

обзорная статья

## Проблемы и перспективы современных подходов к изучению стратегий пространственного мышления

Барцева Ксения Викторовна

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия,

Санкт-Петербург

<https://orcid.org/0000-0003-4854-726X>

Лиханов Максим Владимирович

Пекинский педагогический университет, Китай, Пекин

<https://orcid.org/0000-0001-6003-741X>

Солдатова Елена Леонидовна

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия,

Санкт-Петербург

<https://orcid.org/0000-0002-3902-0557>

[elena.l.soldatova@gmail.com](mailto:elena.l.soldatova@gmail.com)

Поступила 15.11.2023. Принята после рецензирования 06.12.2023. Принята в печать 14.12.2023.

**Аннотация:** Пространственное мышление (пространственная способность, *spatial ability*) является важным предиктором успешности в математике, инженерии, науке и других связанных областях. Однако успешность (*performance*) решения пространственных задач имеет достаточно большую вариабельность, которая связана с большим числом факторов, включая социоэкономические и биологические. Стратегии решения пространственных задач – еще один важный, но трудный для изучения фактор, понимаемый как подход, осознанно или неосознанно выбираемый для решения пространственной задачи. В литературе рассматриваются стратегии решения задач на ментальное вращение, пространственную визуализацию, навигацию в естественной среде или в виртуальном лабиринте, механическое мышление и т. д. Обсуждается практическая польза этих исследований: выявление оптимальных стратегий может принести пользу образованию, инженерной психологии, логистике и юзабилити. В настоящем обзоре мы обобщили результаты около ста исследований, опубликованных в ведущих международных журналах, выявили основные тенденции, достижения и проблемы этих работ, а также представили возможные дальнейшие пути развития этого исследовательского направления. Основными методами исследования стали методы работы с литературой: анализ, систематизация и обобщение. Особый акцент сделан на современных методах изучения пространственных стратегий, а именно методах записи движений глаз, работы мозга и перемещений человека в пространстве, которые позволяют получить более точные и объективные данные о применяемых стратегиях при решении конкретной задачи, чего не позволяют сделать традиционно применявшиеся методы самоотчетов. Сбор и накопление таких данных позволит получить новое знание о пространственных стратегиях, а именно: 1) уточнить список существующих пространственных стратегий; 2) определить стратегии (или их комбинации), связанные с более успешным выполнением пространственных задач; 3) определить связи между пространственными стратегиями и индивидуальными различиями, например, полом или тревожностью; 4) разработать новые методы тренировки и развития пространственного мышления; 5) перейти от исследований стратегий в психометрических тестах к изучению стратегий работы с пространственной информацией в повседневной и профессиональной деятельности. В свою очередь, это поможет ответить на запрос современной экономики в подготовке новых квалифицированных инженерных кадров.

**Ключевые слова:** пространственные способности, пространственное мышление, когнитивные способности, стратегии решения когнитивных задач, образы, вербально-логическое мышление

**Цитирование:** Барцева К. В., Лиханов М. В., Солдатова Е. Л. Проблемы и перспективы современных подходов к изучению стратегий пространственного мышления. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки.* 2023. Т. 7. № 4. С. 383–398. <https://doi.org/10.21603/2542-1840-2023-7-4-383-398>

review article

## Challenges and Further Directions of Research on Spatial Thinking Strategies

Ksenia V. Bartseva

St. Petersburg University, Russia, St. Petersburg

<https://orcid.org/0000-0003-4854-726X>

Maxim V. Likhanov

Beijing Normal University, China, Beijing

<https://orcid.org/0000-0001-6003-741X>

Elena L. Soldatova

St. Petersburg University, Russia, St. Petersburg

<https://orcid.org/0000-0002-3902-0557>[elena.l.soldatova@gmail.com](mailto:elena.l.soldatova@gmail.com)

Received 15 Nov 2023. Accepted after peer review 6 Dec 2023. Accepted for publication 14 Dec 2023.

**Abstract:** Spatial thinking (spatial ability) is an important predictor of success in mathematics, engineering, science and other related fields. Spatial performance is related to a large number of factors, including socio-economic and biological influences. Strategies of spatial thinking, understood as the approach, consciously or unconsciously, chosen to solve a spatial problem, is one of the factors that contribute to overall performance. The literature discusses strategies for solving different spatial tasks, including mental rotation, spatial visualisation, navigation, and mechanical reasoning, which are partly overlapping but also have some distinct features. In this review, we have summarised more than one hundred studies published in leading international journals, identified the main trends, insights and limitations of these studies, and presented possible future directions of this research area. A special emphasis is placed on the contemporary methods for studying spatial strategies, including eye tracking, neuroimaging (EEG, fMRI, fNIRS), non-invasive brain stimulation, and tracking location in space (VR mazes, GPS data). The practical significance of this research is discussed. For example, identifying strategies optimal for performance in a specific task can benefit education, engineering psychology, logistics and usability.

**Keywords:** spatial abilities, spatial intelligence, cognitive abilities, problem-solving strategies, visual imagery, verbal-analytical thinking

**Citation:** Bartseva K. V., Likhanov M. V., Soldatova E. L. Challenges and Further Directions of Research on Spatial Thinking Strategies. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye i obshchestvennye nauki*, 2023, 7(4): 383–398. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2542-1840-2023-7-4-383-398>

### Введение

Пространственные способности (англ. *spatial ability*; далее – ПС) можно определить как индивидуально-психологические особенности, обеспечивающие успешность в оперировании и обработке пространственной информации [1]. Результаты психометрических тестов (англ. *performance*) на пространственные способности важны для прогноза карьерной и образовательной траектории, т. к. могут предсказывать сферу и уровень достижений человека, в частности в STEM-областях (естественные науки, технические науки, инженерное дело и математика, англ. *science, technology, engineering and mathematics*) [2–4]. При этом дисперсия результатов частично объясняется другими индивидуальными различиями. Р.-Е. Еме и Ж. Магьер подразделяют их на количественные (объем визуально-пространственной рабочей памяти, скорость обработки зрительной информации, скорость ответа) и качественные (т. н. стратегии) [5].

Стратегия определяется как выбор последовательности процессов при выполнении когнитивной задачи [5]. Слово *выбор* в этом определении отличает стратегии от тех процессов, которые являются неотъемлемой

частью решения задачи (например, задача на ориентирование по карте неотъемлемо включает в себя процессы зрительного поиска), и подразумевает, что одна и та же задача может быть решена с использованием разных стратегий. При этом выбор стратегии часто осуществляется неосознанно, что делает стратегии сложным для изучения явлением [6] А. К. Lobben описывает следующий пример того, как человек выбирает стратегию для решения пространственной задачи на ориентирование по карте: человек, у которого сравнительно плохо развита зрительная память, вынужден дольше анализировать карту, чтобы отобразить детали маршрута, которые будут ключевыми. Человек, обладающий хорошо развитой способностью к мысленному вращению объектов, может не вращать карту физически во время навигации [7, р. 273]. Таким образом, стратегия, в отличие от операции, включает в себя элемент выбора (возможно, не осознаваемого) о способе распоряжения имеющимися ресурсами [8]. Кроме того, выбор стратегии зависит и от содержания самой задачи. В литературе продолжается дискуссия о том, являются ли пространственные способности

однофакторным [9–11] или многофакторным [12–14] конструктом. Так, обсуждаются стратегии ментального вращения, навигации, пространственной визуализации, чтения карт и др., каждая из которых приблизительно соответствует определенному типу задачи. Ниже мы рассмотрим примеры пространственных стратегий, которые описаны в литературе.

На сегодняшний день нет однозначно принятой классификации пространственных стратегий, несмотря на то что данная проблема изучается с 1953 г., когда вышла статья «Анализ вербальных отчетов о решении пространственных задач как инструмент определения пространственных факторов» (см. [15]). С момента выхода публикации анализ самоотчетов долгое время оставался доминирующим методом изучения пространственных стратегий [6], накладывая тем самым множество методологических ограничений, приводя к низкой реплицируемости и высокой противоречивости результатов. Однако именно эти результаты сформировали тот язык, на котором говорят сегодня исследователи, изучающие пространственные стратегии [16]. Цель данного раздела статьи состоит в том, чтобы познакомить читателя с этим довольно специфическим и неточным языком, а об ограничениях, сложностях и противоречиях данного языка речь пойдет в разделе *Результаты*, особенно в параграфе *Современные методологические подходы к изучению пространственных стратегий*.

Теоретическая модель описания пространственных стратегий, которая сегодня является доминирующей, основана на противопоставлении двух стратегий: холистической (в некоторых исследованиях – целостной, образной, глобальной, гештальтной) и дробной (в некоторых исследованиях – фрагментарной, аналитической, локальной). Холистическая стратегия описывает подход, при котором пространственный образ (объект или пространственное расположение нескольких объектов) создается и трансформируется как единое целое – например, карта воспринимается как некий цельный образ или фигура, которую нужно мысленно повернуть, вращается целиком. Дробная, или аналитическая, стратегия описывает противоположный подход – образ разделяется на более мелкие части, которые обрабатываются и анализируются отдельно. Целостная стратегия традиционно считается более эффективной: было показано, что участники с более высоким уровнем ПС склонны использовать именно ее. Кроме того, целостную стратегию чаще используют мужчины, и результаты их пространственных тестов традиционно выше, чем у женщин. Это показано в целом ряде метаанализов в неотобранных популяциях [17–20], а также отдельных исследованиях на выборках, отобранных на основе высоких достижений в STEM [21; 22]. Обсуждаются разные объяснения наблюдаемых различий, например,

утверждается, что холистическая стратегия опирается на собственно визуально-пространственные процессы, тогда как при дробной стратегии задействуются и вербально-логические.

При этом холистическая и дробная стратегии могут быть использованы для решения разных типов пространственных задач, как указано, к примеру, в работе J. Glueck и S. Fitting [23]. При навигации холистическая стратегия приравнивается к использованию целостной репрезентации пространства, напоминающей карту, в которой очерчены основные пространственные отношения между элементами. Приведем пример: если факультет психологии Санкт-Петербургского государственного университета находится на набережной, около стрелки Васильевского острова, а общежитие – на противоположной стороне, около Финского залива, то с использованием холистической стратегии нам достаточно представлять себе примерное расположение линий и проспектов, чтобы добраться из одного конца острова в другой. При таком подходе вполне естественно срезать дорогу или попробовать другой маршрут, опираясь на образ (мысленную карту) взаимного расположения объектов. Аналитическая стратегия при навигации часто называется маршрутной (англ. *route-based*) или ориентирной (буквально – основанной на ориентирах, англ. *landmark-based*) – она подразумевает запоминание некоторых деталей маршрута, ориентируясь на которые человек передвигается от одной детали к следующей. Например, возвращаясь к уже приведенному примеру, запоминание последовательности *Биржевая линия – Тучков переулок – Средний проспект* и т. д., поиск этих названий на указателях или же запоминание последовательности достопримечательностей, увиденных по дороге.

В задании на ментальное вращение те же стратегии будут выглядеть иначе [24]. В заданиях такого типа участнику предлагается несколько фигур, объектов или картинок, а участник должен ответить – есть ли среди вариантов ответа такая фигура, которая после вращения совпадает с образцом [25]. Холистическая стратегия в таком задании подразумевает, что мысленный образ, предложенной для вращения, действительно вращается, при этом целиком (поэтому иногда в статьях используются названия *двигательная* или *стратегия ментального вращения*). Аналитическая стратегия подразумевает, что фигура мысленно разделяется на кусочки и уже эти кусочки попарно сравниваются друг с другом. Например, человек может рассуждать следующим образом: «если эту деталь повернуть на 180 градусов, то она будет выглядеть вот так, и если ее соединить с этой, то вместе они...».

В заданиях на пространственную визуализацию холистической стратегией будет представление описанных действий: складывания, прокалывания, разворачивания, работа с целостными образами.

Например, в задании «Складывание бумаги», где участнику нужно мысленно сложить лист бумаги, проткнуть его так, как указано на рисунке, развернуть и представить, как будут расположены проколы, аналитическая стратегия будет подразумевать попарное сравнение проколов в вариантах ответа и в образце, по очереди, т. е. с разделением образа на части: «Если сделать прокол тут, то при раскладывании бумаги отверстия будут тут и тут, а прокол в углу при раскладывании окажется...»

Важно отметить, что несмотря на популярность именно бинарной оппозиции стратегий, часто к холистической и дробной стратегии добавляют и другие: например, в статье K. Schultz говорится о третьей стратегии – изменения перспективы [26]. Вопрос о соотношении стратегии и перспективы остается дискуссионным: некоторые исследователи говорят о существовании эгоцентрической и / или аллоцентрической стратегии: *перемещение объекта vs перемещение себя* [27]. При перемещении объекта позиция наблюдателя не меняется, а задача решается мысленным перемещением объектов. При перемещении наблюдателя расположение объектов остается неизменным, двигается именно наблюдатель. Данное противопоставление базируется на противопоставлении ментальных репрезентаций, выбор которых исследователи выделяют в отдельный процесс – возможно, даже более базовый, чем выбор стратегии, т. к. он включает в себя построение ментальной карты (модели) пространства. Так, M. Hegarty считает, что успешность решения пространственной задачи предсказывается всего двумя характеристиками: выбором оптимальной репрезентации и выбором оптимальной стратегии работы с этой репрезентацией [28].

Выделяют и другие пары стратегий, например, трехмерная и плоскостная (двухмерная) стратегии [27]. Стоит отметить, что при решении многих пространственных задач (например, при ориентировании по карте) часто требуется переключение между двух- и трехмерными репрезентациями, что является отдельной пространственной задачей. Верификация и фальсификация не специфичны для пространственных задач: верификация означает, что правильное решение достигается путем активного поиска, а фальсификация – что решение приходит в процессе исключения неправильных вариантов. S. M. Kosslyn et al. выделяли две специфические стратегии ментального вращения: внутреннюю (где человек может представить собственное движение, вращающее стимул) и внешнюю (где человек будет представлять вращение стимула, вызванное какой-то внешней силой) [29].

Кроме того, термин *стратегия* неоднократно использовался в статьях, описывающих вклад вербальных и моторных процессов в решение пространственных задач: *verbal strategy* (см. [30; 31]); *motor strategy*

(см. [32; 33]). Однако данные противоречивы: ключевым вопросом является определение того, всегда ли моторные / вербальные процессы активируются во время решения пространственных задач, или же участник может сделать выбор в пользу решения задачи через представление физического движения (т. е. моторную стратегию), языковое логическое рассуждение (т. е. вербально) или визуальное представление.

В литературе изучение вербальных стратегий связано с изучением гендерных различий. В многочисленных исследованиях показано, что уровень ПС у женщин ниже, чем у мужчин [18–20]. Существуют предположения, что это обусловлено различиями в гормонах [34], социальной роли [35], смежных когнитивных способностях, таких как уровень визуально-пространственной рабочей памяти [36], а также в выборе пространственных стратегий.

Исследования показывают, что женщины лучше мужчин выполняют тест на навигацию, в котором необходимо запомнить расположение и название объектов, а затем воспроизвести эту информацию (большое кросс-культурное исследование с данными из 40 стран [37] и метаанализ [38]). Предполагается, что это объясняется более высоким уровнем вербальных способностей у женщин (в частности, различиями в вербальной памяти [39] и словарном запасе [40]) и тем, что женщины опираются на свои более высокие вербальные способности, чтобы компенсировать недостаточную развитость тех процессов, на которые опираются мужчины (компенсирующий эффект высоких вербальных способностей уже описан, например, при изучении математики [41]). В 2014 г. L. Wang и M. Carr представили модель, связывающую гендерные различия в пространственных способностях, стратегиях, вербальной и визуально-пространственной рабочей памяти [42], однако в этом исследовании они отождествили аналитическую стратегию с вербальной, а позднее не смогли воспроизвести свою теоретическую модель на эмпирических данных [43].

Современные исследователи отмечают, что традиционные оппозиции стратегий, описанные выше, оторваны от эмпирических данных. В 2019 г. A. Nazareth предположила, что со временем, с накоплением большего количества данных, собранных с использованием объективной современной методологии, будет сформирована новая теоретическая рамка изучения стратегий пространственного мышления [16]. В связи с этим важной становится задача настоящего обзора: проанализировать классические и современные исследования пространственных стратегий, выявить преимущества и ограничения использованных в них методов, а затем на основе обобщения современных эмпирических данных указать возможные перспективы для будущих исследований, посвященных изучению стратегий пространственного мышления.

В настоящем обзоре мы проанализировали около ста научных статей, опубликованных в рецензируемых международных журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и Google Scholar. Основными методами исследования стали методы работы с литературой: анализ, систематизация и обобщение.

## Результаты

### Традиционные методы изучения пространственных стратегий и их ограничения

Почти 50 лет анализ вербальных самоотчетов (в свободной форме и с наводящими вопросами, в момент выполнения задания и по памяти, предварительно и ретроспективно) оставался основным инструментом изучения пространственных стратегий [6]. При этом данный метод активно критикуется: исследователи указывают, что разговор о стратегиях до или во время выполнения теста может создать эффект прайминга (вызвать фиксирование некой предварительно заданной установки). Естественное забывание может исказить информацию в ретроспективном отчете (участники склонны забывать о первых пробах и анализировать пробы в конце). Говорение в процессе решения задач занимает много когнитивных ресурсов, вмешивается в естественную логику решения и в целом требует от участника очень высокого уровня самосознания и владения речью [6; 44]. Отметим, что специальные анкеты и опросники [26] также основаны на самоотчете участника и, следовательно, «наследуют» многие перечисленные выше проблемы и ограничения.

Среди наиболее распространенных методов – изучение времени реакции и скорости ответов. Использование данных метрик в качестве индикаторов когнитивной стратегии основано на допущении, что одна стратегия занимает больше времени, чем другая [45], например, повернуть фигуру целиком можно быстрее, чем попарно сравнивать ее кусочки. В случае, если для решения задачи нужно представить движение, время решения должно соотноситься с совершением этого же движения в реальности [46; 47]. Недостатком такого подхода является то, что он игнорирует альтернативные объяснения: например, время реакции может зависеть от мотивации и усталости в большей степени, чем от использованной стратегии. В контексте пространственных способностей исследования показывают, что в среднем женщины склонны быть более тревожными, из-за этого они решают задачи медленнее и реже пытаются угадать ответ [48; 49]. Таким образом, половые различия во времени ответа могут быть отражением осторожного поведения и уверенности, а не следствием выбора пространственной стратегии.

Другим методом изучения пространственных стратегий является манипулирование стимулами. Например, в описанном Р. Khooshabeh et al. примере участники

должны были выполнить задания на мысленное вращение с целыми фигурами (обычные стимулы) и фрагментированными, разделенными на части. Основанием для такой манипуляции было противопоставление целостной и дробной стратегий. Гипотеза заключалась в том, что фрагментированные фигуры не могут восприниматься целостно и будут мешать решению у тех участников, которые обычно предпочитают холистическую стратегию. Результаты подтвердили эту гипотезу. Участники с хорошими способностями к представлению зрительных образов значительно медленнее вращали фрагментированные фигуры, в то время как участники с плохими способностями показали схожие задержки при вращении двух типов стимулов [50]. Более комплексные манипуляции со стимульным материалом описали А. R. Bilge и Н. А. Taylor. Исследователи сравнивали не только целостные и разрезанные объекты (как в предыдущем исследовании), но и заключали стимулы в рамку, чтобы создать основания для целостного подхода (круглая рамка) или создать некую картезианскую систему координат (прямоугольная рамка), относительно которой может рассчитываться угол разворота фигуры. Эти модификации комбинировались между собой в нескольких экспериментах. Дополнительно все участники заполнили несколько анкет, касающихся их привычного пространственного поведения: пользуются ли они картами, знают ли, где в их родном городе находятся север, юг, восток и запад? Результаты показали, что целые фигуры помогают участникам давать более быстрые ответы, чем разрезанные, а рамки препятствуют вращению в целом, особенно для разрезанных фигур [51]. В целом главным ограничением метода манипулирования стимульным материалом можно считать его низкую генерализуемость, т. е. переносимость на другие стимулы / задания. Необходима дополнительная проверка внешней валидности результатов, чтобы оценить, совпадают ли стратегии, выделенные в тесте на ментальное вращение с одним типом стимульного материала, по меньшей мере со стратегиями в таком же тесте, но с другими стимулами [24]. А насколько генерализуемы такие результаты между тестами? Интересно, что в ранее описанной статье [51] пространственные привычки были связаны со стратегиями. Люди, которые сообщили в опроснике, что чаще опираются на указатели или устные объяснения, чаще использовали дробную стратегию, а люди, сообщавшие, что они чаще пользуются картами, чаще прибегали к целостной стратегии.

Интересным, но редко применимым методом является селективная интерференция: создание дополнительной мешающей нагрузки, которая будет занимать часть процессов, которые могли бы использоваться в решении пространственных задач. Для создания такой интерференции во время решения теста

на ментальное вращение участников просят решать задачи на визуально-пространственную или вербальную рабочую память [52], сохранять в памяти абстрактное изображение или позу человеческого тела [53]. Результаты сравниваются между группами. Например, в одном исследовании было выдвинуто предположение, что если на спортсменов моторная интерференция повлияла сильнее, чем на неспортсменов, значит они привыкли сильнее полагаться на моторные процессы при решении когнитивных задач [54]. Данные методы, как правило, используются при изучении вербальных и моторных стратегий, о роли которых в решении пространственных задач до сих пор ведутся дискуссии.

О важности изучения пространственных стратегий свидетельствуют современные исследования, связанные с образованием. Показано, что именно работа со стратегиями напрямую, их идентификация [55] и тренировка в образовательном процессе [56] способствуют сокращению и преодолению неравенства между полами как в тестировании ПС, так и в успешности деятельности в сфере STEM.

Более того, исследования показывают, что тренировка решения пространственных задач может переноситься не только на успешность решения других задач (см. метаанализ [57]), но и на стратегии решения других задач. Например, было зафиксировано, что тренировка ментального вращения привела к повышению успешности решения арифметических задач. В частности, школьники смогли мысленно превратить горизонтальную проблему в вертикальную (перевернуть ее), чтобы было удобнее проводить операцию сложения или вычитания (в столбик) и / или смогли использовать стратегию декомпозиции, трансформируя большое число в несколько простых (12 в 10 и 2), что также облегчило проведение вычисления и снизило количество ошибок [58].

Подведем промежуточный итог: несмотря на то что исследования указывают на важность изучения стратегий, на сегодняшний день и теоретическая, и методологическая рамки довольно сильно устарели и не позволяют решить теоретические и практические задачи, стоящие перед исследователями. Необходимо продолжать изучение пространственных стратегий с использованием новых, более точных, более объективных методов, таких как электроэнцефалография (ЭЭГ), функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия (fNIRS), транскраниальная магнитная и электрическая стимуляция (ТМС, ТЭС), отслеживание движений глаз (айтрекинг, англ. *eye tracking*), и сбор цифровых следов о маршрутах. В следующей части обзора мы рассмотрим подробнее, какие методы изучения стратегий используются сегодня и каких результатов они уже позволили достичь.

### Современные методологические подходы к изучению пространственных стратегий

В 2010 г. вышел комплексный обзор М. Hegarty «Компоненты пространственного мышления» [28]. В нем, на наш взгляд, наиболее полно и системно осмыслены предыдущие исследования пространственных стратегий. Сделан новаторский для своего времени вывод, что при изучении стратегий нужно говорить не о выборе одной стратегии как более эффективной, а о гибком выборе образных (визуально-пространственных, холистических) и аналитических (вербально-логических) процессов, которые могут сочетаться у одного участника даже в пределах одного задания. Например, она приводит пример эффективного комбинированного решения задач в тесте «Складывание бумаги», в котором необходимо оценить количество проколов, сделанных в сложенном листе бумаги. Если сначала посмотреть на место первого прокола и аналитически отобрать те варианты ответа, где этот прокол присутствует, то это сократит время и усилия на дальнейшее использование образной холистической стратегии. Кроме того, М. Hegarty подчеркивает, что комбинирование аналитических и образных (хотя она использует термин *симуляционных*, т.к. симулироваться может не только зрительный образ, но и действие) процессов становится особенно важным при изучении более сложных пространственных задач, например на базовую механику, где нужно представить в пространстве взаимное движение шестеренок, рукояток и блоков [59].

Подчеркнем, что в статье о механическом мышлении использовался метод айтрекинга, и именно он позволил М. Hegarty сделать такой вывод. По нашим данным, эта статья, вышедшая в 1992 г., значительно опередила свое время и хронологически стала одной из первых работ [60], где для изучения пространственных стратегий использовался айтрекинг [61]. Айтрекинг показал, что движение взгляда человека, как правило, повторяет логику движения, передающегося от одной шестеренки к другой. Однако при этом важную роль играет то, как именно человек делит образ на отдельные блоки для дальнейшего представления, а также то, как человек, решая последовательность однотипных задач, аналитически выводит правила, по которым функционирует задача. Использование современных методов, позволяющих собирать объективные данные прямо в процессе решения задачи, – еще одна тенденция, которая отражена в большом количестве работ, опубликованных в 2010–2023 гг.

Дальнейший обзор мы структурировали по трем методам, которые используются в современных исследованиях стратегий решения пространственных задач: 1) изучение нейрональных коррелятов (ЭЭГ, МРТ, fNIRS, ТЭС и ТМС); 2) айтрекинг; 3) регистрация перемещений с использованием GPS-данных.

### 1. Нейрональные корреляты разных стратегий решения пространственных задач

Прежде всего, признаем, что использование методов нейровизуализации для изучения стратегий решения когнитивных задач само по себе не является открытием последних десятилетий. Например, в статье 1997 г. был представлен обзор нейронаучных статей, в которых исследовалась активность разных полушарий при решении задач на ментальное вращение и сделан вывод, что холистическая стратегия связана с большей активностью правого полушария, а дробная – с активностью левого полушария [62]. Однако сегодняшние исследования характеризует более высокая точность оборудования, отход от локализационизма, постепенный отход от теоретической рамки, сформулированной на ранних этапах, и большей опора на данные.

Так, исследования с использованием неинвазивной стимуляции мозга, а также нейроимиджинговых методов пока свидетельствуют против существования специфической моторной стратегии и в пользу неотъемлемого имплицитного присутствия моторных процессов в решении пространственных задач. Так, метаанализ показал типичность активации моторных зон, связанных с движением рук и пальцев, при решении пространственных задач, которые подразумевают мысленную манипуляцию объектами (например, ментальное вращение) [63].

В исследовании В. А. Osuagwu и А. Vuckovic было проведено сравнение ЭЭГ-данных при эксплицитном (когда участнику говорилось, что он должен мысленно пошевелить левой или правой рукой) и имплицитном представлении движения (когда участнику нужно было решить задачу на ментальное вращение, а решение этого задания, согласно данным предыдущих исследований, может включать в себя моторный компонент). Пространственный анализ показал, что все зоны, которые были активны при эксплицитном представлении движения, были активны и при мысленном вращении: прецентральная извилина, постцентральная извилина, нижняя теменная доля и средняя лобная извилина. Временно-частотный анализ ЭЭГ обнаружил сходство между двумя условиями в поздней части испытания, когда происходила поздняя десинхронизация в бета-диапазоне. Сходство наблюдалось в сенсомоторных областях, при этом отсутствие статистически значимых отличий говорило о сравнимой интенсивности активации. В обеих задачах наблюдались статистически значимые различия, связанные с латеральностью (представлялось движение правой или левой руки) [64].

При этом есть данные, показывающие, что разные стратегии не влияют на степень вовлеченности первичной моторной коры в ментальное вращение. Так, амплитуда моторного ответа, вызванного ТМС

первичной моторной коры, значимо не различалась между двумя стратегиями, что можно интерпретировать как доказательство того, что при использовании разных стратегий участники опирались на моторные процессы примерно в равной степени [65]. Однако стоит отметить ограничения результатов ТМС-исследования. В нем рассматривалась только пара стратегий, предложенная S. M. Kosslyn (внешняя и внутренняя), а манипуляция стратегиями происходила за счет разного вида стимулов: стимулы, которые человек в повседневной жизни может переворачивать движением руки (инструменты, кисти) и стимулы, вращение которых он может представлять только через воздействие абстрактной силы (абстрактные фигуры, дома). Теоретически полученные результаты могут свидетельствовать не о том, что моторная кора активируется вне зависимости от стратегии, а о том, что выделение самих этих стратегий некорректно.

В ЭЭГ-исследованиях важным компонентом изучения стратегий пространственного мышления стала негативность, связанная с вращением (англ. *rotation-related negativity*). Это вызванный потенциал, который рассматривается как нейронный коррелят самого процесса мысленного вращения [66]. Связанная с вращением негативность представляет собой отрицательный медленноволновой потенциал на теменных электродах во временном интервале 300–600 мс после начала стимула. При увеличении углового расстояния между стимулами положительная амплитуда P300, с которой данный компонент пересекается, становится более отрицательной за счет наложения компонента, связанного с вращением. Сам по себе данный компонент не говорит о моторных процессах. Он указывает на представление вращения, которое не обязательно вызвано телесным движением, поворотом руки. Однако ряд исследований, в которых негативность, связанная с вращением, использовалась для изучения стратегий вращения разных типов стимулов, указал на связь этого компонента с моторными репрезентациями. Так, телесные стимулы (человеческие фигуры) вызывали более сильную негативность, связанную с вращением, чем абстрактные стимулы (буквы) [67]. Кроме того, при вращении стимулов, выглядящих как кисть руки, негативность, связанная с вращением, наблюдалась только в том случае, если такое вращение было возможно совершить анатомически [68]. Интересно, что еще одно ЭЭГ-исследование той же команды с анализом других метрик, в т. ч.  $\mu$ -power, ассоциирующуюся с моторным представлением, также показало важность анатомической возможности движения [69].

На поведенческом уровне несколько исследований показали, что различия в опоре на моторные процессы при решении когнитивных задач могут объясняться предыдущим двигательным опытом

человека – занимается ли он каким-либо спортом, насколько он подвижен и т. д. [70]. Сравнение ЭЭГ-данных также показывает статистически значимые различия в том, как решают задачи на ментальное вращение атлеты и неатлеты. В частности, у атлетов оказываются более выражены амплитуда в компоненте N200 и негативность, связанная с вращением при решении задач с теми стимулами, которые значительно развернуты относительно друг друга, на 120° и 180°. Интересно, что данные ЭЭГ-метрики коррелировали с длительностью тренировок у атлетов. Однако отсутствие анализа источников не позволяет нам объяснять полученные результаты с точки зрения моторных зон и моторных процессов [71].

В заключение блока о моторной стратегии опишем еще одно ЭЭГ-исследование, в котором спектральный анализ мощности в альфа-, тета- и мю-диапазоне при решении задания на ментальное вращение указал на комбинирование аналитических и холистических (связанных с представлением движения) процессов. При решении более сложных задач возрастало количество процессов, связанных с использованием зрительных репрезентаций и рабочей памятью [47].

Далее рассмотрим специфику использования нейровизуализационных методов для изучения навигационных стратегий. Как было неоднократно показано в литературе, навигация связана с работой глубинных структур мозга, которые можно изучать неинвазивно при помощи фМРТ. Исследования с использованием этого метода позволили ученым обнаружить нейрональные корреляты маршрутной и обзорной стратегий. Так, оказалось, что участники, ориентирующиеся по мысленной карте, имеют значительно больше серого вещества в гиппокампе и меньше серого вещества в хвостатом ядре по сравнению с теми, кто запоминал отдельные детали маршрута [72]. Другие исследования с использованием фМРТ указывают, что количество серого вещества в гиппокампе может быть увеличено после тренировки с использованием видеоигр [73], при этом изменения, описанные на нейрофизиологическом уровне, соотносятся с поведенческими данными о переходе от эгоцентрической к аллоцентрической стратегии [74]. В знаменитых исследованиях, проведенных на лондонских таксистах, были получены схожие результаты: количество серого вещества в гиппокампе увеличивалось у людей, которые проходили двухлетнюю программу, обучающую ориентированию на лондонских улицах [75], при этом объем серого вещества в задней части гиппокампа был связан с научением стратегии ориентирования с опорой на когнитивную карту [76].

Однако другие нейроимиджинговые исследования поставили под сомнение целесообразность выделения алло- и эгоцентрической стратегий при навигации. Попытка разделить эти два типа репрезентации при

навигации натолкнулась на сложности в определении их нейронных коррелятов (см. метаанализ [63]) и тот факт, что они могут чередоваться во время решения задачи, в частности навигации (см. [77]). Вопрос разделения осложняется тем, что называется пространственной референтной рамкой, – тем, как человек предпочитает описывать свое положение, используя естественный язык (например, поверни направо или иди на юг) (см. обзор [78]).

В этом контексте достаточно сложно разделить аллоцентрические и эгоцентрические типы пространственных задач. В частности, поиск пути, навигация, ориентация в пространстве обычно считаются *эгоцентрическими*, или задачами большого масштаба, тогда как мысленное вращение, изменение перспективы, механические рассуждения могут считаться *аллоцентрическими*, или задачами малого масштаба. Взаимосвязь между этими типами задач и стратегиями решения должна быть рассмотрена в будущих исследованиях.

Интересно, что более поздние исследования, позволяющие выделить не одну доминирующую стратегию, а скорее, вклад каждой стратегии в решение задачи на разных этапах, указывают на комбинирование маршрутной и обзорной стратегий при навигации. Это наблюдается как на поведенческом уровне по анализу маршрутов, проложенных в виртуальной среде, так и на нейрофизиологическом уровне: при маршрутной навигации гемодинамический сигнал наблюдался в вентромедиальной префронтальной коре, а при обзорной стратегии – в парагиппокальной и гиппокальной областях [79].

Отметим, что сам метод МРТ подразумевает, что участник должен оставаться на месте, ориентируясь лишь в компьютерном пространстве, а не в пространстве вокруг, что ставит под сомнение экологическую валидность таких исследований [80]. Однако эта проблема может быть решена с появлением и распространением новых методов изучения активности мозга, менее чувствительных к движениям участников, в частности fNIRS. Этот метод иногда называется «дешевым фМРТ» и позволяет изучать активность мозга во время движения участника с достаточно высоким пространственным разрешением (см. [81]).

Более того, этот метод уже начинает применяться в исследованиях пространственных способностей [82; 83]. Например, в одном исследовании было показано, что при выполнении задач на пространственную ориентацию активируются зоны мозга, связанные с сенсомоторной адаптацией [84]. Результаты этого исследования, во-первых, перекликаются с исследованиями о вкладе моторных процессов в выполнение пространственных задач, во-вторых, в очередной раз показывают важность адаптации и гибкости стратегии.

## 2. Результаты айтрекинг-исследований

Метод отслеживания движений глаз имеет множество преимуществ, которые объясняют востребованность этого метода при изучении пространственных стратегий. Метод исходит из допущения, что направление взгляда человека является отражением направленности его внимания. Как и методы нейровизуализации, айтрекинг позволяет регистрировать объективные данные во время решения задачи, при этом более простая процедура настройки и распространение легких портативных видеоокулографов позволяют меньше вмешиваться в типичное поведение участника, позволяя человеку свободно передвигаться и выполнять повседневные задачи (см. [85]). Так, в серии исследований портативный, носимый на голове айтрекер позволил исследователям записать естественные передвижения детей и взрослых в загроможденном пространстве: участники беспрепятственно двигались по комнате, спонтанно ходили, прыгали и бегали, адаптируясь к наличию препятствий [86]. Результаты исследования показали, например, что младенцы (в возрасте ~14 месяцев) намного чаще, чем взрослые, удерживают взгляд на препятствии, что отражает изменения визуальных стратегий при навигации с возрастом [87].

Кроме того, гибкость айтрекинга как метода позволяет комбинировать его, например, с записью ЭЭГ [88]. В исследовании, которое использовало ЭЭГ и запись движений глаз, было показано, что: 1) женщины в сравнении с мужчинами больше предпочитали аналитическую стратегию; 2) различия в альфа и бета активности во время выполнения задания на ментальное вращение в виртуальной реальности отсутствуют. Эти результаты могут свидетельствовать о том, что процессы вращения не отличаются у мужчин и женщин, а гендерные различия в пространственных способностях могут быть объяснены выбором стратегии [89].

Интересно, что в исследованиях, использующих метод айтрекинга, наблюдаются тенденции, схожие с теми, которые мы описывали выше, обобщая исследования с применением нейроимиджинга. Во-первых, ведутся поиски таких глазодвигательных характеристик, которые могут быть использованы в дальнейшем анализе стратегий. Например, P. Khooshabeh et al. для изучения стратегий мысленного вращения предложили рассчитывать коэффициент, в котором бы учитывалось соотношение фиксации внутри зоны интереса (фигуры для вращения) к количеству фиксации между объектами [50]. A. Nazareth et al. в дальнейшем усовершенствовали эту характеристику, предлагая рассматривать не общее количество и длительность фиксации, а т. н. *dwell time* – количество фиксации до выхода из зоны интереса [16]. Эти метрики используются для выявления того, как именно происходила визуально-пространственная обработка отдельных стимулов. В случае если взгляд участника

активно перемещается между объектами и делает малое количество остановок внутри выделенных стимулов (регионов интереса), можно предположить, что данный участник более склонен к использованию холистической стратегии, при которой объекты воспринимаются целостно. В случае, если наблюдается большое количество фиксации внутри одного стимула (региона интереса), возможно, наблюдается склонность к дробной (или аналитической) стратегии, при которой стимулы как бы разбиваются на отдельные фрагменты. Подобная логика анализа используется и в навигационных исследованиях, когда рассчитывается, например, количество фиксации на деталях маршрута как индикатор маршрутной стратегии [90] и количество фиксации на полу и стенах для оценки евклидовых расстояний для обзорной стратегии [91]. Ключевым ограничением предложенных метрик является то, что почти все они исходят из предварительно размеченных областей интереса, сфокусированных на конкретных стимулах, соответственно, эти метрики плохо генерализуются между тестами.

Во-вторых, частично подтверждаются данные о том, что мужчины и женщины используют разные стратегии для решения пространственных задач. Исследование [90] показало, что женщины больше, чем мужчины, склонны опираться на стратегию ориентиров, что вело к успешному выполнению задания, но также увеличивало время на его выполнение. Однако исследователи по-прежнему далеки от консенсуса в этом вопросе. Например, более новое исследование показало, что мужчины действительно предпочитают дружную стратегию (стратегию евклидовых расстояний), но женщины не использовали стратегию ориентиров, и, более того, успешность выполнения ими задания не повысилась при использовании инструкций, опирающихся на ориентиры [91; 92].

В-третьих, с повышением точности методов появляются работы, свидетельствующие об устарелости бинарных оппозиций стратегий. Например, в статье A. Nazareth et al. приведен анализ айтрекинг-данных при решении задач на ментальное вращение, в котором сравнивается влияние двух факторов: склонности выбирать одну, более эффективную холистическую стратегию и частота переключений между гибкими и аналитическими процессами. Вопреки господствующей теоретической рамке, именно второй параметр оказался более значимым для предсказания успешности решения. Те участники, кто более гибко переключался между стратегиями, показали результаты выше, чем те, кто жестко следовал какой-то одной стратегии. Дальнейшие исследования выиграют от включения в эту модель характеристик самой задачи (например, психометрического коэффициента сложности), которые могут провоцировать переключение между стратегиями [16].

### 3. Регистрация перемещений

Маршруты, которые люди прокладывают при навигации, являются важными данными, которые можно анализировать. Существуют многочисленные исследования, посвященные анализу маршрутов в виртуальном лабиринте – так, А. Р. Воопе et al. изучили, какие стратегии могут быть использованы во время навигации в компьютерной среде. Они учли такие элементы навигации, как поиск ориентиров, следование по ранее изученному маршруту, визуализация своего положения на карте или использование коротких путей. Первые две особенности указывают на более маршрутную (*route-based*) стратегию, в то время как две последние – на обзорную стратегию (*survey*) [93]. Однако результаты показали, что данное противопоставление стратегий не является исчерпывающим. В частности, было выявлено еще несколько стратегий: нередко участники перемещались по маршрутам, которые не были ни кратчайшими, ни изученными, а иногда добирались до места назначения, просто блуждая. При этом исследование выявило, что показатель объективной стратегии, индекс решения, слабо коррелирует с показателями способности к навигации или анализу перспективы. Более того, исследование обнаружило лишь частичное подтверждение взаимосвязи между самоотчетом о стратегии навигации и объективно измеренной стратегией.

Однако существуют данные, показывающие, что навигацию в виртуальном пространстве нельзя напрямую соотносить с навигацией в естественной среде [94; 95]. Распространение GPS-навигаторов, а также портативных устройств (смартфонов, фитнес-браслетов и т. д.), постоянно носимых человеком, позволяет собирать большие объемы данных о повседневных передвижениях людей, которые могут использоваться в психологических исследованиях [96]. Интересно, что эти данные свидетельствуют о том, что пути, которые люди выбирают в повседневной жизни, часто не являются кратчайшими, но являются наиболее «прямыми», указывающими на путь назначения, что, по мнению авторов исследования, может обеспечивать экономию вычислительных ресурсов для решения дополнительных задач во время передвижения [97].

Однако исследователи обращают внимание на то, что сами по себе GPS-данные малоинформативны; перспективными будут работы, где данные о перемещениях людей будут дополнены данными об индивидуальных различиях [98], в т. ч. об уровне тревожности [99; 100]. Более того, использование навигаторов в повседневной жизни само может стать причиной изменения навигационных стратегий, и многие ученые сейчас обсуждают то, как использование разных стратегий при использовании навигаторов может помочь снизить негативный эффект их повсеместного использования [101].

### Обсуждение

На сегодняшний день можно выявить минимум три тенденции, определяющие современные исследования пространственных стратегий. Во-первых, использование объективных методов для регистрации поведения участника в процессе решения пространственной задачи. Сегодня исследователи признают, что традиционные методы сбора данных имеют множество ограничений [6]. Новые и более объективные инструменты, такие как ЭЭГ, фМРТ, айтрекинг и сбор цифровых следов о маршрутах, могут дать ценные сведения о бессознательных процессах, имеющих отношение к выбору стратегии, не вмешиваясь при этом в естественное поведение участника.

Во-вторых, эмпирическая критика традиционной бинарной модели, описанной на основе поведенческих данных. С развитием новых инструментов и методов данные о гибкости стратегий, которые было сложно выявить при исследовании результатов самоотчетов, теперь легко выявляются и могут быть собраны. В частности, в исследованиях А. Nazareth et al. о мысленном вращении было убедительно показано, что не склонность к одной, якобы более эффективной стратегии, а скорее, переключение между визуализационными и аналитическими процессами наиболее быстро и эффективно предсказывает успешность решения задач [16]. Эта гипотеза косвенно подтверждается в экспериментальных исследованиях, например, в исследовании D. Moreau et al. 2012 г., где после моторной тренировки участники стали чаще пользоваться адаптивной (комбинированной) стратегией [54].

Показательно исследование М. Stieff et al. [56], продемонстрировавшее, что обучение разным типам стратегий может устранить гендерные различия в успешности решения пространственных задач в сфере STEM. Три экспериментальные группы прошли тренировки, сфокусированные вокруг 1) холистической, 2) аналитической и 3) комбинации стратегий. До и после тренировки участникам предлагалось пройти несколько пространственных тестов, а также решить задания по химии, т. к. все учащиеся исследования были студентами, изучающими данный предмет. Результаты показали, что только тренировка с комбинацией стратегий была способна уменьшить наблюдаемые различия между юношами и девушками. Авторы делают вывод, что комбинированное обучение было более эффективным, поскольку оно непосредственно обучало взаимодействию между холистической и аналитической стратегиями, что, возможно, является центральным фактором успеха в решении подобных задач.

Среди ограничений отметим, что в большинстве исследований, даже критикующих бинарную парадигму, все еще говорят в первую очередь

об аналитических vs образных процессах. При этом нужно быть готовыми, что с накоплением новых, более объективных данных теоретическая рамка будет уточнена или пересмотрена. Как отметили A. Nazareth et al., для разработки альтернативной модели решения пространственных задач необходимы новые данные: «важно помнить, что мы пытаемся соотнести паттерны глаз с традиционными описаниями когнитивных стратегий. С ростом использования технологии отслеживания глаз мы ожидаем, что эти существующие определения стратегий будут развиваться, чтобы создать новую теоретическую основу»<sup>1</sup> [16, p. 242].

В-третьих, изучение более сложных типов пространственных задач. Этот пункт связан с двумя предыдущими, т.к. повышение мобильности оборудования (GPS-трекеров, мобильных айтрекеров и fNIRS), а также усложнение моделей анализа данных сделало возможным изучение, например, естественной навигации (в отличие от изучавшейся ранее навигации в специально созданном лабиринте). Однако до сих пор очень немногие исследования рассматривают связь между стратегиями в психометрических пространственных тестах с реальными пространственными задачами. Кроме того, относительно редко рассматривается вопрос, насколько тренируемость пространственных способностей, показанная во многих исследованиях [102], объясняется расширением репертуара пространственных стратегий и / или научением, как выбирать оптимальную стратегию для решения конкретной задачи [56].

Отметим, что в настоящем исследовании за рамками рассмотрения осталась специфичная область изучения пространственных стратегий при работе с пространственной информацией в профессиональной деятельности – например, в инженерии, метеорологии, физике, химии или анатомии [28; 103]. Выделяемые в рамках этой традиции стратегии частично пересекаются с теми, что мы уже упоминали. Например, в одном исследовании решения химических задач выделяются следующие пространственные стратегии: визуальные / воображенные: *я имею тенденцию представлять молекулу в трех измерениях и вращать ее «в голове»*; диаграмматические: *я обычно сначала рисую базовую структуру молекулы и затем меняю ее в ходе решения задачи*; аналитические: *я присваиваю каждой молекуле отдельные лейблы*; алгоритмические: *я использую специальную формулу, чтобы посчитать стереоизомеры* [104].

Однако изучение таких пространственных стратегий имеет свою специфику: во-первых, как показывает приведенный пример, подходы к работе

с реальной пространственной информацией очень вариативны. Во-вторых, большой объем пространственной информации и сложность взаимодействующих элементов вынуждают специалистов и учащихся использовать в деятельности большое количество внешних репрезентаций (таких как карты, модели, схемы и т.д.), в то время как традиционная логика изучения стратегий сосредоточена на репрезентациях внутренних [28].

### Заключение

Исследования пространственных стратегий важны для фундаментальной психологической науки, т.к. они расширяют наше понимание пространственных способностей как конструкта. Сбор и накопление таких данных позволит получить новое знание о пространственных стратегиях, а именно: 1) уточнить список существующих пространственных стратегий; 2) определить стратегии (или их комбинации), связанные с более успешным выполнением пространственных задач; 3) определить связи между пространственными стратегиями и индивидуальными различиями, например полом; 4) разработать новые методы тренировки и развития пространственного мышления; 5) перейти от исследований стратегий в психометрических тестах к изучению стратегий работы с пространственной информацией в повседневной и профессиональной деятельности.

Эти исследования также могут найти практическое применение в образовании с целью повышения успеваемости учащихся в сфере STEM; в инженерии при разработке схем и визуально-пространственных репрезентаций; в логистике для моделирования естественной навигации человека, а также тренировке навыков людей, которым необходимо ориентироваться в пространстве в экстремальных условиях (пожарные, спасатели или пилоты самолетов).

На сегодняшний день многочисленные объективные методы позволяют ученым преодолевать ограничения прежней, самоотчетной парадигмы. В современных исследованиях происходит процесс накопления данных для формирования новой теоретической базы, в основу которой, вероятно, ляжет идея гибкости при решении пространственных задач.

**Конфликт интересов:** Авторы заявили об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

**Conflict of interests:** The authors declared no potential conflicts of interests regarding the research, authorship, and / or publication of this article.

<sup>1</sup> Перевод выполнен авторами статьи.

**Критерии авторства:** К. В. Барцева – концептуализация, сбор данных, исследование, написание оригинального текста статьи. М. В. Лихханов – концептуализация, сбор данных, исследование, руководство, проверка и редактирование оригинального текста статьи. Е. Л. Солдатова – концептуализация, привлечение финансирования, руководство, проверка и редактирование оригинального текста статьи.

**Contribution:** K. V. Bartseva developed the research concept, provided data curation, performed the research, and wrote the draft. M. V. Likhhanov developed the research concept, provided data curation, supervised the research, wrote the draft, and proofread the final version of the manuscript. E. L. Soldatova developed the research concept, attracted funds, supervised the research, wrote the draft, and proofread the final version of the manuscript.

## Литература / References

- Hegarty M., Waller D. A. Individual differences in spatial abilities. *The Cambridge handbook of visuospatial thinking*, eds. Shah P., Miyake A. 1st ed. Cambridge University Press, 2005, 121–169. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610448.005>
- Kell H. J., Lubinski D., Benbow C. P., Steiger J. H. Creativity and technical innovation: Spatial ability's unique role. *Psychological Science*, 2013, 24(9): 1831–1836. <https://doi.org/10.1177/0956797613478615>
- Shea D., Lubinski D., Benbow C. Importance of assessing spatial ability in intellectually talented young adolescents: a 20-year longitudinal study. *Journal of Educational Psychology*, 2001, 93(3): 604–614. <http://dx.doi.org/10.1037/0022-0663.93.3.604>
- Wai J., Lubinski D., Benbow C. P. Spatial ability for STEM domains: Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. *Journal of Educational Psychology*, 2009, 101(4): 817–835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Eme P.-E., Marquer J. Individual strategies in a spatial task and how they relate to aptitudes. *European Journal of Psychology of Education*, 1999, 14(1): 89–108.
- Was C., Sansosti F., Morris B. *Eye-Tracking technology applications in educational research*. IGI Global, 2017, 370.
- Lobben A. K. Tasks, strategies, and cognitive processes associated with navigational map reading: A review perspective. *The Professional Geographer*, 2004, 56(2): 270–281. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.2004.05602010.x>
- Roberts M. J., Erdos G. Strategy selection and metacognition. *Educational Psychology*, 1993, 13(3-4): 259–266. <https://doi.org/10.1080/0144341930130304>
- Rimfeld K., Shakeshaft N. G., Malanchini M., Rodic M., Selzam S., Schofield K., Dale P. S., Kovas Y., Plomin R. Phenotypic and genetic evidence for a unifactorial structure of spatial abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(10): 2777–2782. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607883114>
- Esipenko E. A., Maslennikova E. P., Budakova A. V., Sharafieva K. R., Ismatullinac V. I., Feklicheva I. V., Chipeeva N. A., Soldatova E. L., Borodaeva Z. E., Rimfeld K., Shakeshaft N. G., Malanchinie M., Malykh S. B. Comparing spatial ability of male and female students completing humanities vs. technical degrees. *Psychology in Russia: State of the Art*, 2018, 11(4): 37–49. <http://dx.doi.org/10.11621/pir.2018.0403>
- Malanchini M., Rimfeld K., Shakeshaft N. G., McMillan A., Schofield K. L., Rodic M., Rossi V., Kovas Y., Dale P. S., Tucker-Drob E. M., Plomin R. Evidence for a unitary structure of spatial cognition beyond general intelligence. *Npj Science of Learning*, 2020, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41539-020-0067-8>
- Likhhanov M., Maslennikova E., Costantini G., Budakova A., Esipenko E., Ismatullina V., Kovas Y. This is the way: Network perspective on targets for spatial ability development programmes. *British Journal of Educational Psychology*, 2022, 92(4): 1597–1620. <https://doi.org/10.1111/bjep.12524>
- Likhhanov M. V., Ismatullina V. I., Fenin A. Y., Wei W., Rimfeld K., Maslennikova E. P., Esipenko E. A., Sharafieva K. R., Feklicheva I. V., Chipeeva N. A., Budakova A. V., Soldatova E. L., Zhou X., Kovas Y. V. The factorial structure of spatial abilities in Russian and Chinese students. *Psychology in Russia: State of the Art*, 2018, 11(4): 96–114. <https://doi.org/10.11621/pir.2018.0407>
- Pellegrino J. W., Alderton D. L., Shute V. J. Understanding spatial ability. *Educational Psychologist*, 1984, 19(3): 239–253.
- Barrett F. S., Grimm K. J., Robins R. W., Wildschut T., Sedikides C., Janata P. Music-evoked nostalgia: Affect, memory, and personality. *Emotion*, 2010, 10(3): 390–403. <https://doi.org/10.1037/a0019006>
- Nazareth A., Killick R., Dick A. S., Pruden S. M. Strategy selection versus flexibility: Using eye-trackers to investigate strategy use during mental rotation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2019, 45(2): 232–245. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/xlm0000574>
- Reilly D., Neumann D. L. Gender-role differences in spatial ability: A meta-analytic review. *Sex Roles*, 2013, 68(9): 521–535. <http://dx.doi.org/10.1007/s11199-013-0269-0>

18. Lauer J. E., Yhang E., Lourenco S. F. The development of gender differences in spatial reasoning: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 2019, 145(6): 537–565. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/bul0000191>
19. Voyer D., Voyer S., Bryden M. P. Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117(2): 250–270. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.117.2.250>
20. Linn M. C., Petersen A. C. Emergence and characterization of sex differences in spatial ability: a meta-analysis. *Child Development*, 1985, 56(6): 1479–1498. <https://doi.org/10.2307/1130467>
21. Tsigeman E. S., Likhonov M. V., Budakova A. V., Akmalov A., Sabitov I., Alenina E., Bartseva K., Kovas Y. Persistent gender differences in spatial ability, even in STEM experts. *Heliyon*, 2023, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15247>
22. Budakova A. V., Likhonov M. V., Toivainen T., Zhurbitskiy A. V., Sitnikova E. O., Bezrukova E. M., Kovas Y. Measuring spatial ability for talent identification, educational assessment, and support: Evidence from adolescents with high achievement in science, arts, and sports. *Psychology in Russia: State of the Art*, 14(2): 59–85. <https://doi.org/10.11621/pir.2021.0205>
23. Glueck J., Fitting S. Spatial strategy selection: Interesting incremental information. *International Journal of Testing*, 2003, 3(3): 293–308. [https://psycnet.apa.org/doi/10.1207/S15327574IJT0303\\_7](https://psycnet.apa.org/doi/10.1207/S15327574IJT0303_7)
24. Janssen A. B., Geiser C. On the relationship between solution strategies in two mental rotation tasks. *Learning and Individual Differences*, 2010, 20(5): 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.03.002>
25. Shepard R. N., Metzler J. Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 1971, 171(3972): 701–703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
26. Schultz K. The contribution of solution strategy to spatial performance. *Canadian Journal of Psychology*, 1991, 45(4): 474–491. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0084301>
27. Maresch G. Strategies for assessing spatial ability tasks. *Journal for Geometry and Graphics*, 2014, 18(1): 125–132.
28. Hegarty M. Components of spatial intelligence. *Psychology of Learning and Motivation*, 2010, 52: 265–297. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(10\)52007-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(10)52007-3)
29. Kosslyn S. M., Ganis G., Thompson W. L. Neural foundations of imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, 2001, 2(9): 635–642. <https://doi.org/10.1038/35090055>
30. Tomasino B., Gremese M. Effects of stimulus type and strategy on mental rotation network: An activation likelihood estimation meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2016, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00693>
31. Flusberg S. J., Jenkins G. W., Boroditsky L. *Motor affordances in mental rotation: When minds reflect the world and when they go beyond*. 2009. URL: <https://escholarship.org/uc/item/1k75d054> (accessed 9 Oct 2023).
32. Rilea S. L. Sex and hemisphere differences when mentally rotating meaningful and meaningless stimuli. *Laterality*, 2008, 13(3): 217–233. <https://doi.org/10.1080/13576500701809846>
33. Lamp G., Alexander B., Laycock R., Crewther D. P., Crewther S. G. Mapping of the underlying neural mechanisms of maintenance and manipulation in visuo-spatial working memory using an n-back mental rotation task: A functional magnetic resonance imaging study. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2016, 10. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00087>
34. McGee M. G. Human spatial abilities: Psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 1979, 86(5): 889–918. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0033-2909.86.5.889>
35. Pletzer B., Steinbeisser J., Van Laak L., Harris T. Beyond biological sex: Interactive effects of gender role and sex hormones on spatial abilities. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00675>
36. Voyer D., Voyer S. D., Saint-Aubin J. Sex differences in visual-spatial working memory: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 2017, 24: 307–334. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1085-7>
37. Silverman I., Choi J., Peters M. The hunter-gatherer theory of sex differences in spatial abilities: Data from 40 countries. *Archives of Sexual Behavior*, 2007, 36: 261–268. <https://doi.org/10.1007/s10508-006-9168-6>
38. Voyer D., Saint-Aubin J., Altman K., Doyle R. A. Sex differences in tests of mental rotation: Direct manipulation of strategies with eye-tracking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2020, 46(9): 871–889. <https://doi.org/10.1037/xhp0000752>
39. Choi J., L'Hirondelle N. Object location memory: A direct test of the verbal memory hypothesis. *Learning and Individual Differences*, 2005, 15(3): 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2005.02.001>
40. Toivainen T., Papageorgiou K. A., Tosto M. G., Kovas Y. Sex differences in non-verbal and verbal abilities in childhood and adolescence. *Intelligence*, 2017, 64: 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.07.007>
41. Lu Y., Zhang X., Zhou X. Assessing gender difference in mathematics achievement. *School Psychology International*, 2023, 44(5): 553–567. <https://doi.org/10.1177/01430343221149689>
42. Wang L., Carr M. Working memory and strategy use contribute to gender differences in spatial ability. *Educational Psychologist*, 2014, 49(4): 261–282. <http://dx.doi.org/10.1080/00461520.2014.960568>

43. Wang L., Carr M. Gender, working memory, strategy use, and spatial ability. *North American Journal of Psychology*, 2019, 21(3): 601–618. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1080/00461520.2014.960568>
44. Glück J., Dünser A., Steinbügl K., Kaufmann H. Warning: Subtle aspects of strategy assessment may affect correlations among spatial tests. *Perceptual and Motor Skills*, 2007, 104(1): 123–140. <https://doi.org/10.2466/pms.104.1.123-140>
45. Johnson A. M. Speed of mental rotation as a function of problem-solving strategies. *Perceptual and Motor Skills*, 1990, 71(3): 803–806. <https://doi.org/10.2466/pms.1990.71.3.803>
46. Shepard R. N., Feng C. A chronometric study of mental paper folding. *Cognitive Psychology*, 3(2): 228–243. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(72\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(72)90005-9)
47. Gardony A. L., Taylor H. A., Brunyé T. T. What does physical rotation reveal about mental rotation? *Psychological Science*, 2014, 25(2): 605–612. <https://doi.org/10.1177/0956797613503174>
48. Schmitz S. Gender-related strategies in environmental development: Effects of anxiety on wayfinding in and representation of a three-dimensional maze. *Journal of Environmental Psychology*, 1997, 17(3): 215–228. <https://doi.org/10.1006/jevps.1997.0056>
49. Ramírez-Uclés I. M., Ramírez-Uclés R. Gender differences in visuospatial abilities and complex mathematical problem solving. *Frontiers in Psychology*, 2020, 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00191>
50. Khooshabeh P., Hegarty M., Shipley T. F. Individual differences in mental rotation: Piecemeal versus holistic processing. *Experimental Psychology*, 2013, 60(3): 164–171. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000184>
51. Bilge A. R., Taylor H. A. Framing the figure: Mental rotation revisited in light of cognitive strategies. *Memory & Cognition*, 2017, 45(1): 63–80. <https://doi.org/10.3758/s13421-016-0648-1>
52. Pezaris E., Casey M. B. Girls who use "masculine" problem-solving strategies on a spatial task: proposed genetic and environmental factors. *Brain and Cognition*, 1991, 17(1): 1–22. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(91\)90062-D](https://doi.org/10.1016/0278-2626(91)90062-D)
53. Moreau D. The role of motor processes in three-dimensional mental rotation: shaping cognitive processing via sensorimotor experience. *Learning and Individual Differences*, 2012, 22(3): 354–359. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.02.003>
54. Moreau D., Jérôme C., Mansy-Dannay A., Guerrien A. Enhancing spatial ability through sport practice: Evidence for an effect of motor training on mental rotation performance. *Journal of Individual Differences*, 2012, 33(2): 83–88. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1027/1614-0001/a000075>
55. Tzuril D., Egozi G. Gender differences in spatial ability of young children: The effects of training and processing strategies: Gender differences in spatial ability. *Child Development*, 2010, 81(5): 1417–1430. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01482.x>
56. Stieff M., Dixon B. L., Ryu M., Kumi B. C. Strategy training eliminates sex differences in spatial problem solving in a STEM domain. *Journal of Educational Psychology*, 2014, 106(2): 390–402. <http://dx.doi.org/10.1037/a0034823>
57. Hawes Z. C. K., Gilligan-Lee K. A., Mix K. S. Effects of spatial training on mathematics performance: A meta-analysis. *Developmental Psychology*, 2022, 58(1): 112–137. <https://doi.org/10.1037/dev0001281>
58. Cheung C.-N., Sung J. Y., Lourenco S. F. Does training mental rotation transfer to gains in mathematical competence? Assessment of an at-home visuospatial intervention. *Psychological Research*, 2020, 84(7): 2000–2017. <https://doi.org/10.1007/s00426-019-01202-5>
59. Hegarty M. Mental animation: Inferring motion from static displays of mechanical systems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1992, 18(5): 1084–1102. <https://doi.org/10.1037//0278-7393.18.5.1084>
60. Just M. A., Carpenter P. A. Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation and individual differences in spatial ability. *Psychological Review*, 1985, 92(2): 137–172.
61. Khooshabeh P., Hegarty M. Representations of shape during mental rotation. *Cognitive Shape Processing: Proc. 2010 AAAI Spring Symposium, Technical Report SS-10-02, Stanford, 22–24 Mar 2010. AAAI, 2010.*
62. Corballis M. C. Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, 1997, 57(1): 100–121. <https://doi.org/10.1006/brln.1997.1835>
63. Li Y., Kong F., Ji M., Luo Y., Lan J., You X. Shared and distinct neural bases of large- and small-scale spatial ability: a coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.01021>
64. Osuagwu B. A., Vuckovic A. Similarities between explicit and implicit motor imagery in mental rotation of hands: An EEG study. *Neuropsychologia*, 2014, 65: 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.029>
65. Bode S., Koeneke S., Jäncke L. Different strategies do not moderate primary motor cortex involvement in mental rotation: A TMS study. *Behavioral and Brain Functions*, 2007, 3. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-3-38>
66. Heil M., Rolke B. Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 2002, 39(4): 414–422.

67. Krause D., Richert B., Weigelt M. Neurophysiology of embodied mental rotation: event-related potentials in a mental rotation task with human bodies as compared to alphanumeric stimuli. *European Journal of Neuroscience*, 2021, 54(4): 5384–5403. <https://doi.org/10.1111/ejn.15383>
68. Ter Horst A. C., Jongsma M. L. A., Janssen L. K., Van Lier R., Steenbergen B. Different mental rotation strategies reflected in the rotation related negativity. *Psychophysiology*, 2012, 49(4): 566–573. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01322.x>
69. Ter Horst A. C., Van Lier R., Steenbergen B. Mental rotation strategies reflected in event-related (de)synchronization of alpha and mu power. *Psychophysiology*, 2013, 50(9): 858–863. <https://doi.org/10.1111/psyp.12076>
70. Habacha H., Mallek M., Moreau D., Khalfallah S., Mkaouer B. Differences in mental rotation strategies depend on the level of motor expertise. *The American Journal of Psychology*, 2022, 135(3): 325–336. <https://doi.org/10.5406/19398298.135.3.06>
71. Feng T., Li Y. The time course of event-related brain potentials in athletes' mental rotation with different spatial transformations. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2021, 15. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.675446>
72. Bohbot V. D., Lerch J., Thorndyraft B., Iaria G., Zijdenbos A. P. Gray matter differences correlate with spontaneous strategies in a human virtual navigation task. *Journal of Neuroscience*, 2007, 27(38): 10078–10083. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1763-07.2007>
73. West G. L., Zendel B. R., Konishi K., Benady-Chorney J., Bohbot V. D., Peretz I., Belleville S. Playing Super Mario 64 increases hippocampal grey matter in older adults. *PLoS One*, 2017, 12(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187779>
74. Kühn S., Gleich T., Lorenz R. C., Lindenberger U., Gallinat J. Playing Super Mario induces structural brain plasticity: Gray matter changes resulting from training with a commercial video game. *Molecular Psychiatry*, 2014, 19(2): 265–271. <https://doi.org/10.1038/mp.2013.120>
75. Maguire E. A., Gadian D. G., Johnsrude I. S., Good C. D., Ashburner J., Frackowiak R. S. J., Frith C. D. Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(8): 4398–4403. <https://doi.org/10.1073/pnas.070039597>
76. Brunec I. K., Robin J., Patai E. Z., Ozubko J. D., Javadi A.-H., Barense M. D., Spiers H. J., Moscovitch M. Cognitive mapping style relates to posterior-anterior hippocampal volume ratio. *Hippocampus*, 2019, 29(8): 748–754. <https://doi.org/10.1002/hipo.23072>
77. Boccia M., Nemmi F., Guariglia C. Neuropsychology of environmental navigation in humans: Review and meta-analysis of fMRI studies in healthy participants. *Neuropsychology Review*, 2014, 24(2): 236–251. <https://doi.org/10.1007/s11065-014-9247-8>
78. Levinson S. C. Language and space. *Annual Review of Anthropology*, 1996, 25(1): 353–382. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1146/annurev.anthro.25.1.353>
79. Anggraini D., Glasauer S., Wunderlich K. Neural signatures of reinforcement learning correlate with strategy adoption during spatial navigation. *Scientific Reports*, 2018, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28241-z>
80. Taube J. S., Valerio S., Yoder R. M. Is navigation in virtual reality with fMRI really navigation? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2013, 25(7): 1008–1019. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00386](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00386)
81. Herrmann M. J., Ehlis A.-C., Wagener A., Jacob C. P., Fallgatter A. J. Near-infrared optical topography to assess activation of the parietal cortex during a visuo-spatial task. *Neuropsychologia*, 2005, 43(12): 1713–1720. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.02.011>
82. Ning M., Yücel M. A., Von Lüthmann A., Boas D. A., Sen K. Decoding attended spatial location during complex scene analysis with fNIRS. *BioRxiv*, 2022. <https://doi.org/10.1101/2022.09.06.506821>
83. Hou X., Xiao X., Gong Y., Li Z., Chen A., Zhu C. Functional near-infrared spectroscopy neurofeedback enhances human spatial memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2021, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.681193>
84. Yeo S. S., Jang T. S., Yun S. H. Sensorimotor adaptation in spatial orientation task: A fNIRS study. *Scientific Reports*, 2023, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42416-3>
85. Hoppe S., Loetscher T., Morey S. A., Bulling A. Eye movements during everyday behavior predict personality traits. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2018, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00105>
86. Franchak J. M., Adolph K. E. Visually guided navigation: Head-mounted eye-tracking of natural locomotion in children and adults. *Vision Research*, 2010, 50(24): 2766–2774. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.09.024>
87. Franchak J. M., Kretch K. S., Soska K. C., Adolph K. E. Head-mounted eye-tracking: A new method to describe infant looking. *Child Development*, 2011, 82(6): 1738–1750. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01670.x>
88. Scheer C., Mattioni Maturana F., Jansen P. Sex differences in a chronometric mental rotation test with cube figures: A behavioral, electroencephalography, and eye-tracking pilot study. *Neuroreport*, 2018, 29(10): 870–875. <https://doi.org/10.1097%2FWNR.0000000000001046>

89. Tang Z., Liu X., Huo H., Tang M., Qiao X., Chen D., Dong Y., Fan L., Wang J., Du X., Guo J., Fan Y. Sex differences in eye movements and neural oscillations during mental rotation in virtual reality. *Medicine in Novel Technology and Devices*, 2023, 18. <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2023.100233>
90. Andersen N. E., Dahmani L., Konishi K., Bohbot V. D. Eye tracking, strategies, and sex differences in virtual navigation. *Neurobiology of Learning and Memory*, 2012, 97(1): 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2011.09.007>
91. Harris T., Hagg J., Pletzer B. Eye-movements during navigation in a virtual environment: Sex differences and relationship to sex hormones. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.755393>
92. Heil M., Jansen-Osmann P. Sex differences in mental rotation with polygons of different complexity: Do men utilize holistic processes whereas women prefer piecemeal ones? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2008, 61(5): 683–689. <https://doi.org/10.1080/17470210701822967>
93. Boone A. P., Gong X., Hegarty M. Sex differences in navigation strategy and efficiency. *Memory & Cognition*, 2018, 46 (6): 909–922. <https://doi.org/10.3758/s13421-018-0811-y>
94. Clemenson G. D., Wang L., Mao Z., Stark S. M., Stark C. E. L. Exploring the spatial relationships between real and virtual experiences: What transfers and what doesn't. *Frontiers in Virtual Reality*, 2020, 1. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.572122>
95. Schöberl F., Zwergal A., Brandt T. Testing navigation in real space: contributions to understanding the physiology and pathology of human navigation control. *Frontiers in Neural Circuits*, 2020, 14. <https://doi.org/10.3389/fncir.2020.00006>
96. Müller S. R., Bayer J. B., Ross M. Q., Mount J., Stachl C., Harari G. M., Chang Y.-J., Le H. T. K. Analyzing GPS data for psychological research: A tutorial. *Advances in Methods and Practices in Psychological Science*, 2022, 5(2). <https://doi.org/10.1177/25152459221082680>
97. Bongiorno C., Zhou Y., Kryven M., Theurel D., Rizzo A., Santi P., Tenenbaum J., Ratti C. Vector-based pedestrian navigation in cities. *Nature Computational Science*, 2021, (1): 678–685. <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00130-y>
98. Huang W., Wang L. Towards big data behavioral analysis: Rethinking GPS trajectory mining approaches from geographic, semantic, and quantitative perspectives. *ARIN*, 2022, 1(7). <https://doi.org/10.1007/s44223-022-00011-y>
99. He C., Hegarty M. How anxiety and growth mindset are linked to navigation ability: Impacts of exploration and GPS use. *Journal of Environmental Psychology*, 2020, 71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2020.101475>
100. Malanchini M., Rimpfeld K., Shakeshaft N. G., Rodic M., Schofield K., Selzam S., Dale P. S., Petrill S. A., Kovas Y. The genetic and environmental aetiology of spatial, mathematics and general anxiety. *Scientific Reports*, 2017, 7. <https://doi.org/10.1038/srep42218>
101. Lanini-Maggi S., Hilton C., Fabrikant S. I. Limiting the reliance on navigation assistance with navigation instructions containing emotionally salient narratives for confident wayfinding. *Journal of Environmental Psychology*, 2023, 91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102151>
102. Uttal D. H., Meadow N. G., Tipton E., Hand L. L., Alden A. R., Warren C., Newcombe N. S. The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 2013, 139(2): 352–402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>
103. Nguyen N., Mulla A., Nelson A. J., Wilson T. D. Visuospatial anatomy comprehension: The role of spatial visualization ability and problem-solving strategies. *Anatomical Sciences Education*, 2014, 7(4): 280–288. <https://doi.org/10.1002/ase.1415>
104. Stieff M., Ryu M., Dixon B., Hegarty M. The role of spatial ability and strategy preference for spatial problem solving in organic chemistry. *Journal of Chemical Education*, 2012, 89(7): 854–859. <https://doi.org/10.1021/ed200071d>