



МРНТИ 34.39.23

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-152-3-56-75>

Возрастные психофизиологические особенности ассоциативного научения с подкреплением

Д. Абдильманов¹, Г.К. Датхабаева¹, М. Жолдасова¹, А.М. Кустубаева*¹

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. Ассоциативное научение – познавательная функция, обеспечивающая адаптивное поведение и безопасную жизнедеятельность. Оно включает совокупность когнитивных процессов, вовлекающих нейросети заинтересованных зон мозга, отвечающих за обработку информации, исполнительный контроль, сенсомоторную координацию, субъективное переживание поощрения и наказания, и зависит от их интеграции между собой и сигналами обратной связи. Выявление психофизиологических закономерностей нормального развития когнитивной функции важно для понимания ее механизмов, установления возрастных норм и ранней идентификации отклонений в развитии. Цель исследования - изучение возрастной динамики поведенческих показателей научения с подкреплением у детей с применением детерминистской поведенческой модели научения. Выявлено, что скорость сенсомоторной реакции (СР) на зрительные стимулы значительно выше у старших детей, и временная динамика СР с возрастом меняется: на ранних этапах научения СР растет в обеих возрастных группах, а на поздних падает у младших детей и выходит на «плато» у старших. Показано сходство паттерна флуктуаций СР на ранних и поздних этапах научения: рост СР на поздних этапах научения относительно ранних в обеих возрастных группах. Наблюдающиеся возрастные закономерности могут свидетельствовать об особенностях развития механизмов научения. Полученные результаты могут быть полезными для разработки современных подходов диагностики нарушения развития детей, своевременной коррекции в обучении и при планировании учебной нагрузки в школе.

Ключевые слова: ассоциативное научение, подкрепление, развитие когнитивных функций, возрастная динамика, психофизиологические характеристики

Введение

Способность к научению является важнейшей когнитивной функцией мозга и лежит в основе адаптивного поведения, обеспечивающего эффективную и безопасную жизнедеятельность. Благодаря способности к научению происходит развитие познавательных

Поступила: 07.03.2025. Одобрена: 30.09.2025. Доступна онлайн: 30.09.2025.

функций, приобретение индивидуального опыта, знаний, умений и навыков, от которых зависят все аспекты жизни человека [1]. Индивидуальный опыт приобретается за счет научения с первых попыток путем проб и ошибок, когда от адекватности реакции на внешние вызовы зависит жизненно важное для человека приспособление к окружающей среде. Индивид, наблюдая результаты своих действий в различных условиях, получая положительную (в случае удачных попыток) или отрицательную (при допущении ошибки) обратную связь, то есть положительное или отрицательное подкрепление своих реакций в ответ на возникшую ситуацию, устанавливает ассоциацию между своим действием и его последствиями, что справедливо для всех этапов онтогенеза. Научение, возникающее на основе установления ассоциации между действием в ответ на определенную ситуацию и его результатом (положительной или отрицательной обратной связью/положительным или отрицательным подкреплением), получило название ассоциативного научения с подкреплением или научения на основе обратной связи [2].

Научение с подкреплением представляет собой сложный когнитивный процесс, включающий внимание, восприятие, память, мышление, принятие решения, сенсомоторные акты и зависящий от их успешной интеграции как между собой, так и с сигналами обратной связи [3, 4]. Соответственно, при научении с подкреплением происходит вовлечение дефинитивных распределенных нейронных сетей [5], входящих в заинтересованные зоны мозга, отвечающие за обработку сенсорных, семантических, пространственных характеристик стимулов, процессы рабочей памяти, управляющие функции, сенсомоторную координацию, двигательный контроль, субъективное переживание поощрения и наказания [3].

Для изучения мозговых механизмов научения с подкреплением широко используются поведенческие модели, представляющие собой компьютерные задачи на ассоциативное научение с подкреплением. В зависимости от целей исследования применяются два основных подхода – детерминистский и вероятностный. Детерминистская парадигма дает преимущество при исследовании механизмов научения, происходящего с первых попыток, играющего важную роль в жизни индивида. В ней устанавливаются фиксированные правила обратной связи. В частности, обратная связь дается как за все правильные ответы (положительный отзыв), так и за все неправильные реакции (отрицательный отзыв). При этом с момента успешного усвоения правила нажатия на заданные клавиши клавиатуры компьютера (или кнопки пульта) в ответ на появление стимула, которое должно произойти с первых попыток путем проб и ошибок, информационная роль положительного подкрепления падает, так как его появление становится однозначно предсказуемым [6].

Применение детерминистской парадигмы позволяет производить отдельный анализ психофизиологических коррелятов на раннем этапе научения (на стадии разгадывания правила), когда положительная и негативная обратная связь являются значимым сигналом, и на поздней стадии выполнения задачи в соответствии с успешно усвоенным правилом, когда сигнал обратной связи теряет повышенную значимость. Таким образом, простые модели детерминистских задач наиболее релевантны для изучения дискретных изменений в активности мозга при научении [6] и их возрастных особенностей в динамике индивидуального развития мозга.

При помощи методов нейровизуализации [3, 7] и регистрации эклектических сигналов мозга в процессе выполнения зрительно предъявляемых задач на научение

с подкреплением [8] достигнуто понимание определенных механизмов мозгового обеспечения научения в норме и при определенных нарушениях [3, 9, 10]. В частности, показано, что в научение динамически вовлечены дофаминэргическая мезолимбическая система вознаграждения, включающая проекции дофаминергических нейронов среднего мозга вентральной области покрышки (VTA) в полосатое тело, префронтальную кору, миндалевидное тело, гиппокамп и другие структуры лимбической системы [11], билатерально зрительная, орбитофронтальная и вентромедиальная префронтальная кора, медиальная теменная кора, верхняя и нижняя теменная доля, медиальная лобная кора (дополнительная моторная область), средняя лобная извилина, таламус, средний островок, левая прецентральная извилина (премоторная область) и средняя височная извилина [2, 6, 12]. При этом предполагается, что в научении с подкреплением стриатуму принадлежит роль интегратора зрительно-моторной информации с сигналами о ценности подкрепления в ходе выполнения задачи [2, 13].

ЭЭГ-исследования нейрофизиологических коррелятов научения с применением методов анализа потенциалов, связанных с событиями (ERP) и локализации источников активности, установили динамические паттерны мозговой активности при научении с подкреплением и роль функциональных систем мозга, вовлеченных в осуществление этой жизненно важной когнитивной функции у детей и взрослых в норме и при определенных нарушениях [10, 14]. Однако полное понимание мозговых механизмов научения с подкреплением, как и всех других когнитивных функций, далеко не достигнуто, так же, как и не до конца раскрыты закономерности развития и созревания нейросетей, являющихся мозговым субстратом научения [15, 16].

Изучение возрастных особенностей научения имеет как теоретико-методологическое, так и практическое значение. Выявление психофизиологических закономерностей формирования когнитивной функции в процессе нормального индивидуального развития вносит существенный вклад в идентификацию ее мозговых механизмов в зрелом возрасте, а также дает возможность устанавливать возрастные нормы и выявлять отклонения в развитии на ранних этапах, что важно для своевременной коррекции и предотвращения трудностей в обучении [1, 17].

Целью нашего исследования было изучение возрастной динамики изменений поведенческих показателей ассоциативного научения на основе положительной и отрицательной обратной связи с применением хорошо зарекомендовавшей себя детерминистской поведенческой модели [3, 6]. Проводилась регистрация электрической активности головного мозга ЭЭГ в процессе выполнения поведенческой задачи на научение с подкреплением для последующего анализа вызванных потенциалов мозга (ERP). В настоящей статье приводятся результаты поведенческих данных исследования.

Методика исследования

Участники исследования

К участию в исследовании допускались дети-добровольцы, подписавшие собственноручно (при возрасте от 18 лет и старше) информированное согласие, либо чьи родители/опекуны давали письменное информированное согласие, отвечавшие критериям включения: отсутствие в анамнезе хронических неврологических и психиатрических заболеваний, травм головы, нормальное или скорректированное

половому составу были сбалансированными.

связью

популяции.

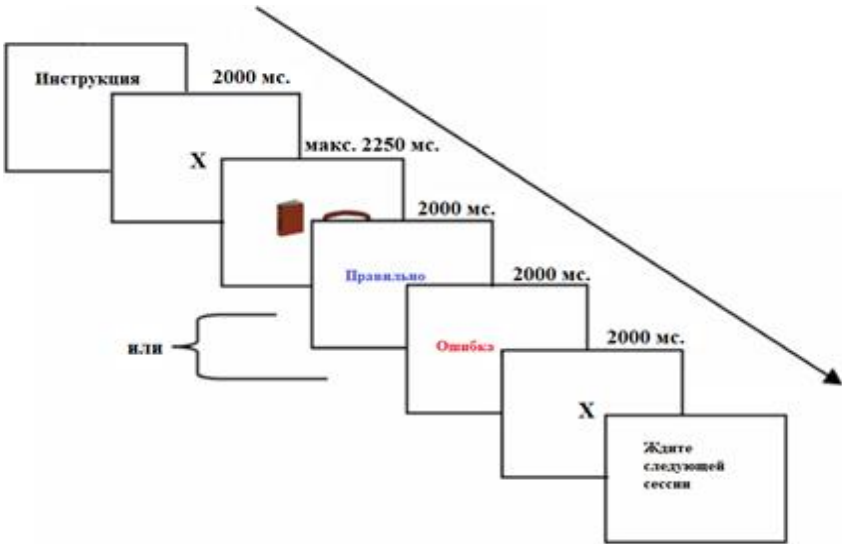


Рисунок 1. Временная схема поведенческой задачи на ассоциативное научение с подкреплением

Каждый выбор клавиши подкреплялся обратной связью в виде слов «ПРАВИЛЬНО!» (положительное подкрепление, если испытуемый нажимал на нужную клавишу), «ОШИБКА!» (отрицательное подкрепление в случае ошибки) и знака вопроса «?» при отсутствии ответа со стороны испытуемого. Всего действовало 4 правила: 1) при появлении картинки с любой стороны нажимать «право»; 2) при появлении картинки с любой стороны нажимать «лево»; 3) нажимать противоположную картинке сторону; 4) нажимать сторону, на которой появляется картинка.

Процедура эксперимента

Задача на ассоциативное научение состояла из 4 последовательных блоков/сессий (А, В, С, D) по 5 минут каждая. Блок включал сет из 8 картинок, правила нажатия на клавишу при появлении картинки сменялись в рандомном порядке. Об изменении правила испытуемый мог догадаться по сообщению об ошибке. Положительное подкрепление, получаемое несколько раз подряд, свидетельствовало об успешно выявленном правиле. Каждый блок в целом включал 49 предъявлений из 8 чередовавшихся в случайном порядке наборов картинок.

Каждая проба состояла из 5-7 предъявлений и считалась успешно выполненной только в том случае, если обследуемый разгадывал правило за первые три попытки, когда получал положительную обратную связь, начиная с 4 предъявления (или ранее) непрерывно до конца пробы. По логике теста для разгадывания правила путем проб и ошибок достаточно первых двух-трех попыток. Если научения к 4 предъявлению не происходило (был хотя бы один неправильный ответ, начиная с 4 предъявления), такие пробы исключались из усреднения по этапам выполнения теста.

До начала эксперимента проводился инструктаж, и испытуемые выполняли пробную сессию для уяснения задания. Инструктаж и задание предъявлялись на казахском или русском языке в зависимости от родного языка ребенка. Предварительный сравнительный анализ выполнения задач на казахском и русском языках не выявил достоверных различий. Статистический анализ не выявил достоверных различий психофизиологических показателей научения между мальчиками и девочками. В связи с этим разделения по языку и полу не проводилось.

Статистический анализ

В качестве психофизиологического показателя научения выступило время реакции (ВР) на предъявление стимула, то есть временной промежуток между появлением картинки на экране и нажатием на клавишу «1» или «2».

Первичные результаты ВР были получены с помощью E-Data Aid (<https://support.pstnet.com/hc/en-us/articles/115000902608-E-DATAID-Opening-a-Data-File-22794>). Для статистического анализа показателей возрастных особенностей психофизиологических параметров научения использовалась программа IBM SPSS Statistics v21. Применялись методы описательной статистики, включая таблицы сопряженности кросс-таб с критерием статистической достоверности различий хи-квадрат, однофакторный дисперсионный анализ (One Way ANOVA), дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями repeated measures (межгрупповой фактор – возрастная группа, внутригрупповые факторы – порядковый номер попытки, ранний и поздний этапы

выполнения задачи, порядковый номер серии), парный критерий Стьюдента с учетом множественности измерений.

Под ранним и поздним этапами научения подразумевались соответственно первые три попытки и последующие 4 попытки. Этапы усреднялись только по тем пробам, в которых испытуемый успешно справился с задачей, то есть последующие 4-7 попыток были с положительным подкреплением.

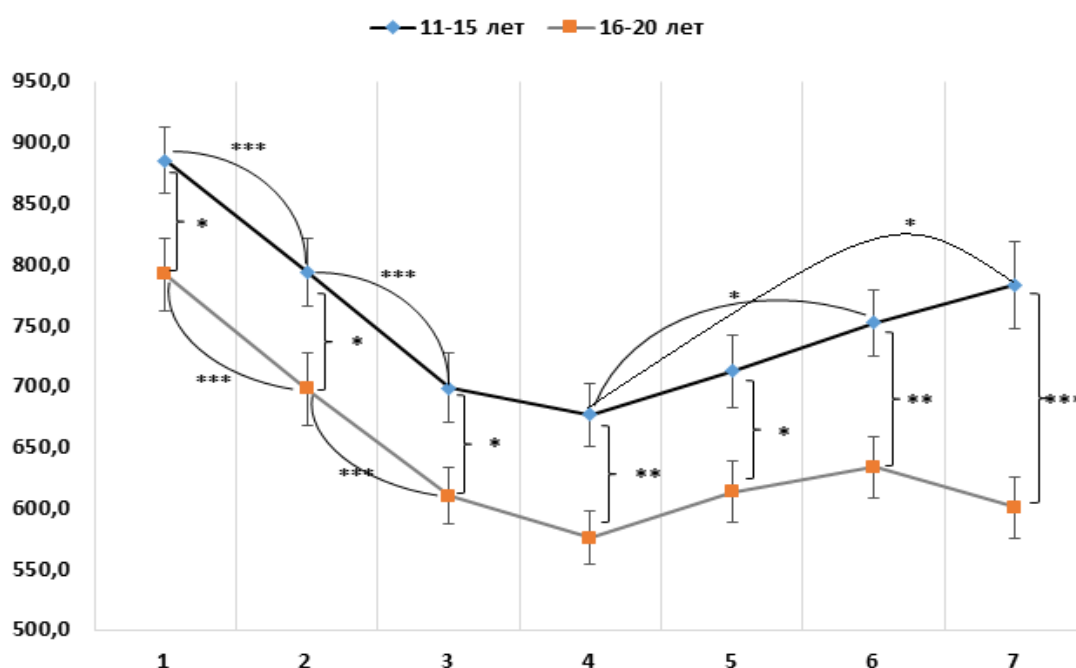
Для прослеживания возрастных особенностей динамики научения усреднялось ВР каждой попытки по 4 сессиям. Для сравнительного анализа ВР раннего этапа (этап научения) и позднего этапов (этап успешного научения) усреднение проводилось по всем 4 сессиям (A-D). Для прослеживания возрастных особенностей динамики научения от первой сессии к четвертой проводилось усреднение по этапам выполнения задачи внутри каждой сессии (усреднение ранних попыток сессии А, усреднение поздних попыток сессии А и так в каждой сессии до сессии D). Кроме того, для сопоставления возрастных особенностей научения усреднялось ВР всех ошибочных ответов (после таких ответов следовала отрицательная обратная связь) и ВР всех правильных ответов за все 4 сессии.

Результаты исследования

Временная динамика изменений времени реакции

На рисунке 2 представлен график временной динамики изменений ВР от первой попытки к последней, усредненных по всем четырем сессиям в младшей и старшей группах детей. Звездочками отмечены статистически значимые межгрупповые и внутригрупповые различия. Межгрупповой сравнительный анализ ВР выявил, что старшие дети статистически значимо отличаются от младших сниженным ВР на всем протяжении решения задачи на научение с подкреплением (Рисунок 2).

Анализ ANOVA с повторными измерениями, где внутригрупповым фактором выступал порядковый номер стимула задачи на научение – «шаг», а межгрупповым – «возраст», показал достоверные эффекты «возраста» ($F=11,193$ $p=0.001$), «шага» ($F=68.06$, $p=0.00$), а также наличие взаимодействия факторов «шаг» x «возраст» ($F=6.039$, $p=0.016$). Результаты свидетельствуют о том, что время реакции у старшей группы обследуемых ниже по сравнению с младшей при научении на всем протяжении выполнения задачи, а также о различии временной динамики изменений ВР между младшими и старшими детьми. В частности, от первой попытки ко второй и к третьей происходило значимое сокращение ВР в обеих возрастных группах детей (Рисунок 2), однако после 3 попытки начиналось расхождение в траектории изменения скорости реакции в процессе выполнения задачи на научение (Рисунок 2). В младшей группе детей начиналось значимое градуальное снижение скорости реакции (рост ВР), особенно выраженное к самому концу испытания (Рисунок 2), когда скорость реакции упала до уровня в третьей попытке. В то же время в старшей группе детей начиная с 4 попытки скорость реакции выходила на «плато» и удерживалась на одном уровне до конца испытания (Рисунок 2).



Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – порядковые номера стимулов (1-7). * $p < 0.05$, ** $p < 0.005$, *** $p < 0.0005$

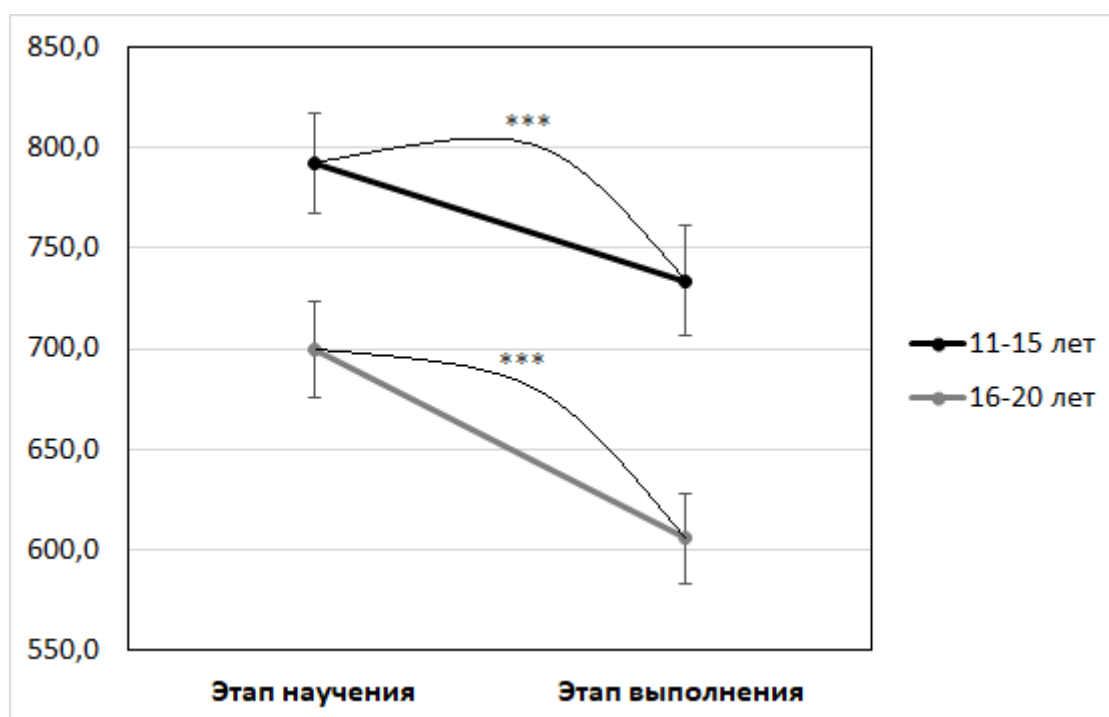
Рисунок 2. Временная динамика изменений времени реакции на предъявление стимулов задачи по научению от первой попытки к последней у младшей и старшей групп детей

Время реакции на раннем и позднем этапах научения

На рисунке 3 показана динамика ВР от раннего этапа научения (разгадывание правила путем проб и ошибок) к позднему (испытуемый успешно усвоил правило и выполнял задачу по заданному правилу), усредненного по всем четырем сессиям А-Д, выявленная при помощи дисперсионного анализа ANOVA с повторными измерениями (внутригрупповой фактор – «этап», межгрупповой – «возраст»).

ANOVA с повторными измерениями (Рисунок 3) выявил достоверный эффект внутригруппового фактора «этап» ($F=80.808$, $p=0.000$), в частности, значимое уменьшение ВР на позднем этапе научения, когда дети успешно усвоили правило и выполняли по нему задачу, по сравнению с начальным этапом научения, когда дети путем проб и ошибок разгадывали правило. Также выявлен достоверный эффект межгруппового фактора «возраст» ($F=10.794$, $p=0.001$), подтверждающий меньшее значение ВР у старших детей по сравнению с младшими на всех этапах научения. Однако взаимодействие факторов «этап» и «возраст» не достигло уровня достоверности ($F=3.337$, $p=0.060$), что указывает на схожесть динамики изменений времени реакции от начального этапа к позднему в обеих возрастных группах (Рисунок 3), а именно значимый рост скорости реакции при усвоении правила как у младших, так у старших детей.

One Way ANOVA выявил, что ВР у старших детей меньше по сравнению с младшими как на раннем ($F=7.309$, $p=0.008$), так и на позднем ($F=12.998$, $p=0.001$) этапах научения (Рисунок 3).

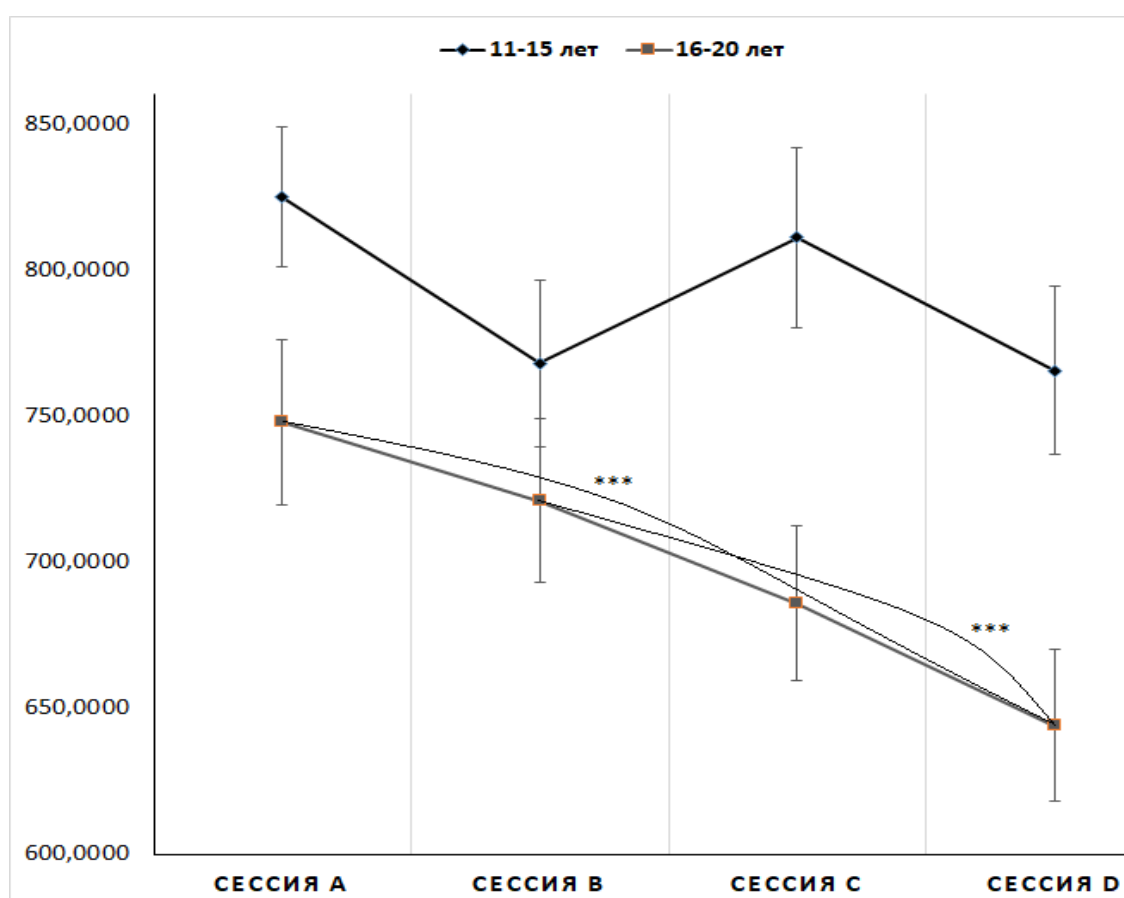


Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – этапы научения. *** $p < 0.0005$

Рисунок 3. Время реакции на предъявление стимулов на раннем и позднем этапах научения у младшей и старшей групп детей

Скорость реакции в зависимости от индивидуального опыта

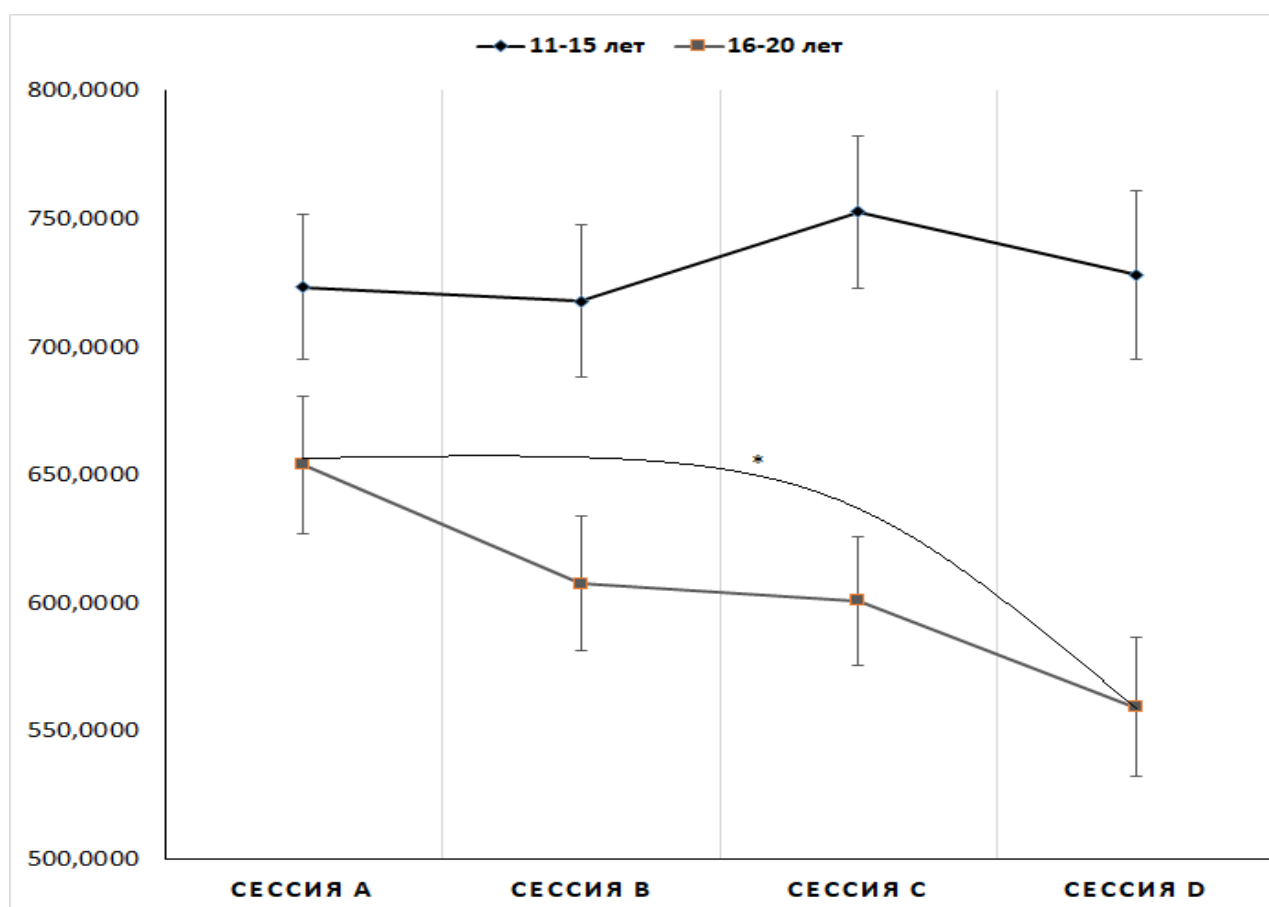
Для оценки влияния индивидуального опыта решения задач на процесс научения у детей разного возраста был проведен дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями в последовательности четырех сессий выполнения задачи (от А до D, фактор «сессия») в каждой возрастной группе отдельно для раннего этапа научения и позднего. На рисунке 4 представлена динамика изменений ВР от сессии к сессии на раннем этапе научения в двух группах детей. Эффект «сессии» не выявил достоверности ($F=3.664$, $p=0.062$) в младшей группе, в то время как в старшей группе он показал значимость ($F=8.189$, $p=0.007$). Если в младшей группе детей ВР от сессии к сессии незначимо колебалось в разные стороны, то в старшей группе неуклонно и значимо уменьшалось. Парное сравнение ВР в четырех сессиях по парному критерию Стьюдента для зависимых выборок с поправкой на множественные измерения показало, что в старшей группе детей ВР на стимулы во время первой и второй сессий было значимо ниже, чем в последней четвертой (Рисунок 4).



Примечания: по оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – сессии испытания.
*** $p < 0.0005$

Рисунок 4. Динамика изменений ВР в последовательности четырех сессий на раннем этапе научения у младшей и старшей групп детей

Динамика изменений ВР от сессии к сессии на позднем этапе научения (Рисунок 5) оказалась сходной с ранним этапом в обеих группах детей. В частности, ANOVA с повторными измерениями не выявил ($F=0.891$, $p=0.448$) достоверности эффекта фактора «этапа» в младшей группе и обнаружил его в старшей группе ($F=5.979$, $p=0.001$). Попарное сравнение ВР в четырех сессиях с поправкой на множественные измерения показало, что в старшей группе детей ВР на стимулы во время первой сессии было значимо ниже, чем в последней (Рисунок 5).

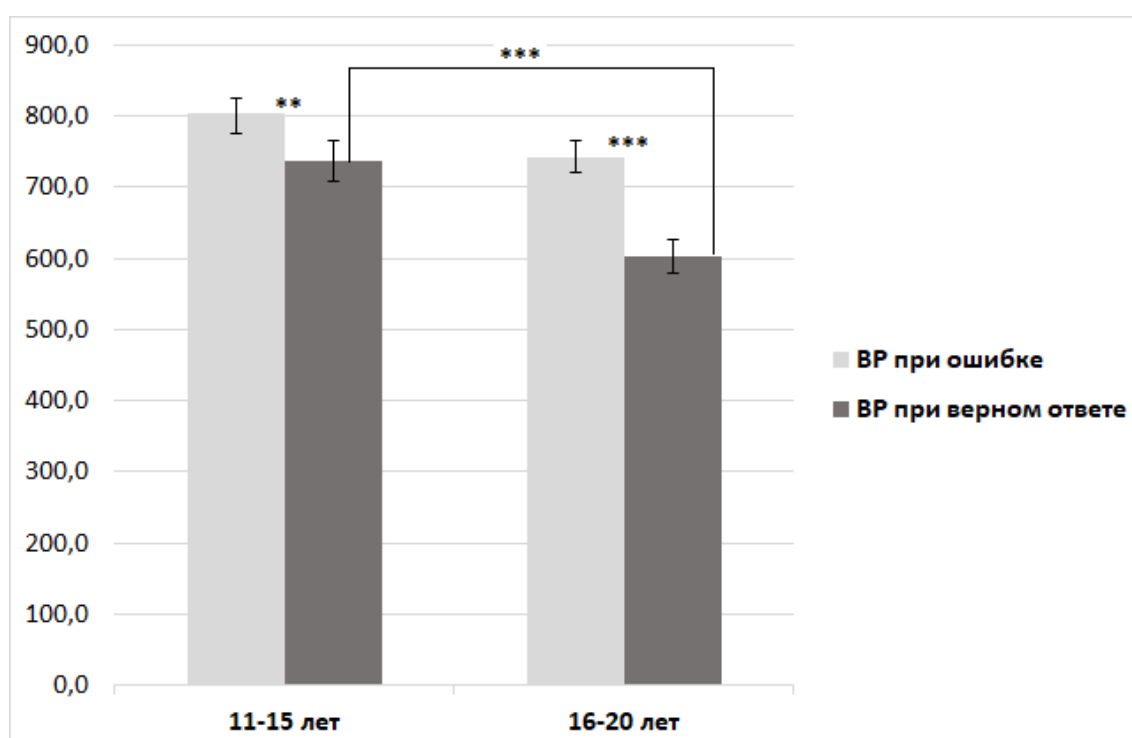


Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – сессии испытания. * $p < 0.05$

Рисунок 5. Динамика изменений ВР в последовательности четырех сессий на позднем этапе научения у младшей и старшей групп детей

Скорость реакции при отрицательной и положительной обратной связи

Дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями, где внутригрупповой фактор «корректность» и межгрупповой фактор «возраст» показал (Рисунок 6) статистически значимый эффект фактора «корректность» ($F=61.849$, $p=0.000$). ВР при правильном ответе достоверно меньше ВР, чем при ошибке в обеих возрастных группах (Рисунок 6). Фактор «возраст» ($F=10.148$, $p=0.002$) и взаимодействие факторов «возраст» х «корректность» ($F=8.934$, $p=0.004$) были статистически достоверными. При этом сравнение ВР при ошибке и верном ответе между группами One Way ANOVA (Рисунок 6) указало на наличие статистически значимых различий между старшей и младшей группами по скорости реакции только при правильных ответах ($F=14.826$, $p=0.000$), в отличие от неправильных ($F=3.265$, $p=0.072$). В старшей группе ВР снижалось в среднем на 20,8%, тогда как в младшей лишь на 2,5%.



Примечания: По оси ординат – время реакции в мс, по оси абсцисс – возрастные группы детей.
 $**p<0.005$, $***p<0.0005$

Рисунок 6. Время реакции при ошибочных и верных ответах в младшей и старшей группах детей

Обсуждение результатов

Согласно результатам исследования, дети 16-20 лет по сравнению с детьми 11-15 лет имеют более высокую скорость сенсомоторной реакции на зрительные стимулы на всем протяжении ассоциативного научения, что может отражать большую зрелость центральных мозговых механизмов, вовлечённых в научение у старших детей. Так, по данным литературы, миелинизация мозговых волокон в основном завершается к 5 годам [18], однако миелинизация в ретикулярной формации, имеющей важное значение в процессах внимания [19], а также внутрикорковых волокон в ассоциативных зонах коры мозга продолжается до 20 лет [20-22].

Анализ временной динамики изменений скорости реакции от первой попытки к последней выявил особенности, связанные с возрастом, заключающиеся в том, что сначала от первой попытки к третьей наблюдалась сходная динамика изменений ВР (неуклонное сокращение ВР) в обеих возрастных группах детей, но после 3 попытки в младшей группе детей скорость реакции начала значительно падать, а в старшей выходила на «плато» и удерживалась на одном уровне до конца 20-минутного испытания (Рисунок 2). Установленные различия могут быть связаны с последовательным морфо-функциональным созреванием неспецифической системы активации мозга

[23], центральным звеном которой является ретикулярная формация мозга [24], что приводит к уменьшению ресурсов к концу 20-минутного испытания у младших детей, в отличие от старших. Применение детерминистской парадигмы в модели ассоциативного научения с подкреплением на взрослой популяции [6] позволило обнаружить различия как на поведенческом уровне (в скорости реакции), так и в паттернах активации нейросетей во время раннего и позднего этапов научения. Если ранние этапы научения сопровождались замедленной скоростью реакции, мобилизацией специализированных соматосенсорных и других заинтересованных зон мозга, включая мотивационные центры вознаграждения и области, ответственные за управляющие функции (стриатум и префронтальная кора), то поздние этапы научения отличались резким сокращением ВР и редукцией активации в префронтальной коре и стрии [6].

Как отмечалось выше, ранний этап научения связан с активным разгадыванием правила методом проб и ошибок, где обратная связь служит инструктирующим сигналом для последующих принятий решений, тогда как на позднем этапе научения испытуемые успешно выполняют задачу по усвоенному правилу, и информационная роль положительного подкрепления становится однозначно предсказуемым. В нашем исследовании мы выявили сходный паттерн флуктуаций ВР в обеих группах испытуемых, что может отражать достаточную сформированность систем вознаграждения в детском возрасте и согласуется с данными литературы о повышенной роли этих систем в ассоциативном научении с подкреплением у детей и в целом о высокой чувствительности мотивационных центров вознаграждения у детей [25].

Результаты нашего исследования свидетельствуют, что старшие дети уже могут успешно использовать индивидуальный опыт решения задач, совершенствуя индивидуальные подходы к ее решению, в отличие от младших детей: у старших детей от сессии к сессии скорость реакции значительно росла как на ранних, так и на поздних этапах научения, в то время как у младших детей не менялась (Рисунки 4-5). Наблюдение может быть обусловлено более генерализованным характером вовлечения нейросетей мозга в выполнение задачи на научение у младших детей и активацией более локальных специализированных нейросетей у старших детей. Такая закономерность психофизиологического развития когнитивных функций от генерализованной активации мозговых систем до локально-специфической активации нейросетей описана в литературе для ряда когнитивных функций [26, 27].

Анализ скорости реакции на появление стимулов при ошибочном и правильном выборе клавиши (при отрицательной и положительной обратной связи) выявил как общую закономерность в двух группах детей, так и возрастные психофизиологические особенности научения (Рисунок 6). Общая закономерность заключалась в том, что ВР при правильном ответе достоверно меньше ВР, чем при ошибке в обеих возрастных группах (Рисунок 6). Возрастная особенность выражалась в том, что различия во ВР при правильном и ошибочном ответе достоверно более выражены в старшей группе детей. Также ВР в старшей группе оказалась достоверно меньше, чем в младшей группе только при правильных ответах, в то время как при ошибочных достоверных различий не было. Обнаруженные закономерности могут указывать на механизмы созревания структур мозга, участвующих в процессе научения у старших детей, что соответствует литературным данным о поэтапности и гетерохронности структурного и

функционального созревания мозга в онтогенезе, происходящего за счет качественных перестроек нейросетей, особенно продолжительно наблюдающихся в лобных отделах коры и ретикулярной формации. При недостаточной зрелости данных нейросетей выполнение когнитивных функций осуществляется за счет более генерализованного (менее избирательного) включения нейросетей в функциональные объединения, что на поведенческом уровне проявляется в более медленной скорости сенсомоторной реакции. По мере морфо-функционального созревания мозга обеспечиваются условия для реализации когнитивных функций максимально эффективным, экономичным путем за счет формирования избирательных наиболее адекватных функциональных систем, отвечающих за обработку специфической информации и управление деятельностью [28- 30].

Заключение

Таким образом, при помощи испытанной на взрослой популяции детерминистской модели научения с подкреплением, позволяющей изучать дискретные изменения активности мозга, и, соответственно, психофизиологических параметров на качественно различных этапах ассоциативного научения, выявлены возрастные психофизиологические особенности научения, а также общие закономерности развития. В частности, показано, что скорость сенсомоторной реакции на зрительные стимулы статистически значимо выше у детей 16-20 лет по сравнению с детьми 11-15 лет. Также установлены возрастные различия во временной динамике ВР в ходе выполнения задачи: на ранних этапах научения неуклонное сокращение ВР в обеих возрастных группах детей, однако на поздних – падение скорости реакции в младшей группе и выход на «плато» в старшей. Кроме того, выявлено, что старшие дети, в отличие от младших, успешно использовали свой опыт решения задачи, от сессии к сессии демонстрируя рост скорости реакции. Сходство паттерна флуктуаций ВР на ранних и поздних этапах научения (снижение ВР на поздних этапах научения относительно ранних) в обеих возрастных группах могут свидетельствовать о достаточной сформированности систем вознаграждения в детском возрасте и согласуется с данными литературы о повышенной роли этих систем в научении с подкреплением, и их высокой чувствительности у детей. Выявленные возрастные особенности и общие закономерности, по-видимому, указывают на постепенное морфо-функциональное созревание неспецифической системы активации мозга у младших детей, на более совершенные нейромеханизмы научения у старших детей, и согласуются с литературными данными о поэтапности и гетерохронности структурного и функционального развития мозга за счет качественных перестроек нейросетей, особенно в лобных отделах коры, отвечающих за исполнительный контроль. Выполнение когнитивных функций на ранних этапах развития вовлекает более генерализованную активность нейросетей, в то время как с возрастом наблюдается больше вовлечение избирательных функциональных объединений, обеспечивающую более эргономичную реализацию когнитивных задач. Полученные результаты могут быть полезными для разработки современных подходов диагностики нарушения развития детей, своевременной коррекции в обучении и при планировании учебной нагрузки в школе.

Вклад авторов

Д.А., Г.Д., и М.Ж. – проведение экспериментов; **Д.А. и Г.Д.** – статистический анализ первичных данных; **Д.А., Г.Д. и М.Ж.** – написание текста статьи; **Г.Д., М.Ж. и А.К.** – редактирование текста статьи; **А.К.** – обсуждение результатов исследования; **А.К.** – концепция и руководство работой.

Финансирование

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ № BR27198099).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в финансовой или какой-либо иной сфере.

Соблюдение этических норм

Протокол исследования отвечает стандартам Хельсинской декларации и получил одобрение локального этического комитета КазНУ им. аль-Фараби (Протокол заседания ЛЭК №IRB-A843 от 23.05.2024).

Список литературы

1. Nussenbaum K, Hartley CA. Reinforcement learning across development: What insights can we draw from a decade of research? *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2020; 45:100832. doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100733
2. Gerraty RT, Davidow JY, Foerde K, et al. Dynamic Flexibility in Striatal-Cortical Circuits Supports Reinforcement Learning. *Journal of Neuroscience*. 2018;38(10):2442-2453. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2084-17.2018
3. Kustubayeva AM, Nelson EB, Smith ML, Allendorfer JB, Eliassen JC. Functional MRI study of feedback-based reinforcement learning in depression. *Frontiers in Neuroinformatics*. 2022;6:1. doi.org/10.3389/fninf.2022.1028121
4. Marco-Pallarés J, Müller SV, Münte TF. Learning by doing: an fMRI study of feedback-related brain activations. *Neuroreport*. 2007;18(14):1423-6. doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282e9a58c
5. Yael Niv. Reinforcement learning in the brain. *Journal of Mathematical Psychology*. 2009;53(3):139-154. doi.org/10.1016/j.jmp.2008.12.005
6. Eliassen JC, Lamy M, Allendorfer JB, et al. Selective role for striatal and prefrontal regions in processing first trial feedback during single-trial associative learning. *Brain Research*. 2012;1458:56-66. doi.org/10.1016/j.brainres.2012.04.010
7. Rodriguez Buritica JM, Eppinger B, Heekeren HR. et al. Observational reinforcement learning in children and young adults. *npj Science of Learning*. 2024;9(18). doi.org/10.1038/s41539-024-00227-9
8. Lauzon SA, Abraham AE, Curcin K, Butler BE, Stevenson RA. The relationship between multisensory associative learning and multisensory integration. *Neuropsychologia*. 2022; 174:108336. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108336
9. Pechtel P, Pizzagalli DA. Disrupted reinforcement learning and maladaptive behavior in women with a history of childhood sexual abuse: a high-density event-related potential study. *JAMA Psychiatry*. 2013;70(5):499-507. doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2013.728

10. Shephard E, Jackson GM, Groom MJ. Electrophysiological correlates of reinforcement learning in young people with Tourette syndrome with and without co-occurring ADHD symptoms. *International Journal of Developmental Neuroscience*. 2016;51:17-27. doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2016.04.005
11. Lewis RG, Florio E, Punzo D, Borrelli E. The Brain's Reward System in Health and Disease. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2021;1344:57-69. doi.org/10.1007/978-3-030-81147-1_4
12. Brovelli A, Laksiri N, Nazarian B, Meunier M, Boussaoud D. Understanding the neural computations of arbitrary visuomotor learning through fMRI and associative learning theory. *Cerebral Cortex*. 2008;18:1485–1495. doi.org/10.1093/cercor/bhm198
13. Daw ND, O'Doherty JP, Dayan P, Seymour B, Dolan RJ. Cortical substrates for exploratory decisions in humans. *Nature*. 2006;441:876-879. doi.org/10.1038/nature04766
14. Palidis DJ, Gribble PL. EEG correlates of physical effort and reward processing during reinforcement learning. *Journal of Neurophysiology*. 2020;124(2):610-622. doi.org/10.1152/jn.00370.2020
15. Subramanian A, Chitlangia S, Baths V. Reinforcement learning and its connections with neuroscience and psychology. *Neural Networks*. 2022;145:271-287. doi.org/10.1016/j.neunet.2021.10.003
16. Christakou A, Gershman SJ, Niv Y, et al. Neural and Psychological Maturation of Decision-making in Adolescence and Young Adulthood. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2013;25(11):1807–1823. doi.org/10.1162/jocn_a_00447
17. Александров ЮИ. Психофизиологические закономерности научения и методы обучения. *Психологический журнал*. 2012;33(6):5-19.
18. Deoni SCL, Dean DC, Remer J, Dirks H, O'Muircheartaigh J. Cortical maturation and myelination in healthy toddlers and young children. *NeuroImage*. 2015;115:147-161. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.058
19. Paus T. Functional anatomy of arousal and attention systems in the human brain. *Progress in Brain Research*. 2000;126:65-77. doi.org/10.1016/S0079-6123(00)26007-X
20. Caviness VS Jr, Kennedy DN, Richelme C, Rademacher J, Filipek PA. The human brain age 7-11 years: a volumetric analysis based on magnetic resonance images. *Cerebral Cortex*. 1996;6(5):726-36. doi.org/10.1093/cercor/6.5.726
21. Kelly C, Ball G, Matthews LG, et al. Investigating brain structural maturation in children and adolescents born very preterm using the brain age framework. *Neuroimage*. 2022;247:118828. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118828
22. Buyanova IS, Arsalidou M. Cerebral White Matter Myelination and Relations to Age, Gender, and Cognition: A Selective Review. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2021;15:662031. doi.org/10.3389/fnhum.2021.662031
23. Ball G, Kelly CE, Beare R, Seal ML. Individual variation underlying brain age estimates in typical development. *Neuroimage*. 2021;15(235):118036. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118036
24. Мачинская РИ., Крупская ЕВ. Созревание регуляторных структур мозга и организация внимания у детей младшего школьного возраста. *Когнитивные исследования: сб. науч. трудов*. М.: Изд-во Института психологии РАН; 2008;2:32–48.
25. Van Leijenhorst L, Gunther Moor B, Op de Macks ZA., Rombouts SA., Westenberg PM., Crone EA. Adolescent risky decision-making: neurocognitive development of reward and control regions. *Neuroimage*. 2010;51(1):345-55. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.038
26. Snook L, Paulson LA, Roy D, et al. Diffusion tensor imaging of neurodevelopment in children and young adults. *Neuroimage*. 2005;26:1164–1173. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.03.016

27. Безруких ММ, Мачинская РИ, Фарбер ДА. Структурно-функциональная организация развивающегося мозга и формирование познавательной деятельности в онтогенезе ребенка. Физиология человека. 2009;35(6):10-24.
28. Мачинская РИ. Нейрофизиология когнитивного развития. История научного направления и лаборатории. Новые исследования. 2024;3(79):144-182. doi.org/-10.46742/2072-8840-2024-79-3-144-182
29. Casey BJ, Giedd JN, Thomas KM. Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. Biological Psychology. 2000;54(1-3):241-57. doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00058-2
30. Gómez-Pérez E, Ostrosky-Solís F, Próspero-García O. Desarrollo de la atención, la memoria y los procesos inhibitorios: relación temporal con la maduración de la estructura y función cerebral. Rev Neurol. 2003;37(6):561-7. doi.org/10.33588/rn.3706.2003092

Ассоциативті оқытудың жас ерекшеліктеріне байланысты психофизиологиялық ерекшеліктері

Д. Абдильманов¹, Г.К. Датхабаева¹, М. Жолдасова¹, А.М. Кустубаева*¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Ассоциативті оқыту – бейімделгіш мінез-құлық пен қауіпсіз өмірді қамтамасыз ететін танымдық функция. Ол ақпаратты өңдеуге, экзекүтивті бақылауға, сенсомоторлық координацияға, марапаттаумен жазалаудың субъективті тәжірибесіне жауап беретін мидың мүдделі аймақтарының нейрондық желілерін біріктірген когнитивті процестердің жиынтығын қамтиды және олардың өзара және кері байланыс сигналдары арасындағы интеграциясына байланысты. Когнитивті функцияның қалыпты дамуының психофизиологиялық заңдылықтарын анықтау оның механизмдерін түсінуге, жас нормаларын белгілеуге және дамудағы ауытқуларды ерте анықтау үшін маңызды. Зерттеудің мақсаты – детерминистік мінез-құлық оқыту моделін пайдалана отырып, балалардағы күшейтілген оқытудың мінез-құлық көрсеткіштерінің жас динамикасын зерттеу. Көру стимулдарына сенсомоторлық реакцияның (СР) жылдамдығы ересек балаларда айтарлықтай жоғары екендігі анықталды және СР-нің уақытша динамикасы жасына қарай өзгереді: СР оқытудың алғашқы кезеңдерінде екі жас тобында да өседі, ал кейінірек ол кіші балаларда төмендейді және үлкендерде «бір қалыпты» деңгейді көрсетті. Оқытудың ерте және кеш кезеңдеріндегі СР ауытқуының заңдылығының ұқсастығы көрсетілді: екі жас тобында да ерте кезеңдерге қарағанда оқытудың кеш кезеңдеріндегі СР жоғарылады. Жасқа байланысты байқалған заңдылықтар оқыту механизмдерінің даму ерекшеліктерін көрсетуі мүмкін. Алынған нәтижелер балалардың дамуының бұзылуын диагностикалаудың заманауи тәсілдерін әзірлеуге, оқытуда уақтылы түзетуге және мектептегі оқу жүктемесін жоспарлауға пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: ассоциативті оқыту, бекіту, когнитивті функцияларды дамыту, жас динамикасы, психофизиологиялық сипаттамалар

Age-related psychophysiological parameters of associative learning with reinforcement

D. Abdilmanov¹, G.K. Datkhabayeva¹, M. Zholdassova¹, A.M. Kustubayeva^{*1}

¹*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

Abstract. Associative learning is a cognitive function that ensures adaptive behavior and safe functioning. It includes a set of cognitive processes involving neural networks of interested areas of the brain responsible for information processing, executive control, sensorimotor coordination, and the subjective experience of reward and punishment, and depends on their integration with each other and feedback signals. The identification of psychophysiological patterns of the normal development of cognitive function is important for understanding its mechanisms, establishing age norms, and early identification of developmental abnormalities. The research aims to study the age-related dynamics of learning with reinforcement in children using a deterministic learning paradigm. It was revealed that the rate of sensorimotor reaction (SR) to visual stimuli is significantly higher in older children, and the temporal dynamics of SR change with age: at the early stages of learning, SR increases in both age groups, and at the later stages, it decreases in younger children and reaches a "plateau" in older children. The similarity of the pattern of SR fluctuations in the early and late stages of learning is shown: SR growth in the late stages of learning relative to the early ones in both age groups. The observed age patterns may indicate the peculiarities of the development of learning mechanisms. The results obtained can be useful for the development of modern approaches to the diagnosis of developmental disorders in children, their correction in the learning process, and in planning the educational load at school.

Keywords: associative learning, reinforcement, development of cognitive functions, age dynamics, psychophysiological characteristics

References

1. Nussenbaum K, Hartley CA. Reinforcement learning across development: What insights can we draw from a decade of research? *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2020; 45:100832. doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100733
2. Gerraty RT, Davidow JY, Foerde K, Galvan A, Bassett DS, Shohamy D. Dynamic Flexibility in Striatal-Cortical Circuits Supports Reinforcement Learning. *Journal of Neuroscience*. 2018;38(10):2442-2453. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2084-17.2018
3. Kustubayeva AM, Nelson EB, Smith ML, Allendorfer JB, Eliassen JC. Functional MRI study of feedback-based reinforcement learning in depression. *Frontiers in Neuroinformatics*. 2022;6:1. doi.org/10.3389/fninf.2022.1028121
4. Marco-Pallarés J, Müller SV, Münte TF. Learning by doing: an fMRI study of feed-back-related brain activations. *Neuroreport*. 2007;18(14):1423-6. doi.org/10.1097/WNR.-0b013e3282e9a58c
5. Yael Niv. Reinforcement learning in the brain. *Journal of Mathematical Psychology*. 2009;53(3):139-154. https://doi.org/10.1016/j.jmp.2008.12.005
6. Eliassen JC, Lamy M, Allendorfer JB, et al. Selective role for striatal and prefrontal regions in processing first trial feedback during single-trial associative learning. *Brain Research*. 2012;1458:56-66. doi.org/10.1016/j.brainres.2012.04.010
7. Rodriguez Buritica JM., Eppinger B, Heekeren HR. et al. Observational reinforcement learning in children and young adults. *npj Science of Learning*. 2024;9(18). doi.org/10.1038/s41539-024-00227-9

8. Lauzon SA, Abraham AE, Curcin K, Butler BE, Stevenson RA. The relationship between multisensory associative learning and multisensory integration. *Neuropsychologia*. 2022;174:108336. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108336
9. Pechtel P, Pizzagalli DA. Disrupted reinforcement learning and maladaptive behavior in women with a history of childhood sexual abuse: a high-density event-related potential study. *JAMA Psychiatry*. 2013;70(5):499-507. doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2013.728
10. Shephard E, Jackson GM, Groom MJ. Electrophysiological correlates of reinforcement learning in young people with Tourette syndrome with and without co-occurring ADHD symptoms // *International Journal of Developmental Neuroscience*. 2016;51:17-27. doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2016.04.005
11. Lewis RG, Florio E, Punzo D, Borrelli E. The Brain's Reward System in Health and Disease. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2021;1344:57-69. doi.org/10.1007/978-3-030-81147-1_4
12. Brovelli A, Laksiri N, Nazarian B, Meunier M, Boussaoud D. Understanding the neural computations of arbitrary visuomotor learning through fMRI and associative learning theory. *Cerebral Cortex*. 2008;18:1485-1495. doi.org/10.1093/cercor/bhm198
13. Daw ND, O'Doherty JP, Dayan P, Seymour B, Dolan RJ. Cortical substrates for exploratory decisions in humans. *Nature*. 2006;441:876-879. doi.org/10.1038/nature04766
14. Palidis DJ, Gribble PL. EEG correlates of physical effort and reward processing during reinforcement learning. *Journal of Neurophysiology*. 2020;124(2):610-622. doi.org/10.1152/jn.00370.2020
15. Subramanian A, Chitlangia S, Baths V. Reinforcement learning and its connections with neuroscience and psychology. *Neural Networks*. 2022;145:271-287. doi.org/10.1016/j.neunet.2021.10.003
16. Christakou A, Gershman SJ, Niv Y, Simmons A, Brammer M, Rubia K. Neural and Psychological Maturation of Decision-making in Adolescence and Young Adulthood. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2013;25(11):1807-1823. doi.org/10.1162/jocn_a_00447
17. Aleksandrov YUI. Psikhofiziologicheskiye zakonomernosti obucheniya i metody obucheniya [Psychophysiological patterns of learning and teaching methods]. *Psikhologicheskiy zhurnal* [Psychological journal]. 2012;33(6):5-19. [in Russian]
18. Deoni SCL, Dean DC, Remer J, Dirks H, O'Muircheartaigh J. Cortical maturation and myelination in healthy toddlers and young children. *NeuroImage*. 2015;115:147-161. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.058
19. Paus T. Functional anatomy of arousal and attention systems in the human brain. *Progress in Brain Research*. 2000;126:65-77. doi.org/10.1016/S0079-6123(00)26007-X
20. Caviness VJ Jr, Kennedy DN, Richelme C, Rademacher J, Filipek PA. The human brain age 7-11 years: a volumetric analysis based on magnetic resonance images. *Cerebral Cortex*. 1996;6(5):726-36. doi.org/10.1093/cercor/6.5.726
21. Kelly C, Ball G, Matthews LG, et al. Investigating brain structural maturation in children and adolescents born very preterm using the brain age framework. *Neuroimage*. 2022;247:118828. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118828
22. Buyanova IS, Arsalidou M. Cerebral White Matter Myelination and Relations to Age, Gender, and Cognition: A Selective Review. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2021;15:662031. doi.org/10.3389/fnhum.2021.662031
23. Ball G, Kelly CE, Beare R, Seal ML. Individual variation underlying brain age estimates in typical development. *Neuroimage*. 2021;15(235):118036. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118036
24. Machinskaya RI, Krupskaya EV. Sozrevaniye regulatorynykh struktur mozga i organizatsiya vnimaniya u detey mladshego shkol'nogo vozrasta [Maturation of regulatory structures of the brain and organization

of attention in children of primary school age]. Kognitivnyye issledovaniya: sb. nauch. trudov [Cognitive research: collection of scientific papers] M.: Izd-vo Instituta psikhologii RAN; 2008;2:32–48. [in Russian]

25. Van Leijenhorst L, Gunther Moor B, Op de Macks ZA, et al. Adolescent risky decision-making: neurocognitive development of reward and control regions. *Neuroimage*. 2010;51(1):345-55. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.038

26. Snook L, Paulson LA., Roy D, et al. Diffusion tensor imaging of neurodevelopment in children and young adults. *Neuroimage*. 2005;26:1164–1173. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.03.016

27. Bezrukikh MM., Machinskaya RI., Farber DA. Strukturno-funktsional'naya organizatsiya razvivayushchegosya mozga i formirovaniye poznavatel'noy deyatel'nosti v ontogeneze rebenka. [Structural and functional organization of the developing brain and the formation of cognitive activity in the ontogenesis of a child] *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2009;35(6):10-24. [in Russian]

28. Machinskaya R.I. Neyrofiziologiya kognitivnogo razvitiya. Istoriya nauchnogo napravleniya i laboratorii [Neurophysiology of cognitive development. History of the scientific direction and laboratory]. *Novyye issledovaniya* [New research]. 2024;3(79):144-182. doi.org/10.46742/2072-8840-2024-79-3-144-182 [in Russian]

29. Casey BJ, Giedd JN, Thomas KM. Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*. 2000;54(1-3):241-57. doi.org/10.1016/s0301-0511(00)00058-2

30. Gómez-Pérez E, Ostrosky-Solís F, Próspero-García O. Desarrollo de la atención, la memoria y los procesos inhibitorios: relación temporal con la maduración de la estructura y función cerebral [The development of attention, memory and the inhibitory processes: the chronological relation with the maturation of brain structure and functioning]. *Rev Neurol*. 2003;37(6):561-7. doi.org/10.33588/rn.3706.2003092 [Spanish]

Сведения об авторах:

Абдильманов Данияр – докторант кафедры биофизики, биомедицины и нейронауки Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Датхабаева Гаухар Кубеновна – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры биофизики, биомедицины и нейронауки Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Жолдасова Манзура Кенесбекқызы – PhD, ассоциированный профессор, научный сотрудник Института мозга Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Кустубаева Альмира Мэлсовна – автор-корреспондент, кандидат биологических наук, профессор, директор Института мозга Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Авторлар туралы мәліметтер:

Абдильманов Данияр – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, биофизика, биомедицина және нейроғылым кафедрасының докторанты, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Датхабаева Гаухар Кубеновна – биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, биофизика, биомедицина және нейроғылым кафедрасының аға оқытушысы, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Жолдасова Манзура Кенесбекқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Ми Институтының ғылыми қызметкері, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Кустубаева Альмира Мэлсовна – хат-хабар авторы, биология ғылымдарының кандидаты, профессор, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Ми Институтының директоры, әл-Фараби д., 71, 050040, Алматы, Қазақстан.

Information about the authors:

Abdilmanov Daniyar – PhD student, Department of Biophysics, Biomedicine and Neuroscience, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

Datkhabayeva Gaukhar – PhD, Senior Lecturer, Department of Biophysics, Biomedicine and Neuroscience, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

Zholdassova Manzura – PhD, associate professor, researcher, Brain Institute, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan.

Kustubayeva Almira – Corresponding author, candidate of biological sciences, professor, Director of the Brain Institute of Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave. 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.