge 0 : L_n \le E_n(L_{n+1})\},$$
(10)

где L_n — потери на шаге *n*, а E_n — математическое ожидание при условии, что первые *n* наблюдений собраны. В работе (Bulatov, 2019) показано, что в

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

случае, если слагаемое функции суммарных потерь, отражающее точность результата ϵ , представляет из себя расстояние от текущего результата реконструкции до "идеала", согласно некоторой метрике, и если расстояния между соседними результатами реконструкции в той же метрике преимущественно убывают, "близорукое" правило может быть аппроксимировано следующим образом:

$$N_{\Delta} = \min\{n \ge 0 : E_n(\rho(R_n, R_{n+1})) \le E_n(c_{n+1}) - c_n\}. (11)$$

Здесь в левой части неравенства ожидаемое на момент *n* отклонение результата текущей реконструкции от результата на следующем шаге, а в правой части неравенства — ожидаемая стоимость следующего наблюдения. Поскольку расстояния между двумя последовательными результатами томографической реконструкции в терминах используемой метрики (2) уменьшаются со временем, воспользуемся методом прогнозирования одномерных временных рядов. Ожидаемое отклонение близко к отклонению между двумя последними:

$$E_n(||R_n - R_{n+1}||_2) \approx ||R_{n-1} - R_n||_2.$$
(12)

Согласно выбранной выше модели расчета стоимости наблюдений разница между ожидаемым значением функции стоимости на следующем этапе процесса и значением на данном этапе равна константе:

$$E_n(c_{n+1}) - c_n = c. (13)$$

В следующем разделе представлены результаты численного эксперимента, проведенного с использованием набора экспериментальных томографических проекций, собранных на лабораторном нанотомографе (Topal, 2020). Томографируемый объект представлял собой систему на основе переходных металлов (Zang, 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Численный эксперимент по мониторинговой реконструкции

Результат томографической реконструкции системы, выполненный с использованием полного набора проекций. В ходе томографического эксперимента была зарегистрирована 801 проекция. Проекции регистрировались с равномерным шагом, в диапазоне углов 0–180°. Программное обеспечение Smart Engines (https://smartengines.com/ осг-engines/tomo-engine/) было использовано для реконструкции 3D цифрового изображения методом свертки и обратной проекции (рис. 2).

Установка Xradia nano-XCT 100, оснащенная источником рентгеновского излучения с вращающимся анодом (излучение Cu-Kα, энергия фотонов 8 кэВ), использовалась для сбора проекций. Установленная в оптическом тракте зонная



Рис. 2. Результат томографической реконструкции, выполненной с использованием полного набора то-мографических проекций.

пластинка Френеля с фокусным расстоянием 18 см обеспечила пространственное разрешение порядка 65 нм. Фактический размер изображения на сцинтилляционном экране составляет 680 × \times 680 мкм². Система передачи, включающая две линзы с разным увеличением 40× и 10, передает изображение на камеру размером 1024 × 1024 пиксела. Образец размером 35 × 35 × 35 мкм³ был укреплен на вольфрамовой игле. Принципиальная схема томографической установки представлена на рис. 3.

Модельный эксперимент был организован следующим образом. Из полного набора восстановленных горизонтальных сечений объекта были выбраны 136, 143 и 275-й слои. Из рентгенограмм (томографических проекций) были выделены синограммы, используемые далее в модельном эксперименте для реконструкции соответствующих слоев. Динамика изменения морфологии восстановленных сечений в зависимости от количества использованных проекционных углов представлена на рис. 4. Количество использованных для реконструкции проекционных углов было 100, 200, 400 и 800 слева направо соответственно.

Полный набор проекционных углов был использован для определения диапазона изменения константы *c*. Далее для каждой синограммы и каждого значения *c* были рассчитаны моменты остановки с использованием подхода мониторинговой реконструкции. Полученный результат, усредненный по трем сечениям, представлен на рис. 5 кривой красного цвета.

Штрихпунктирная красная линия на рисунке показывает положения выбранных из трех значений максимумов, а красная пунктирная линия – положения минимумов. Точки на кривой, показанной черной толстой пунктирной линией. были рассчитаны следующим образом. Для каждого из значений оси x (это число проекционных углов) выполнялась реконструкция всех трех сечений. Далее рассчитывалась метрика, согласно выражению (2), и полученные значения метрики усреднялись. В качестве "идеала" было использовано изображение соответствующего сечения, восстановленное по синограмме, включающей 801 угол. Тонкая штрихпунктирная черная линия на рисунке описывает расположение максимальных из трех рассчитанных значений метрик для каждого из значений оси абсцисс, а тонкая пунктирная — минимальных значений.

Обратимся к синей точке на красной кривой. Она соответствует случаю X = 672, Y = 0.05, C = = 0.028, т.е. для того, чтобы достигнуть уровня ошибки реконструкции в 5%, апу-time алгоритму потребовалось 672 проекции, чтобы принять решение об останове. Если бы мы восстановили все три сечения, используя для каждого только 672 проекции, то в среднем ошибка составила бы чуть более 10%. Этот случай соответствует точке (672, 0.11) на пунктирной кривой, отмеченной красной стрелкой. Для того, чтобы достигнуть в среднем ошибки в 5%, количество проекций необходимо увеличить до 760. Этот случай соответствует точке (760, 0.05) на пунктирной кривой, отмеченной синей стрелкой.



Рис. 3. Принципиальная схема томографической установки.

о мониторинговом подходе



Рис. 4. Результат реконструкции трех сечений из полного набора проекционных углов. Слева направо: 100, 200, 400 и 801 угол использованы для реконструкции соответственно.



Рис. 5. Сравнение результатов эксперимента с мониторинговой реконструкцией и результатов эксперимента с принудительной остановкой процесса сканирования.

Проведенный эксперимент подтвердил, что использование мониторингового подхода в среднем позволяет уменьшить требуемое количество проекций для достижения требуемой точности реконструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проанализирован мониторинговый подход к работе с данными рентгеновской томографии (Арлазаров, 2021). Метод, поз-

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

воляющий визуализировать внутреннюю морфологическую структуру объектов неразрушаюшим способом (за который в XX веке была присуждена нобелевская премия), в своей классической постановке является двухэтапным. На первом этапе от объекта собирается набор томографических проекций (рентгенограмм) под несколькими углами, называемыми проекционными. На втором этапе выполняется томографическая реконструкция, т.е. восстанавливается 3D (для стационарного объекта) или 4D (для динамического объекта) цифровое изображение. Недавно предложенный в томографии мониторинговый подход (Bulatov, 2020) подразумевает другую последовательность шагов. Процесс описывается any-time моделью, т.е. процесс сканирования может быть остановлен в любой момент, как только собранных проекций хватает для восстановления изображения заданной точности. Правило остановки включает оценку величины функций стоимости наблюдений и ошибки реконструкции.

В данной работе на модельном примере продемонстрировано, что в случае, если томографический процесс может быть рассмотрен как процесс с ограничением на дозовую нагрузку, а степень точности реконструкции контролируется динамикой поведения среднеквадратичного отклонения текущего восстановленного изображения, то алгоритм мониторинговой реконструкции демонстрирует, что в среднем требуется на 10% меньше проекций для достижения 5%-ной ошибки по точности, чем в случае применения классического протокола. В дальнейшем мы планируем исследовать робастность предложенного алгоритма, дополнив эксперимент данными с худшим отношением сигнал-шум, расширить класс используемых метрик и увеличить количество параметров при построении функции стоимости наблюдения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН в части томографической реконструкции, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-26036 мк, 18-29-26019 мк) в части анализа полученных результатов.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

А.С. Ингачева, К.Б. Булатов, К.О. Кутукова, Э. Чех, В.В. Арлазаров внесли существенный вклад в проведение исследования, М.В. Чукалина внесла весомый вклад в написание статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47 "Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09" (вместе с "НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы") (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534).
- Гладилин С.А., Котов А.А., Николаев Д.П., Усилин С.А. Построение устойчивых признаков детекции и классификации объектов, не обладающих характерными яркостными контрастами. *ИТиВС*. 2014. № 1. С. 53–60.
- Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990. 105 с.
- Симонов Е.Н., Аврамов М.В., Аврамов Д.В. Анализ трехмерных алгоритмов реконструкции в рентгеновской компьютерной томографии. Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2017. Т. 17. № 2. С. 24–32. https://doi.org/10.14529/ctcr170202
- Хофер М. *Компьютерная томография*. Базовое руководство. 3-е издание. М.: Медицинская литература, 2010. 232 с.
- Arlazarov V.L., Nikolaev D.P., Arlazarov V.V., Chukalina M.V. X-ray tomography: the way from layer-by-layer radiography. *Computer Optics*. 2021. V. 45 (6). P. 897–906. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-898
 - Andrede V. Nilitin V. Waisile M. Derin A. D
- De Andrade V., Nikitin V., Wojcik M., Deriy A., Bean S., Shu D., Mooney T., Peterson K., Kc P., Li K., Ali S., Fezzaa K., Gürsoy D., Arico C., Ouendi S., Troadec D., Simon P., De Carlo F., Lethien C. Fast X-ray Nanotomography with Sub-10 nm Resolution as a Powerful Imaging Tool for Nanotechnology and Energy Storage Applications. *Adv. Mater.* 2021. V. 33 (21): e2008653. Epub 2021 Apr 19.

https://doi.org/10.1002/adma.20200865333871108

- Bulatov K., Razumnyi N., Arlazarov V.V. On optimal stopping strategies for text recognition in a video stream as an application of a monotone sequential decision model. *IJDAR*. 2019. V. 22 (3). P. 303–314. https://doi.org/10.1007/s10032-019-00333-0
- Bulatov K., Chukalina M., Buzmakov A., Nikolaev D., Arlazarov V.V. Monitored Reconstruction: Computed Tomography as an Anytime Algorithm. *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 110759–110774. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002019
- Buzung T.M. *Computed Tomography*. From photon statistics to modern cone-beam CT. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 521 p.
- Dabli D., Frandon J., Belaouni A., Akessoul P., Addala T., Berny L., Beregi J-P., Greffier J. Optimization of image quality and accuracy of low iodine concentration quantification as function of dose level and reconstruction algorithm for abdominal imaging using dual-source CT: A phantom study. *Diagnostic and Interventional*

190

Imaging. 2021. V. 103 (1). P. 31-40.

https://doi.org/10.1016/j.diii.2021.08.004

- Dixon R.L. A new look at CT dose measurement: Beyond CTDI. *Medical Physics*. 2003. V. 30 (6). P. 1272–1280. https://doi.org/10.1118/1.1576952
- Ferguson T.S. Optimal stopping and applications. 2008. [Online]. Available: https://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping
- Little M.P., Patel A., Lee C., Hauptmann M., Berrington de Gonzalez A., Albert P., Impact of Reverse Causation on Estimates of Cancer Risk Associated With Radiation Exposure From Computerized Tomography: A Simulation Study Modeled on Brain Cancer. *American Journal of Epidemiology*. 2022. V. 191 (1). P. 173–181.

https://doi.org/10.1093/aje/kwab247

Manerikar A., Li F., Kak A.C. DEBISim: A simulation pipeline for dual energy CT-based baggage inspection systems. *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2021. V. 29 (2). P. 259–285.
https://doi.org/10.2222/XST.200909

https://doi.org/10.3233/XST-200808

- Mitsuyama Y., Katayama Y., Oi K., Shimazaki Ji., Mimura K., Endo M., Shimazu N. The accuracy of contrast-enhanced computed tomography scans to detect postpartum haemorrhage: an observational study. *BMC Pregnancy Childbirth*. 2022. V. 22 (67). P. 1–9. https://doi.org/10.1186/s12884-021-04306-2
- Nikolaev D.P., Buzmakov A., Chukalina M., Yakimchuk I., Gladkov A., Ingacheva A. "CT Image Quality Assessment based on Morphometric Analysis of Artifacts". *SPIE* 10253. 2016. P.10253–06. https://doi.org/10.1117/12.2266268
- Nourazar M., Goossens B. Accelerating iterative CT reconstruction algorithms using Tensor Cores. *Journal Real-Time Image Processing*. 2021. N. 18. P. 1979–1991. https://doi.org/10.1007/s11554-020-01069-5

Ota J., Yokota H., Kobayashi T., Ogata Yu., Kubo T., Chida K., Masuda Yo., Uno T. Head CT dose reduction with organ-based tube current modulation. *Medical Physics*. 2022.

https://doi.org/10.1002/mp.15467

- Prodi E., Danieli L., Manno C., Pagnamenta A., Pravatà E., Roccatagliata L., Städler S., Cereda C.W., Cianfoni A. Stroke Mimics in the Acute Setting: Role of Multimodal CT Protocol. *American Journal of Neuroradiology*. 2021. https://doi.org/10.3174/ajnr.A7379
- Riis N.A., Frosig J., Dong Y., Hansen P.S. Limited-data X-ray CT for underwater pipeline inspection. *Inverse Problems*. 2018. V. 34 (3). P. 034002. https://doi.org/10.1088/1361-6420/aaa49c
- Riis N.A.B., Dong Yi., Hansen P.C. Computed tomography with view angle estimation using uncertainty quantification. *Inverse Problems*. 2021. V. 37 (6). P. 065007. https://doi.org/10.1088/1361-6420/abf5ba
- Topal E., Liao Z., Loeffler M., Gluch J., Zhang J., Feng X., Zschech E. Multi–scale X–ray Tomography and Machine Learning Algorithms to Study MoNi4 Electrocatalysts Anchored on MoO2 Cuboids Aligned on Ni Foam. *BMC Materials*. 2020. V. 2 (5). P. 1–14. https://doi.org/10.1186/s42833-020-00011-0
- Zhang J., Wang T., Liu P., Liao Z., Liu S., Zhuang X., Chen M., Zschech E., Feng X. Efficient Hydrogen Production on MoNi4 Electrocatalysts with Fast Water Dissociation Kinetics. *Nature Communications*. 2017. V. 8 (1547). P. 1–8. https://doi.org/10.1038/ncomms15437

Zilberstein S. Using anytime algorithms in intelligent systems. *AI Magazine*. 1996. V. 17 (3). P. 73–83.

https://doi.org/10.1609/aimag.v17i3.1232

About Monitored Tomographic Reconstruction

M. V. Chukalina^{*a,b, #*}, A. S. Ingacheva^{*b,c*}, K. B. Bulatov^{*b,d*}, K.O. Kutukova^{*e*}, E. Zschech ^{*e*}, and V. V. Arlazarov^{*b,d*}

^a FSRC Cristallograhy and photonics 119333 Moscow, Leninskii prospect, 59, Russia

^b Smart Engines Service 117312 Moscow, pr. 60-letiya Oktyabrya, 9, Russia

^c Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) 127051 Moscow, Bolshoi karetnii., 19, Russia

^d Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences

117312 Moscow, pr. 60-letiya Oktyabrya, 9, Russia

^e deepXscan GmbH, Dresden, Germany

[#]E-mail: chukalinamarina@gmail.com

X-ray tomography is widely used in medicine, industry, customs control and, of course, in scientific research studies as a non-destructive method for visualizing the internal morphological structure of probed objects. Each application imposes its own limitations on the method. Thus, medical applications require limiting the dose load, and use at customs requires a reduction in inspection time. Recently, the authors proposed a fundamentally new approach to working with tomographic data, called monitored reconstruction. The proposed approach differs from the classical two-stage "projection collecting according to a given protocol and then reconstruction". In monitored approach the reconstruction of a digital image begins after the first few projections (package of projections) are taken, the next step is to analyze the intermediate result and automatically decide to continue measuring the next "package" of projections or consider the result as final, and stop the process. The article discusses in detail the basic principles of the monitored approach, determines the

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

ЧУКАЛИНА и др.

function of total losses, the cost of reconstruction error, the cost of observations. The parameters that affect the formula of the observation cost function depend on the field of method application. The results of a model monitored experiment with projections collected on a tomographic setup with nanometer resolution were analyzed. It is shown that the application of the monitored reconstruction approach to the data allowed us to reduce the number of required projections by 10% on average to achieve a 5% deviation from the "exact" answer, compared with the case of the classical two-stage approach.

Key words: X-ray tomography, two-stage reconstruction, monitored reconstruction, cost of observation, total loss function

REFERENCES

- Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of July 7, 2009 № 47 "On approval of San-PiN 2.6.1.2523-09" (together with "NRB-99/2009. SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards. Sanitary rules and regulations") (Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 14. 2009 N 14534) (in Russia).
- Gladilin S., Kotov A., Nikolaev D., Usilin S. Postroenie ustoychivykh priznakov detektsii i klassifikatsii obektov, ne obladayuschikh kharakternymi yarkostnymi kontrastami [Construction of robust features for detection and classification of objects without characteristic brightness contrasts]. J. Inform. Technol. Comp. Systems. 2014. № 1. P. 53–60 (in Russia).
- Naterrer F. *Matematicheskie aspekti komputernoi tomografii* [Mathematical aspects of computed tomography]. M.: Mir, 1990. 105 p. (in Russia).
- Simonov E.N., Avramov M.V., Avramov D.V. Analiz trehmernih algoritmov rekonstruktsii v rentgenovskoi komputernoi tomografii [Comparison of 3D Reconstruction Algorithm in X-Ray Computed Tomography]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2017. V. 17. N 2. P. 24–32 (in Russia). https://doi.org/10.14529/ctcr170202
- Hofer M. Kompyternay tomografiy [Computed tomography]. Basic guide. 3 ed.. M.: Medical literature. 2010. 232 p.
- Arlazarov V.L., Nikolaev D.P., Arlazarov V.V., Chukalina M.V. X-ray tomography: the way from layer-by-layer radiography. *Computer Optics*. 2021. V. 45 (6). P. 897–906. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-898
- De Andrade V., Nikitin V., Wojcik M., Deriy A., Bean S., Shu D., Mooney T., Peterson K., Kc P., Li K., Ali S., Fezzaa K., Gürsoy D., Arico C., Ouendi S., Troadec D., Simon P., De Carlo F., Lethien C. Fast X-ray Nanotomography with Sub-10 nm Resolution as a Powerful Imaging Tool for Nanotechnology and Energy Storage Applications. *Adv Mater.* 2021. V. 33 (21): e2008653. https://doi.org/10.1002/adma.202008653. Epub 2021 Apr 19. PMID: 33871108.
- Bulatov K., Razumnyi N., Arlazarov V.V. On optimal stopping strategies for text recognition in a video stream as an application of a monotone sequential decision model. *IJDAR*. 2019. V. 22 (3). P. 303–314. https://doi.org/10.1007/s10032-019-00333-0
- Bulatov K., Chukalina M., Buzmakov A., Nikolaev D., Arlazarov V.V. Monitored Reconstruction: Computed Tomography as an Anytime Algorithm. *IEEE Access*.

2020. V. 8. P. 110759–110774. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002019

- Buzung T.M. *Computed Tomography*. From photon statistics to modern cone-beam CT. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 521 p.
- Dabli D., Frandon J., Belaouni A., Akessoul P., Addala T., Berny L., Beregi J-P., Greffier J. Optimization of image quality and accuracy of low iodine concentration quantification as function of dose level and reconstruction algorithm for abdominal imaging using dual-source CT: A phantom study. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2021. V. 103 (1). P. 31–40. https://doi.org/10.1016/j.diii.2021.08.004
- Dixon R.L. A new look at CT dose measurement: Beyond CTDI. *Medical Physics*. 2003. V. 30 (6). P. 1272–1280. https://doi.org/10.1118/1.1576952
- Ferguson T.S. Optimal stopping and applications. 2008. [Online]. Available: https://www.math.ucla.edu/ ~tom/Stopping
- Little M.P., Patel A., Lee C., Hauptmann M., Berrington de Gonzalez A., Albert P., Impact of Reverse Causation on Estimates of Cancer Risk Associated With Radiation Exposure From Computerized Tomography: A Simulation Study Modeled on Brain Cancer. *American Journal of Epidemiology*. 2022. V. 191 (1). P. 173–181. https://doi.org/10.1093/aje/kwab247
- Manerikar A., Li F., Kak A.C. DEBISim: A simulation pipeline for dual energy CT-based baggage inspection systems. *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2021. V. 29 (2). P. 259–285. https://doi.org/10.3233/XST-200808
- Mitsuyama Y., Katayama Y., Oi K., Shimazaki Ji., Mimura K., Endo M., Shimazu N. The accuracy of contrast-enhanced computed tomography scans to detect postpartum haemorrhage: an observational study. *BMC Pregnancy Childbirth*. 2022. V. 22 (67). P. 1–9. https://doi.org/10.1186/s12884-021-04306-2
- Nikolaev D.P., Buzmakov A., Chukalina M., Yakimchuk I., Gladkov A., Ingacheva A. "CT Image Quality Assessment based on Morphometric Analysis of Artifacts". *SPIE* 10253. 2016. P. 10253–06. https://doi.org/10.1117/12.2266268
- Nourazar M., Goossens B. Accelerating iterative CT reconstruction algorithms using Tensor Cores. *Journal Real-Time Image Processing*. 2021. N. 18. P. 1979–1991. https://doi.org/10.1007/s11554-020-01069-5
- Ota J., Yokota H., Kobayashi T., Ogata Yu., Kubo T., Chida K., Masuda Yo., Uno T. Head CT dose reduction with organ-based tube current modulation. *Medi*-

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ том 36 № 2 2022

192

cal Physics. 2022.

https://doi.org/10.1002/mp.15467

Prodi E., Danieli L., Manno C., Pagnamenta A., Pravatà E., Roccatagliata L., Städler S., Cereda C.W., Cianfoni A. Stroke Mimics in the Acute Setting: Role of Multimodal CT Protocol. *American Journal of Neuroradiology*. 2021. https://doi.org/10.3174/ajnr.A7379

Riis N.A., Frosig J., Dong Y., Hansen P.S. Limited-data x-

- ray CT for underwater pipeline inspection. *Inverse Problems*. 2018. V. 34 (3). P. 034002. https://doi.org/10.1088/1361-6420/aaa49c
- Riis N.A.B., Dong Yi., Hansen P.C. Computed tomography with view angle estimation using uncertainty quantification. *Inverse Problems*. 2021.V. 37 (6). P. 065007. https://doi.org/10.1088/1361-6420/abf5ba
- Topal E., Liao Z., Loeffler M., Gluch J., Zhang J., Feng X., Zschech E. Multi–scale X–ray Tomography and Machine Learning Algorithms to Study MoNi4 Electrocatalysts Anchored on MoO2 Cuboids Aligned on Ni Foam. *BMC Materials*. 2020. V. 2 (5). P. 1–14. https://doi.org/10.1186/s42833-020-00011-0
- Zhang J., Wang T., Liu P., Liao Z., Liu S., Zhuang X., Chen M., Zschech E., Feng X. Efficient Hydrogen Production on MoNi4 Electrocatalysts with Fast Water Dissociation Kinetics. *Nature Communications*. 2017. V. 8 (1547). P. 1–8. https://doi.org/10.1038/ncomms15437
- Zilberstein S. Using anytime algorithms in intelligent systems. *AI Magazine*. 1996. V. 17 (3). P. 73–83. https://doi.org/10.1609/aimag.v17i3.1232

НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Биоакустические исследования, представленные на XXXIV сессии Российского акустического общества, Москва, 14–18 февраля 2022 года

© 2022 г. Н. Г. Бибиков

DOI: 10.31857/S0235009222020081

Сессии Российского Акустического общества, основанного такими выдающимися учёными как академики Н. Н. Андреев и Л. М. Бреховских, имеют весьма долгую и плодотворную историю. Практически на всех этих форумах существовала секция биоакустики. В феврале 2022 г. в Москве на базе АО Акустический институт им. акад. Н. Н. Андреева состоялась 34 такая сессия. В связи с эпидемиологической обстановкой конференция проводилась в режиме удалённого доступа, что не помешало оживлённой дискуссии.

Обсуждение представленных на конференции исследований проходило в рамках следующих секций: НА – нелинейная акустика; АР – акустика речи, акустические проблемы лингвистики; ГЕО – геоакустика; АА – атмосферная акустика; АО – акустика океана; АСА – архитектурная и строительная акустика; УТ – ультразвуковые технологии; АЭР – аэроакустика; ОА – оптоакустика и акустооптика; БИО – биоакустика и медицинские приложения акустических методов; РДВ – распространение и дифракция волн; АЭ – акустоэлектроника; АИ – акустические измерения и стандартизация; ФА – физическая акустика; ШВ – шумы и вибрации; АММ – акустические метаматериалы.

Секция биоакустики фактически была разделена на две принципиально различные подсекции. Больше половины работ касались использования ультразвуковых технологий в диагностике и лечении разнообразных болезней. Собственно биоакустике были посвящены всего семь докладов, содержание которых и будет кратко изложено далее. К сожалению, эти доклады были представлены только из двух столичных городов.

М. П. Ивановым (Санкт-Петербургский государственный университет и ФГУП Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург) с соавторами был представлен доклад "Пакеты сигналов дельфина *Tursiops truncates* при решении задачи обнаружения на дистанциях более 500 метров". Соавторами докладчика были Ю. А. Тольмачев (Санкт-Петербургский государственный университет), Н. Г. Бибиков (АО Акустический институт им Н. Н. Андреева, Москва), Е. В. Мухачев и Н. А. Данилов (ФГУП Государственный научноисследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург), Б. В. Романов и Б. Ю. Красницкий (ФГБУН Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН, Крым), Е. В. Стефанов (АО Акустический институт им Н. Н. Андреева, Москва).

В этом докладе были приведены результаты анализа сигналов, излучаемых дельфином афалиной при локации подводных целей на максимально далёких расстояниях, иногда превышающих полкилометра. Выяснилось, что для этих целей животное использует не одиночные эхолокационные сигналы, а серии, в которых отдельные пульсы имеют крайне короткую длительность, причём интервалы между ними могут составлять менее 100 мкс. Не исключено, что при восприятии даже столь быстрых процессов эти животные, способные к временному анализу сигналов в микросекундном диапазоне, могут использовать процедуру временного когерентного суммирования.

Выступление А. В. Ахи (Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН) также было посвящено поведению "приматов моря" - дельфинов, и также при решении ими реально сложной эхолокационной задачи – в этом случае обнаружению объектов, погружённых под донной поверхностью (полное название доклада: "Адаптация поведения и эхолокации дельфинов Tursiops truncatus при поиске, обнаружении и идентификации объектов, скрытых морскими осадками"). Выяснилось, что для достижения данной цели животное целенаправленно излучает эхолокационные импульсы с разных направлений, что и позволяет осуществить локализацию источника в трёхмерном пространстве при наличии промежуточных отражающих слоёв. Длительное маневрирование позволяет дельфину, не теряя акустический контакт с целью, увеличить время принятия решения, необходимое для многократного зондирования. Надо заметить, что изучение эхолокации и слухового восприятия дельфинов являются той областью науки, в которой работы отечественных авторов являются приоритетными.

Оставшиеся доклады были посвящены акустическому и физиологическому изучению слуховой

системы наземных животных. Доклад Н. Г. Бибикова "Ответы корковых нейронов интактной кошки на некоторые окружающие естественные звуки" был представлен совместно с недавно погибшим выдающимся учёным Иваном Николаевичем Пигаревым (ФГБУН Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва), на экспериментальной установке которого и была выполнена работа. Данная установка позволяет в течение многих часов исследовать активность одиночных нейронов коры у бодрствующей кошки, причём с одним животным можно работать в течение нескольких лет. Такая возможность достигается за счет использования своеобразной короны, надолго закрепленной на черепе кошки для размещения микроманипулятора с микроэлектродом. Корона укрепляется на обнаженном участке черепа в самом начале работы с данным животным, она постепенно приживляется, не мешает кошке вести обычный образ жизни и позволяет многократно проводить эксперименты с введением микроэлектродов через маленькие отверстия в черепе. Для фиксации головы кошки во время проведения эксперимента корона имеет специальные приспособления.

Содержание указанного доклада сводилось к иллюстрации поведения нескольких клеток слуховых корковых отделов кошки в отсутствие стимуляции и при действии разнообразных, экологически значимых звуков. Подчёркивалась нестационарность фоновой импульсной активности клеток коры и реакций на внешние стимулы при видимой однородности таких их внутренних свойств как рефрактерность и последующая кратковременная фасилитация. При этом выявляется аналогия с широко распространенными в настоящее время глубокими нейронными сетями, у которых начальные свойства элементов в значительной степени однородны и случайны. При долговременном обучении с цепями обратной связи, в системе, состоящей из таких элементов, удаётся достичь вполне эффективного распознавания. Недавние достижения в обучении глубоких нейронных сетей обнаружили их способность после множества наблюдений оптимизировать миллиарды изначально случайных синаптических весов для достижения экологически значимых целей. Такие нейронные сети опередили хорошо интерпретируемые алгоритмы, специально разработанные исследователями для тех же целей. Они надежно решают реальные задачи, включая давно поставленную задачу распознавания речи. В отличие от традиционных научных моделей, где интерпретируемость последовательности операций является важнейшим этапом, у этих моделей конечной целью является только решение конкретной задачи в процессе перманентной эволюции с использованием обратной связи, определяемой и направляемой внешними

стимулами. Здесь вполне возможна аналогия с процессом видообразования, посредством которого живые организмы из поколения в поколение приспосабливаются к меняющейся среде. К сожалению, такой подход существенно снижает ценность конкретных результатов, получаемых электрофизиологами при исследовании одиночных нейронов коры, ибо они оказываются относящимися к постоянно меняющейся, изначально случайной структуре, наблюдаемой только в данный момент времени у данного исследуемого объекта.

Серия работ, посвященных исследованию разных аспектов функционирования слуховой системы грызунов, была представлена сотрудниками Института эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова в соавторстве с коллегами из других учреждений.

В докладе А. С. Лупановой (ГУП Ленинградский зоопарк, Санкт-Петербург) и М. А. Егоровой (ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург) анализировались характерные ультразвуковые сигналы, излучаемые как половозрелыми мышами в процессе разнообразного материнского и полового поведения, так и мышатами разного возраста. Выявлено значительное разнообразие внутривидовой акустической коммуникации этих животных. В некоторых случаях удалось связать характеристики излучаемого сигнала с его функциональным значением. Так, особенно громким оказался сравнительно низкочастотный крик подчинённого самца, признающего свое поражение при агонистическом поведении в процессе установлении иерархических отношений. В процессе назо-назального взаимодействия двух самок зарегистрированы длительные, ультразвуковые сигналы с частотой, варьирующей в районе 60 кГп.

Остальные работы участников этой группы касались конкретных особенностей функционирования одиночных нейронов слуховой коры домовой мыши. Г. Д. Хорунжий представил материал, свидетельствующий, что у грызунов при наркозе, основанном на использовании кетамина, в отличие от барбитала или хлоралозы, практически все клетки коры обладают выраженной фоновой активностью, причём эта активность носит выраженный пачечный характер с нередким формированием гиперпачек. Весьма правдоподобно предположение о том, что такая фоновая активность нейронов слуховой коры не является случайным феноменом, а отражает непрерывную динамику функционирования ансамбля клеток.

Начальные этапы изучения активности одиночных корковых нейронов мыши при полном отсутствии наркоза были представлены руководителем этой группы исследователей – М. А. Егоровой в докладе "Адаптация нейронов первичной слуховой коры бодрствующих мышей (*Mus musculus*) к последовательностям звуковых импульсов".

Изучалось явление габитуации или привыкания реакции нейронов при подаче последовательности коротких повторяющихся идентичных сигналов. Сам эффект сохранялся и при наркозе, и в состоянии бодрствования. Однако, если при наркозе процесс габитуации, как правило, был однонаправлен, то в состоянии бодрствования выявилась сложность и нестационарность вызванной активности клеток. При каждом отдельном предъявлении серии из четырёх следующих друг за другом идентичных тональных отрезков ответ мог развиваться по-разному: обычно привыкание было резко выражено уже при втором предъявлении стимула, а в ответах на остальные отрезки серии нередко отмечалась немонотонность реакции. В результате автором не было обнаружено достоверных различий ответов на все последовательные сигналы за исключением первого. У некоторых исследованных нейронов можно было отметить выраженное последействие уже по окончании серии.

Доклад А. Г. Акимова и М. А. Егоровой "Усвоение ритма нейронами первичной слуховой коры мыши (*Mus musculus*) при действии серий звуковых импульсов" (ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург) был посвящен именно анализу процессов последействия нейронов коры мыши, также при воздействии серий из четырёх коротких сигналов, которыми в данном случае служили писки мышиного детёныша. Даже в условиях кетаминового наркоза в ряде клеток коры уже после окончания этого воздействия возникали максимумы импульсации, как бы продолжающие реакцию на стимул. Обычно интервалы между этими максимумами приблизительно соответствовали интервалам предъявленной перед этим серии звуков. Ясно, что такое явление может соответствовать одному из начальных этапов возникновения у животного эффекта кратковременной памяти.

В заключение работы сессии были высказаны пожелания развития фундаментальных исследований слуховой системы человека и животных в нашей стране, а также более тесной связи этих исследований с весьма эффективно развивающейся в России аудиологической наукой.

Материалы конференции:

Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. М., ГЕОС, 2022, 1236 с. ISBN 978-5-89118-849-5, http://10.34756/GEOS.2021.17.38058