

ЛОНГИТЮДНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ФОНОЛОГИЕЙ И АРИФМЕТИКОЙ: ОТ 3 ДО 12 ЛЕТ

Э. СМИТ-ВУЛИ^{1*}, А.С. МАЛЫХ^{2,3}, Э.В. ГАЛАЖИНСКИЙ⁴,
И.А. ВОРОНИН^{2,4}, Ю.В. КОВАС^{1,2,4}

¹ *Голдсмитс колледж, Университет Лондона, Лондон, Великобритания;*

² *ФГНУ «Психологический институт» РАО, Москва, Россия;*

³ *ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;*

⁴ *ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, Россия*

Многие исследования фонологических и арифметических способностей предполагают наличие связи между ними. Данная статья посвящена изучению этой связи на протяжении девятилетнего периода с использованием перекрестно-лонгитюдного (cross-lag) анализа. Анализируются данные 2511 дизиготных и 3584 монозиготных близнецов, полученные в ходе четырех замеров с 3 до 12 лет. Перекрестно-лонгитюдная (cross-lag; двунаправленная) модель наилучшим образом описывает полученные данные, свидетельствуя о значимых связях измерений в раннем возрасте одной черты с более поздними измерениями другой черты как для арифметических, так и для фонологических способностей, даже при контроле связей в один момент времени.

Ключевые слова: арифметика, фонология, связи, лонгитюдное исследование.

Введение

Хотя чтение и математику и относят к двум разным сферам способностей к обучению, они могут отчасти опираться на общие неврологические и когнитивные процессы. Помимо связи, определяющей общим интеллектом, которой обусловлена значительная доля вариативности в обеих областях, могут существовать и более специфические связи (De Smedt B. et al., 2010) [6]. Научение чтению связывается со способностью к распознаванию, воспроизведению и оперированию речевыми звуками, или «фонемами», что необходимо для декодирования слов (Snowling M., 2001

[38]; Snowling M.J. & Hulme C., 2011 [39]). Этот навык фонологической переработки обнаруживает сильную корреляцию с обучением чтению (Melby-Lervag M. et al., 2012) [23]. В то же время он оказывается связан с решением арифметических задач (Gelman R. & Butterworth B., 2005 [12]; Geary D.C. & Hoard M.K., 2004 [11]). Аналогично научению чтению, для выполнения арифметических действий требуется непосредственное воспроизведение усвоенных символов, таких как арабские числа, из долговременной памяти и их дальнейший поиск и извлечение и оперирование ими в рабочей памяти (Simmons F. & Singleton C., 2007 [37]; Jordan J., Wylie J. & Mulhern G., 2008 [18]).

Нейробиологические исследования мозговых коррелятов чтения и математики показывают, что, помимо специализированных систем, посвященных каждой области, между этими навыками наблюдается перекрытие на неврологическом уровне (Ashkenazi S. et al., 2013)

© Смит-Вули Э., Малых А.С., Галажинский Э.В., Воронин И.А., Ковас Ю.В., 2013

* **Для корреспонденции:**

E. Smith-Woolley
Department of Psychology,
Goldsmiths, University of London,
London, SE14 6NW

[1]. В частности, левая угловая извилина (*gyrus angularis sinister*) играет важную роль как в чтении, так и в математике. В отношении математики эта область связана с воспроизведением ответов на арифметические задачи или «арифметических фактов», а также с оперированием числами, представленными в вербальной форме (Dehaene S., Piazza M., Pinel P. & Cohen L., 2003) [7]. Например, одно исследование выявило, что старших испытуемых в сравнении с более молодыми отличает более выраженная активация левой угловой извилины при решении арифметических заданий; предположительно, они все больше опираются на вызывание в памяти арифметических фактов и все меньше – на стратегии, требующие усилий (Rivera S.M., Reiss A., Eckert M. & Menon V., 2005) [32]. Что касается чтения, то эта область предположительно включена в фонологическое декодирование и соотнесение звуков с их символическими обозначениями (Pugh K.R. et al., 2001) [31]. Обзор исследований чтения, применяющих методы визуализации (Shaywitz S.E. et al., 1998) [35], показывает активацию левой угловой извилины в заданиях на суждения относительно ритма, действующих фонологическую переработку. Вероятно, выявленная связь между чтением и арифметикой может частично объясняться общими процессами воспроизведения и оперирования, таких как воспроизведение арифметических фактов и оперирование числами в вербальной форме и воспроизведение букв и оперирование фонемами (De Smedt et al., 2010) [6].

Предполагается, что связи между фонологией и математикой могут формироваться рано в процессе развития. Способности к фонологической переработке, например, оперирование и хранение вербальных кодов, а также способность к воспроизведению фонологических репрезентаций, задействованы в формировании основ арифметических фактов, использующихся впоследствии в изучении

математики (LeFevre J.A. et al., 2010) [20]. Эти навыки осваиваются еще до формального образования и постепенно закрепляются путем повторений и образования связей (Siegler R. & Shrager L., 1984) [36]. Так, фонологические способности могут быть связаны с ранним счетом, поскольку предполагают воспроизведение фонологических репрезентаций названий чисел, которыми потом ребенок оперирует, опираясь на рабочую память, и которые усиливаются со временем (Jordan J. et al., 2010) [18]. Связь фонологических трудностей с медленным счетом у детей может быть следствием проблем с быстрым и точным воспроизведением числовых фактов (Simmons F. & Singleton C., 2007) [37]. Другое исследование выявило умеренную корреляцию между фонологическим навыком и ранним научением счету (способность к количественному мышлению), в том числе называнием чисел и нелингвистической арифметикой. Более того, фонологический навык объяснял индивидуальную вариативность в дальнейших успехах в математике, в частности, в счете и вычислениях (LeFevre J.A. et al., 2010) [20]. Это исследование вносит вклад в понимание важности фонологической переработки для дальнейшего обучения математике.

Возрастные особенности связей между фонологическими навыками и математикой изучаются в рамках подхода с временным лагом. В работе Hecht S.A., Torgesen J., Wagner R. & Rashotte C. (2001) [14] использовалась лонгитюдная панельная модель исследования, дающая возможность выявить причинные связи направленности (*directional paths*) благодаря контролю данных предыдущих срезов (Kennedy D.A., 2005) [19]. Выборка включала 201 ребенка, случайным образом отобранного из шести школ. Их способности к арифметическим подсчетам и фонологической переработке отслеживались в течение пяти лет, с 7 до 11 лет. После учета математических способностей фонологическая осведомлен-

ность в 7 лет объясняла 10% вариативности в навыках математических подсчетов в 11 лет. Фонологические навыки оказались значимым предиктором и после проведения контроля способности чтения и общей вербальной способности. Эти результаты свидетельствуют о связи фонологических способностей с улучшением математических вычислений от 7 к 11 годам.

Подобно тому как ранняя фонология объясняет индивидуальную вариативность в последующей арифметике, ранняя математика также прогностична для дальнейших навыков чтения (Lerkkanen M. et al., 2005) [21]. В этом исследовании ранние математические навыки и навыки чтения измерялись 6 раз за первые два года обучения в начальной школе. Интересно, что не было выявлено никаких связей между ранним чтением и более поздней математикой ни в одном из срезов. Однако математика первого среза объясняла почти 20% изменчивости в чтении два месяца спустя при втором срезе, а математика второго среза объясняла 36% изменчивости понимания прочитанного месяц спустя при третьем срезе. Эти отношения между ранней математикой и последующим чтением могут объясняться тесными связями между узнаванием чисел и грамотностью. Действительно, было показано, что узнавание чисел в большей степени связано с грамотностью, чем с распознаванием букв (Tunms P., 1999) [42], что может свидетельствовать о том, что чтение цифр оказывается процессом, облегчающим чтение букв.

Необходимы дальнейшие исследования, использующие cross-lag модель с временным лагом, для изучения связи между фонологическими способностями и арифметикой на протяжении времени, особенно с подключением этапов раннего фонологического и математического развития. В настоящем исследовании используется перекрестно-лонгитюдная (cross-lag) модель анализа связи между арифметикой и фонологией с 3-летнего до 12-летнего возраста.

Методика

Выборка. Выборку составили близнецы, участвующие в проекте Исследования Раннего Развития Близнецов (TEDS). Они представляют лонгитюдную репрезентативную выборку близнецов, родившихся в Англии и Уэльсе в 1994, 1995 и 1996 году (Oliver B. & Plomin R., 2007) [27]. Близнецы регулярно обследуются с возраста 2 лет. В этом исследовании анализируются данные, собранные в возрасте 3, 4, 7 и 12 лет. Участники исключались из выборки в случае медицинских нарушений у одного или обоих близнецов, таких как хромосомные аномалии, органические поражения мозга, медиальные синдромы и медицинские проблемы во время беременности. Кроме того, были исключены близнецы, для которых английский не был основным языком дома. Выборка зарекомендовала себя как репрезентативная для населения Великобритании (Spinath F.M., Ronald A., Harlaar N., Price T.S., & Plomin R., 2003 [40]; Oliver B. & Plomin R., 2007 [27]). Один близнец из каждой близнецовой пары случайным образом был отобран для анализа. В таблице 1 представлено число участников на каждом возрастном срезе, а также их средний возраст и стандартное отклонение.

Таблица 1

Количество участников на каждом срезе анализа, их средний возраст и стандартное отклонение

Возраст (годы)	N	Средний возраст	SD
3	5152	3,04	0,16
4	6917	4,05	0,17
7	6590	7,06	0,25
12	5154	11,56	0,69

Процедура. Когда близнецам было 3 и 4 года, для сбора данных использовались опросники для родителей. Эти опросники оценивали ряд речевых и познавательных способностей, включали в себя демогра-

фическую информацию о домашней среде близнецов и поведении, заполняемую родителями. Опросники рассылались семьям непосредственно перед 3- и 4-летием близнецов. Семьям также регулярно рассылались напоминания. По достижении близнецами 7 лет проводилось телефонное интервью. Близнецов просили выполнять задания, приведенные в буклете, и называть полученные ответы. Родители и учителя также оценивали способности и достижения близнецов. В 12 лет данные собирались через батарею онлайн тестов, предоставляемых учителями результатов по национальной образовательной программе, телефонное интервью с близнецами и опросник для родителей.

Методы. Все методы адаптированы к соответствующему возрасту.

Арифметика. Для возрастов 3 и 4 лет не проводилось специального обследования арифметических способностей и навыков. Эта характеристика была сформирована для данного исследования выбранными пунктами из краткой версии Опросника Коммуникативного Развития МакАртура (MacArthur Communicative Development Inventories – MCDI; Fenson L., Pethick S. & Cox J., 1994 [10]) и Родительского Отчета о Развитии Детей (Parent Report of Children's Abilities, PARCA; Saudino K. et al., 1998 [33]). PARCA обладает хорошей внутренней согласованностью. В пилотной выборке 107 детей двухлетнего возраста коэффициент альфа Кронбаха составил 0,75 для родительских ответов. Этот опросник также показал хорошие корреляции с другими методиками развития, такими как индекс психического развития Бэйли (Sudino K. et al., 1998 [33]; Plomin R., Price T.S., Eley T.C., Dale P.S., & Stevenson J., 2002 [29]). Сходная надежность была получена и для Опросника Коммуникативного Развития МакАртура – MCDI (Bruckner C. et al., 2007) [4]. Для обоих возрастов вопросы отбирались по их связи со счетом и определением количества – навыками, которые, как принято считать, предвещают арифметические (Jordan J. et al.,

2010) [18]. Для 3-летнего возраста включались такие вопросы, как «Знает ли Ваш ребенок, что две конфеты и еще две конфеты будет четыре конфеты?» и «Может ли Ваш ребенок правильно составить группу из шести конфет или монеток?». Для возраста 4 лет использовались вопросы: «Умеет ли Ваш ребенок считать от 1 до 10 по порядку» и «Умеет ли Ваш ребенок совершать простейшие действия вычитания (например, $4 - 1 = 3$)?». Всего для возраста трех лет были отобраны 6 пунктов. Таким образом, ребенок мог получить от 0 до 6 баллов. Для возраста 4 лет было выбрано 12 вопросов, с возможностью набрать от 0 до 12 баллов, соответственно.

Для возрастных групп 7 и 12 лет использовались обобщенные показатели учеников, предоставленные учителями в соответствии с Национальной учебной программой по математике. Для оценки арифметических навыков 7-летних детей применялись оценки учителей, оценивающих по пятибалльной шкале успеваемость детей на протяжении учебного года по трем аспектам: «использование и применение математики», «числа» и «формы, пространство и измерения». Эти элементы Национальной учебной программы по математике связаны со способностью детей считать, группировать и упорядочивать числа, а также способностью оперировать числами, считая письменно и устно. Существует высокая корреляция между тремя методиками (0,81), что дает возможность объединить их в общую категорию «математического показателя» (Oliver B. et al., 2004) [28]. Для возраста 12 лет использовались сходные категории, а также добавлялись элементы алгебры. Баллы по Национальной учебной программе обычно отмечают как надежные показатели текущего академического уровня (Hutchison D. & Benton T., 2009 [17]; Newton P.E., 2009 [25]). В 2010 году в исследовании Ofqual, проведенном на 3000 учащихся, было установлено, что показатели по математике по национальной

учебной программе обнаруживают высокую точность классификации (около 90%) при усреднении пяти разных показателей точности классификации с альфой Кронбаха 0,93, что говорит о высокой внутренней валидности этой оценки. Кроме того, оценки учителей показывают хорошую внешнюю валидность: в мета-анализе 16 исследований были выявлены умеренные корреляции между оценками учителей и результатами стандартизованных тестов (Hoge R.D. & Coladarsi T., 1989) [15].

Фонология. Аналогично арифметике, для возраста 3 и 4 лет не использовались специальных методик по фонологии. Для целей данного исследования был составлен опросник, включающий в себя пункты из PARCA (Saudino K. et al., 1998) [33] и MCDI (Fenson L. et al., 1994) [10]. Например, «Наблюдаются ли у Вашего ребенка признаки речевых трудностей?». И в случае утвердительного ответа – «Связано ли это с плохим произношением?». Три из четырех пунктов связаны с плохой фонологией. Соответственно четвертый – «Может ли Ваш ребенок декламировать стихи?» – имел обратную оценку. Фонология для 3 лет оказалась процессом измерения фонологических трудностей. В большинстве своем дети получали 0 или 1 балл. Так что распределение было смещенным. Для 4-летних было отобрано десять вопросов, непосредственно связанных с фонологией, таких как «если Вашему ребенку показать букву, может ли он ее назвать?» и «если Вашему ребенку показать букву, знает ли он, какому звуку она соответствует?». Как и для 3-летних, использовались четыре вопроса, связанных с проблемной фонологией. Был составлен показатель трудности фонологии, включающий два из четырех пунктов, использовавшихся в возрастной группе 3 лет.

Фонология в возрасте 7 и 12 лет оценивалась по Тесту Эффективности Чтения Слов (Test of Word Reading Efficiency, TOWRE). Этот тест требует от испытуемых прочитать два списка. Один состоит из 85 напечатанных слов – эффективность

связи зрительного образа и слова; второй состоял из 54 «не-слов» (non-words) – эффективность декодирования фонем, оценивающая способность читать произносимые «не-слова». Испытуемым давалось 45 секунд на каждый список, за которые они должны были прочитать как можно больше. Тесты проводились по телефону. Во время телефонного разговора участников исследования просили достать списки слов из запечатанного конверта. Эта удивительно короткая методика оценивает способность зрительного распознавания слов, а также способность фонематического декодирования. TOWRE широко используется и имеет высокую внутреннюю валидность, а также высокую надежность (Torgesen J.K., Wagner R.K. & Rashotte C.A., 1999) [41].

Статистический анализ. Для анализа связи арифметических и фонологических способностей в течение периода с 3 до 12 лет использовалось перекрестно-лонгитюдное (cross-lag) структурное моделирование (Campbell D.T., 1963 [5]; Kenny D.A., 2005 [19]). Указанный метод использует лонгитюдные данные для исследования временной структуры причинных связей. В ходе анализа проводится регрессия переменных каждого среза на переменные предшествующего среза, чтобы оценить, в какой степени предшествующие переменные объясняют вариацию последующих (Berrington A.M., Smith P.W.F. & Sturgis P., 2006) [3].

Рисунок 1 иллюстрирует перекрестно-лонгитюдную модель с двумя переменными (X и Y), измеренными в два момента времени (срез 1 и срез 2). Четыре переменные (X1, X2, Y1 и Y2) позволяют вычислить 6 корреляций: две ауторегрессивные корреляции (B1 и B4), две перекрестно-лонгитюдные корреляции (B2 и B3) и две одновременные корреляции (XY1 и XY2). Ауторегрессивные связи отражают стабильность конструкта во времени. Эти связи основаны на последовательных измерениях одной и той же переменной. Перекрестно-лонгитюдные связи показывают, насколько вариация предшествую-

ших измерений одной переменной (X_1 или Y_1) объясняет вариацию последующих измерений другой переменной (Y_2 или X_2). Соответственно значимые B_2 и B_3 означали бы, что связь между переменными X и Y реципрокная, то есть каждая из них оказывает влияние на другую с течением времени. Однако если бы только B_2 была значимой, это означало бы, что X в первом срезе связана со значениями Y во втором срезе, но Y в первом срезе не связана с X во втором срезе (и наоборот, если бы только B_3 были значимыми). Если B_2 и B_3 не значимы, то это означает, что ни одна из переменных не объясняет последующие измерения другой переменной. Оценка перекрестно-лонгитюдных связей в модели проводится с учетом ауторегрессивных и одновременных связей (X_1Y_1 ; X_2Y_2 на рис. 1). Одновременные корреляции оценивают общую вариацию переменных внутри каждого среза, учет этих связей позволяет исключить систематическую связь за счет ненаблюдаемых, но стабильных переменных, например, интеллекта.

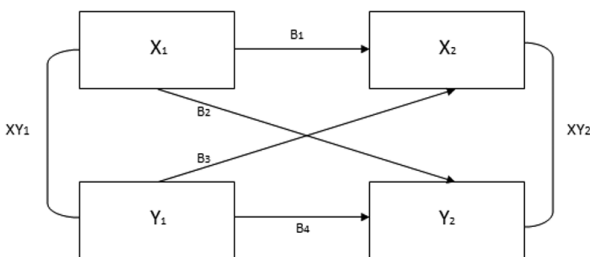


Рис. 1. Перекрестно-лонгитюдная модель с двумя переменными, измеренными в два момента времени

Целью данной работы является исследование связи между фонологическими и арифметическими способностями на протяжении четырех срезов путем сравнения четырех конкурирующих моделей. Первая, реципрокная, модель предполагала, что арифметические и фонологические способности связаны перекрестно-лонгитюдными связями (то есть более ранняя фонология предсказывает более позднюю ариф-

метику и ранняя арифметика предсказывает более позднюю фонологию). Вторая модель предполагала, что индивидуальные различия в ранней фонологии предсказывают последующую арифметику, но более ранняя арифметика не предсказывает последующую фонологию. Третья модель предполагала обратный вариант. Наконец, четвертая модель предполагала наличие связи между фонологией и арифметикой внутри срезов, но ни одна из переменных не предсказывала другую в следующий момент времени, то есть между ними не было перекрестно-лонгитюдных связей.

Модели сравнивались между собой на основе набора показателей правдоподобия, включавшего в себя критерий хи-квадрат, среднеквадратическую ошибку аппроксимации (RMSEA), коэффициент относительного соответствия (CFI), коэффициент Такера – Льюиса (TLI), информационный критерий Акаике (AIC), байесовский информационный критерий (BIC) и среднеквадратическую ошибку (SRMR). Критерий хи-квадрат является мерой расхождения между предсказанной моделью и данной матрицей ковариаций (Hu L.T. & Bentler P.M., 1999) [16], однако он чувствителен к размеру выборки (Bentler P.M. & Bonnet D.C., 1980) [2]. При большой выборке, как в настоящем исследовании, его значение может быть завышено (Schumacker R.E. & Lomax R.G., 2004) [34]. Коэффициенты CFI и TLI учитывают размер выборки, общепринятым пороговым значением является 0,95. Значения, близкие к 1,0 означают удовлетворительное соответствие модели [16]. RMSEA известен как один из наиболее информативных показателей соответствия (Diamantopoulos A. & Siguaaw J.A., 2000) [8]; он показывает, насколько хорошо предсказанная моделью матрица ковариаций соответствует популяционной. Подобно TLI, этот критерий основывается на принципе экономии и отдает предпочтение моделям с меньшим количеством параметров. Общепринятое пороговое значение RMSEA – 0,06 [16], к этому показателю

также представляют доверительный интервал (McQuitty S., 2004) [22]. Пороговое значение SRMR также равно 0,06, однако иногда допускаются значения до 0,08 (Hu L.T. & Bentler P.M., 1999) [16]. Наконец, AIC и BIC используются для сравнения моделей между собой с учетом дополнительных параметров. Они оценивают потерю информации: соответственно – чем ниже значение, тем лучше модель описывает данные (Posada D. & Buckley T.R., 2004) [30].

Результаты

Средние значения и стандартные отклонения для оценок фонологических и арифметических способностей представлены в таблице 2. Фонология в возрасте трех лет показала асимметричное распределение. Это связано с тем, что вопросы направлены на выявление низкого уровня фонологических способностей: 0,30 из 4 – ожидаемая оценка, поскольку большинство испытуемых получили балл 0.

Таблица 2

Размеры выборок, средние значения и стандартные отклонения итоговых баллов по фонологии и арифметике

Возраст (годы)	Тест (макс. балл)	n	M	SD
3	Арифметика (6)	2946	2,45	1,16
	Фонология (4)	2916	0,28	0,63
4	Арифметика (12)	5186	5,19	1,58
	Фонология (10)	5187	5,96	1,96
7	Арифметика (12)	3704	6,30	1,81
	Фонология (139)	3335	60,10	27,41
12	Арифметика (36)	1928	17,22	4,27
	Фонология (165)	2308	113,62	20,96

Корреляции. Перед проведением перекрестно-лонгитюдного анализа была вычислена и проанализирована матрица корреляций (табл. 3). Корреляции между разными измерениями арифметики оказались умеренными; самая низкая корреляция наблюдается между арифметикой в 3

и в 12 лет, однако она является значимой ($r = 0,18$, $p < 0,001$). Самая высокая корреляция наблюдается между арифметикой в 7 и в 12 лет ($r = 0,39$, $p < 0,001$). Эта корреляция внушительна, учитывая разницу в 5 лет между срезами, однако в обоих срезах использовались оценки учителей по математике, которые, согласно данным литературы, стабильны во времени (Oliver B. et al., 2004) [28]. Фонология показывает умеренные корреляции между срезами; самая высокая корреляция наблюдается между фонологией в 7 и в 12 лет ($r = 0,68$, $p < 0,001$), в обоих срезах фонология измерялась посредством теста TOWRE, измерения которого, как известно, обладают высокой стабильностью (Harlaar N., Dale P.S. & Plomin R., 2007). Самая низкая значимая корреляция была выявлена между фонологией в 3 и в 12 лет ($r = -0,163$, $p = 0,001$).

Между переменными фонологии и арифметики также обнаружены значимые корреляции. Корреляции между фонологией и арифметикой внутри срезов варьируют от $-0,205$ до $0,548$. Величина корреляций между срезами уменьшается с увеличением разницы в возрасте. Сравнение моделей. Сравнение четырех конкурирующих моделей представлено в таблице 4. Реципрокная модель, допускающая перекрестные связи между арифметикой и фонологией, наиболее хорошо описывает данные: $\chi^2(6) = 38,53$, $p < 0,001$; CFI = 0,99, TLI = 0,97; RMSEA = 0,03, 90% CI = 0,02–0,04; SRMR = 0,03; AIC = 73079,82; BIC = 73344,13. Исключение перекрестных временных связей приводит к ухудшению показателей соответствия (модели 2 и 3). RMSEA модели 3 превысило пороговое значение 0,06, то есть модель 3 описывает популяционную матрицу ковариаций не так хорошо, как другие модели. SRMR также показал, что модели 2, 3 и 4 плохо описывают данные (SRMR превышает пороговое значение 0,06). Таким образом, для последующего анализа была выбрана модель, включающая перекрестно-лонгитюдные связи между арифметикой и фонологией.

Таблица 3

Матрица корреляций итоговых баллов по фонологии и арифметике

	3 Арифметика	3 Фонология*	4 Арифметика	4 Фонология	7 Арифметика	7 Фонология	12 Арифметика	12 Фонология
3 Арифметика	1							
3 Фонология	-0,205**	1						
4 Арифметика	0,377**	-0,193**	1					
4 Фонология	0,341**	-0,224**	0,516**	1				
7 Арифметика	0,192**	-0,139**	0,307**	0,276**	1			
7 Фонология	0,161**	-0,124**	0,285**	0,295**	0,548**	1		
12 Арифметика	0,181**	-0,120	0,246**	0,208**	0,481**	0,469**	1	
12 Фонология	0,132**	-0,163	0,225**	0,243**	0,390**	0,677**	0,411**	1

Примечание: * Отрицательные корреляции показателя фонологии в 3 года с другими переменными обусловлены тем, что переменная отражает проблемное фонологическое развитие; ** р значимы на уровне 0,001

Таблица 4

Описательные статистики по четырем моделям

Модель	$\chi^2(df)$	CFI/TLI	RMSEA (CIs)	AIC/BIC	SRMR	$\Delta\chi^2(df)$	p
1. Реципрокная	38,53 (6)	0,99/0,97	0,03 (0,02–0,04)	73079,82/73344,13	0,03		
2. Фон. > Ариф.	354,71 (12)	0,93/0,84	0,06 (0,06–0,07)	73384,18/73606,76	0,08	316,18 (6)	>0,001
3. Ариф. > Фон.	234,06 (12)	0,95/0,90	0,05 (0,04–0,05)	73264,07/73486,65	0,07	195,53 (6)	>0,001
4. Без перекрестных связей	615,92 (18)	0,86/0,81	0,07 (0,06–0,07)	73633,38/73814,23	0,11	637,39 (12)	>0,001

Примечание: $\chi^2(df)$ – статистика хи-квадрат и степени свободы; CFI – коэффициент относительного соответствия; TLI – коэффициент Такера – Льюиса; RMSEA – среднеквадратическая ошибка аппроксимации; AIC – информационный критерий Акаике; BIC – информационный критерий Байеса; SRMR – среднеквадратическая ошибка; $\Delta\chi^2$ – изменение хи-квадрат и степени свободы; p – уровень значимости. Наиболее подходящая модель выделена жирным шрифтом

Оценка параметров модели. Некоторые параметры модели оказались статистически незначимыми: большинство не стандартизированных перекрестных связей между фонологией и последующей арифметикой значимо, однако фонология в 3 года не вносит статистически значимого вклада в вариацию арифметики в 7 лет ($B = -0,02$, $SE = 0,03$, $p = 0,43$), равно как и арифметики в 12 лет ($B = -0,03$, $SE = 0,04$, $p = 0,46$). Фонология

в 4 года не вносит статистически значимого вклада в вариацию арифметики в 12 лет ($B = 0,04$, $SE = 0,03$, $p = 0,14$). Сходный паттерн результатов был выявлен для не стандартизированных связей между арифметикой и последующей фонологией, то есть более ранние измерения арифметики не предсказывали фонологию в 12 лет (в 3 года $B = -0,02$, $SE = 0,03$, $p = 0,55$; в 4 года $B = 0,02$, $SE = 0,03$, $p = 0,54$). Более того, арифметика в 3 года

не вносит статистически значимого вклада в вариацию фонологии в 7 лет ($B=0,01$, $SE=0,03$, $p=0,62$).

Все незначимые связи были удалены из модели, после чего оценка параметров была проведена повторно. После этой процедуры показатели соответствия модели улучшились ($\chi^2(12)=42,994$, $p<0,001$; $CFI=0,99$, $TLI=0,99$; $RMSEA=0,02$, $90\% CI=0,01-0,03$; $SRMR=0,03$; $AIC=73073,46$; $BIC=73296,04$). Все параметры модели значимы ($p<0,001$). Стандартизированные коэффициенты представлены на рисунке 2.

Ауторегрессивные коэффициенты по арифметике статистически значимы и умеренны по величине (B 's= $0,21-0,36$; SE 's= $0,03-0,02$), что свидетельствует о стабильности этой переменной во времени, когда учитывается вариация, относящаяся к одновременным и перекрестным связям. Фонология демонстрирует такую же стабильность в 4 срезах ($B= -0,15-0,64$, $SE=0,02$). Коэффициенты одновременных связей между арифметикой и фонологией оказались зна-

чимыми, но изменялись со временем, сначала увеличиваясь, а затем уменьшаясь (в 3 года – $B= -0,20$, $SE=0,02$; в 4 года – $B=0,37$, $SE=0,02$; в 7 лет – $B=0,43$, $SE=0,02$; в 12 лет – $B=0,13$, $SE=0,02$). Кроме того, модель значительно хуже объясняет данные, если эти связи устанавливаются равными: $\Delta\chi^2(3)=756,588$, $p<0,001$. Таким образом, коэффициенты одновременных связей в разных срезах значительно различаются.

Значимые нестандартизированные веса связей между фонологией и последующей арифметикой продемонстрировали, что фонология в 3 года предсказывает вариацию арифметики в 4 года ($B=0,13$, $SE=0,01$) при учете вариации, относящейся к ауторегрессивным и одновременным связям. Фонология в 4 года предсказывает почти 20% вариации арифметики в 7 лет. Наиболее сильная связь наблюдается между фонологией в 7 лет и арифметикой в 12 лет ($B=0,23$, $SE=0,02$), что примечательно, учитывая разницу в 5 лет между двумя срезами.

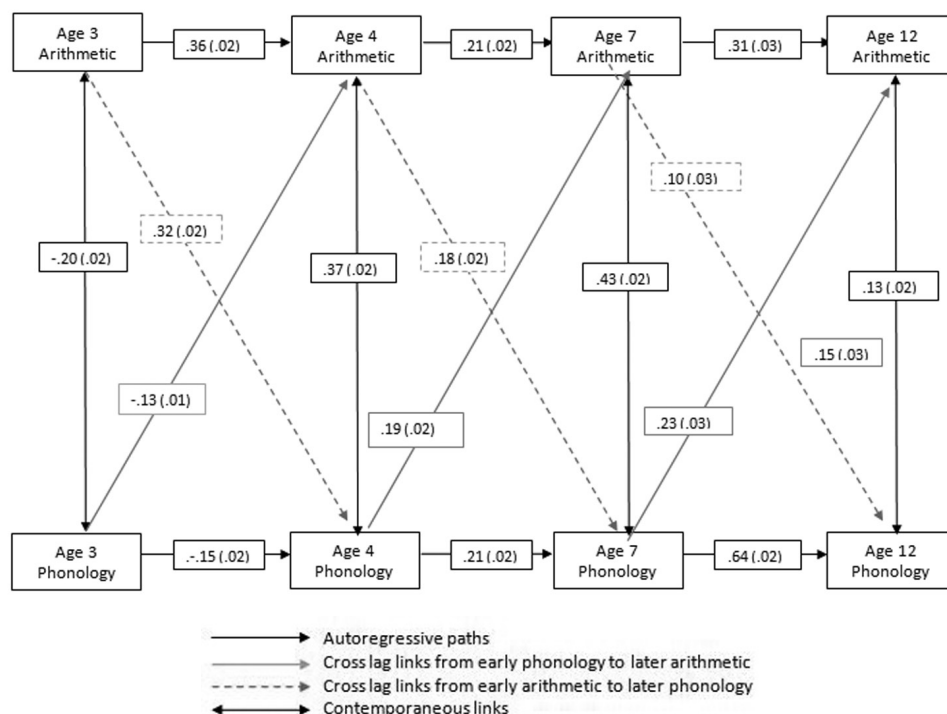


Рис. 2. Стандартизированная перекрестно-лонгитюдная модель связей арифметики и фонологии в 4 временных срезах. Указаны только значимые коэффициенты ($p<0,05$), в скобках – стандартное отклонение. Age 3, 4, 7, 12 – возраст 3, 4, 7, 12 лет; Arithmetic – арифметика; Phonology – фонология

Наконец, влияние фонологии на арифметику нестабильно во времени, что выражается в ухудшении показателей правдоподобия модели, если перекрестные связи между фонологией и последующей арифметикой устанавливаются равными ($\Delta\chi^2(8)=170,283$, $p<0,001$); следовательно, связи значимо различаются во времени.

В отличие от влияния фонологии на последующую арифметику, которое увеличивается со временем, влияние арифметики на последующую фонологию со временем уменьшается. Арифметика в 3 года объясняет около 30% вариации фонологии в 4 года ($B=0,32$, $SE=0,02$); арифметика в 4 года объясняет умеренное количество вариации фонологии в 7 лет ($B=0,18$, $SE=0,02$). Однако арифметика в 7 лет слабо связана с фонологией в 12 лет ($B=0,10$, $SE=0,03$). Как и связь между фонологией и последующей арифметикой, влияние арифметики на фонологию варьирует с течением времени, что выражается в значимом изменении показателя хи-квадрат, когда перекрестные связи устанавливаются равными ($\Delta\chi^2(8)=59,415$, $p<0,001$).

Обсуждение

В исследовании использовался перекрестно-лонгитюдный метод для изучения отношения между арифметикой и фонологией от 3 до 12 лет, на протяжении которых было проведено 4 среза обследований. В целом, результаты показывают обоюдно направленное отношение между арифметикой и фонологией. Более ранние показатели по одной переменной объясняют вариативность по другой в более старшем возрасте. Однако, если влияние фонологии на арифметику со временем возрастает, то влияние арифметики на фонологию снижается.

Отношения между арифметикой и фонологией во времени. Предыдущие исследования отношений между арифметическими и фонологическими способностями во времени приходят к противоречивым ре-

зультатам. S.A. Hecht et al. (2001) [14] предполагают существование направленного отношения от ранней фонологии к будущей математике, тогда как M. Lerkkanen et al. (2005) [21] показали, что ранняя математика прогностична для последующего чтения, а обратное влияние незначимо. В настоящем исследовании апробировались и сравнивались четыре модели. Наилучшим образом подходящая модель предлагает двунаправленные отношения между арифметикой и фонологией во времени.

В исследовании S.A. Hecht et al. (2001) [14] было установлено, что фонологическая осведомленность отвечает за 10% вариативности в математике в дальнейшем. Сходные результаты получены и в проведенном нами исследовании, где все измерения ранней фонологии были прогностичны для индивидуальной изменчивости в арифметике в последующем. Особый интерес представляет тот факт, что фонологические способности со временем приобретают большую значимость. В возрасте 3 лет фонология объясняла более 10% вариативности в арифметике в 4 года, тогда как в 7 лет этот показатель составил уже более 20% в отношении арифметики через пять лет – к возрасту 12 лет. Эти результаты интересны, учитывая происходящий в этот период переход от ключевой стадии 2 к ключевой стадии 3 Национального стандарта образования Великобритании и переход от арифметики к более сложной алгебре, что может говорить о повышении зависимости от хранящихся в фонологической форме репрезентаций числовых фактов по мере усложнения арифметики (Jordan J. et al., 2003).

Результаты, касающиеся отношения между ранней арифметикой и более поздней фонологией, также обнаруживают интересные закономерности. Как и у M. Lerkkanen et al. (2005) [21], в выполненном исследовании было выявлено, что арифметика в начальной школе прогностична для фонологических способностей через два года. В нашем исследовании мы расширили

изучаемый период путем моделирования отношения между двумя чертами до и после этого времени. Была найдена умеренная связь между очень ранней арифметикой и фонологией: арифметика в возрасте 3 лет объясняла 32% вариативности в фонологии к 4-летнему возрасту. Эти результаты согласуются с исследованием Р. Туммса (1999) [42], предположившим, что ранний счет важен для последующего чтения, будучи связанным с процессом чтения и распознавания чисел.

Наряду с доказательством ранней связи между арифметикой и последующими измерениями фонологии, полученные результаты также говорят о том, что эта связь сохраняется и в дальнейшем, правда, становясь слабее со временем. В возрасте 7 лет арифметика объясняла индивидуальную вариативность (10%) в фонологии в 12 лет после проведения контроля предшествующих фонологических способностей и вариативности, обусловленной одновременной ковариацией между чертами. Вероятно, способности к узнаванию, запоминанию, оперированию и теоретическому пониманию чисел, с которыми связана арифметика, важны не только для чтения в раннем возрасте, но продолжают играть существенную роль при оперировании буквами и при чтении в любом возрасте (Dowker A., 1998) [9].

Одним из основных ограничений настоящего исследования является недостаток формального диагностического инструментария ранних фонологических и арифметических способностей. Это особенно актуально для возраста 3 лет, когда оценка фонологии ограничивалась 4 пунктами. Хотя методики для раннего возраста могут быть не столь надежными как диагностические инструменты для более старших групп, умеренная корреляция с этими формальными тестами свидетельствует в пользу их надежности. Например, оценка арифметических способностей, составленная из 12 пунктов MCDI (Fenson L. et al., 1994) [10] и PARCA (Saudino K. et al., 1998) [33], умеренно коррелировала с учительской оцен-

кой математических способностей через 3 года в возрасте 7 лет. Дальнейшие исследования отношений между арифметикой и фонологией с использованием формальных тестов, таких как тест ранних математических способностей (Test of Early Mathematics Ability; Ginsburg H. & Baroody A., 2003 [13]) и тест фонологических способностей (Phonological Abilities Test; Muter V., Hulme C., & Snowling M., 1997 [24]), позволят углубить понимание этих отношений.

Другим ограничением осуществленного нами исследования является отсутствие контроля общего интеллекта. Вследствие этого наблюдающаяся связь между арифметикой и фонологией может объясняться общими с интеллектом факторами. В исследовании делается попытка смягчить это ограничение посредством учета одновременных корреляций на каждом этапе анализа. Одновременные корреляции оценивают ковариацию между чертами в одной и той же точке обследования. Их контроль для каждого возрастного среза обеспечивает некоторую защиту от скрытых неизменных во времени переменных, таких как IQ. Кроме того, предыдущие исследования отношений между арифметикой и фонологией, контролирующих общий интеллект (Hecht S.A. et al., 2001 [14], Lerkkanen M. et al., 2005 [21]; De Smedt B. et al., 2010 [6]), выявили сходные связи между этими характеристиками.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование выявило двунаправленное отношение между арифметикой и фонологией на протяжении 10 лет детского возраста. Будущие генетически чувствительные лонгитюдные исследования позволят изучить степень, в которой генетические и средовые факторы обуславливают выявленные долговременные связи.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации

для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (№ 11.G34.31.0043).

Мы благодарим участников Исследования Раннего Развития Близнецов (*Twins Early Development Study, TEDS*) за их участие в проекте. TEDS поддерживается программным грантом Медицинского Исследовательского Совета Великобритании (G0901245; ранее G050009), а также грантами Национальных Институтов Здоровья США (HD44454, HD46167 и HD59215).

Литература

1. Ashkenazi S., Black J., Abrams D., Hoefl F., & Menon V. Neurobiological underpinnings of math and reading learning disabilities // *Journal of Learning Disabilities*. – 2013, in press.
2. Bentler P.M., & Bonnet D.C. Significance tests and goodness of fit in the analysis of covariance structures // *Psychological Bulletin*. – 1980. – Vol. 88(3). – P. 588–606.
3. Berrington A.M., Smith P.W.F. and Sturgis P. An overview of methods for the analysis of panel data. ESRC. – National Centre for Research Methods Briefing Paper, 2006.
4. Bruckner C., Yoder P., Stone W., & Saylor M. Construct validity of the MCDI-I Receptive Vocabulary scale can be improved: differential item functioning between toddlers with autism spectrum disorders and typically developing infants // *Journal of Speech, Language and Hearing Research*. – 2007. – Vol. 50(6). – P. 1631–1638.
5. Campbell D.T. From description to experimentation: Interpreting trends in quasi experiments / In: C.W. Harris (Ed.). *Problems in measuring change*. – Madison: University of Wisconsin Press, 1963.
6. De Smedt B., Taylor J., Archibald L., & Ansari D. How is phonological processing related to individual differences in children's arithmetic skills? // *Developmental Science*. – 2010. – Vol. 13(3). – P. 508–520.
7. Dehaene S., Piazza M., Pinel P., & Cohen L. Three parietal circuits for number processing // *Cognitive Neuropsychology*. – 2003. – Vol. 20. – P. 487–506.
8. Diamantopoulos A., & Siguaaw J.A. *Introducing LISREL*. – London: Sage Publications, 2000.
9. Dowker A. Individual differences in nominal arithmetical development / In: C. Dontan (Ed.). *The development of mathematical skills*. – East Sussex, U.K.: Psychology Press, 1998. – P. 275–302.
10. Fenson L., Pethick S., Cox J. *The MacArthur Communicative Development Inventories: short form versions*. Unpublished manuscript. – San Diego University, 1994.
11. Geary D.C., & Hoard M.K. Learning disabilities in arithmetic and mathematics: Theoretical and empirical perspectives / In: J. I. D. Campbell (Ed.). *Handbook of mathematical cognition*. – New York: Psychology Press, 2005. – P. 253–267.
12. Gelman R., & Butterworth B. Number and language: How are they related? // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2005. – Vol. 9. – P. 6–10.
13. Ginsburg H., & Baroody A. *Test of early mathematics ability*. (3rd ed.). – Austin, TX: Pro-Ed., 2003.
14. Hecht S.A., Torgesen J., Wagner R., & Rashotte C. The relations between phonological processing abilities and emerging individual differences in mathematical computational skills: A longitudinal study from second to fifth grades // *Journal of Experimental Child Psychology*. – 2001. – Vol. 79. – P. 192–227.
15. Hoge R.D., & Coladarci T. Teacher-based judgments of academic achievement: A review of literature // *Review of Educational Research*. – 1989. – Vol. 59. – P. 297–313.

16. *Hu L.T., & Bentler P.M.* Cut off criteria for fit indexes in covariance structure analysis: conventional criteria versus new alternatives // *Structural Equation Modelling*. – 1999. – Vol. 6(1). – P. 1–55.
17. *Hutchison D., & Benton T.* Parallel universes and parallel measures: Estimating the reliability of test results. – Ofqual, Coventry, UK, 2009.
18. *Jordan J., Wylie J., & Mulhern G.* Phonological awareness and mathematical difficulty: A longitudinal perspective // *British Journal of Developmental Psychology*. – 2010. – Vol. 28. – P. 89–107.
19. *Kenny D.A.* Cross-lagged panel design. *Encyclopaedia of Statistics in Behavioral Science*. – London: Wiley and Sons, 2005.
20. *LeFevre, J.A., Fast L., Skwarchuk S.L., Smith-Chant B.L., Bisanz J., Kamawar D., & Penner-Wilger M.* Pathways to mathematics: longitudinal predictors of performance // *Child Development*. – 2010. – Vol. 81(6). – P. 1753–1767.
21. *Lerikkanen M., Rasku-Puttonen H., Aunola K., & Nurmi J.* Mathematical performance predicts progress in reading comprehension amount 7 year-olds // *European Journal of Psychology of Education*. – 2015. – Vol. 2. – P. 121–137.
22. *McQuitty S.* Statistical power and structural equation models in business research // *Journal of Business Research*. – 2004. – Vol. 57(2). – P. 175–183.
23. *Melby-Lervåg M., Lyster S.A., & Hulme C.* Phonological skills and their role in learning to read: A meta-analytic review // *Psychological Bulletin*. – 2012. – Vol. 138(2). – P. 322–352.
24. *Muter V., Hulme C., & Snowling M.* *Phonological Abilities Test*. – London: Psychological Corporation., 1997.
25. *Newton P.E.* The reliability of results from national curriculum testing in England // *Educational Research*. – 2009. – Vol. 51. – P. 181–212.
26. Ofqual. The reliability of results from national curriculum assessments, public examinations and qualifications. – Ofqual, Coventry, UK, 2010.
27. *Oliver, B., & Plomin, R.* Twins' early development study (TEDS): A multivariate, longitudinal genetic investigation of language, cognition and behavior problems from childhood through adolescence // *Twin Research and Human Genetics*. – 2007. – Vol. 10. – P. 96–105.
28. *Oliver B., Harlaar N., Hayiou-Thomans M., Kovas Y., Walker S., Spinath F., Petrill S., Dale P., & Plomin R.* Twin study of teacher-reported mathematics performance in 7-year-olds // *Journal of Educational Psychology*. – 2004. – Vol. 96(3). – P. 504–517.
29. *Plomin R., Price T.S., Eley T.C., Dale P.S., & Stevenson J.* Associations between behaviour problems and verbal and nonverbal cognitive abilities and disabilities in early childhood // *Journal of Child Psychology and Psychiatry*. – 2002. – Vol. 43. – P. 619–633.
30. *Posada D., & Buckley T.R.* Model selection and model averaging in phylogenetics: advantages of Akaike information criterion and Bayesian approaches over likelihood ratio tests // *Systems Biology*. – 2004. – Vol. 53. – P. 793–808.
31. *Pugh K.R., Mencl W.E., Jenner A.R., Katz L., Frost S., Lee J.R., Shaywitz S.E., & Shaywitz B.A.* Neurobiological studies of reading and reading disability // *Journal of Communication Disorders*. – 2001. – Vol. 34. – P. 479–492.
32. *Rivera S.M., Reiss A., Eckert M., & Menon V.* Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialisation in the left inferior parietal cortex // *Cerebral Cortex*. – 2005. – Vol. 15(11). – P. 1779–1790.
33. *Saudino K., Dale P., Oliver B., Petrill S., Richardson V., Rutter M., Simonoff E., Stevenson J., & Plomin R.* The validity of parent based assessment of the cognitive abilities of 2-year-olds // *British Journal of Developmental Psychology*. – 1998. – Vol. 16. – P. 349–363.

34. *Schumacker R.E., & Lomax R.G.* A beginner's guide to structural equation modeling. 2nd Edition. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc.; Mahwah, New Jersey, 2004.
35. *Shaywitz S.E., Shaywitz B.A., Pugh K., Fulbright R.K., Constable R., Einarson W., Shankweiler D., Liberman A.M., Skudlarski P., Fletcher J., Katz L., Marchione K.E., Lacadie C., Gatenby C., & Gore J.* Neurobiology functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 1998. – Vol. 95. – P. 2636–2641.
36. *Sieger R., & Shrager L.* Strategy choice in addition and subtraction. How do children know what to do? / In: C. Sophian (Ed.), *Origins of cognitive skills.* – Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1984. – P. 229–293.
37. *Simmons F., & Singleton C.* Do weak phonological representations impact on arithmetic development? A review of research into arithmetic and dyslexia // *Dyslexia.* – 2007. – Vol. 14. – P. 77–94.
38. *Snowling M.* From language to reading and dyslexia // *Dyslexia.* – 2001. – Vol. 7. – P. 37–46.
39. *Snowling M.J., & Hulme C.* Evidence-based interventions for reading and language difficulties: Creating a virtuous circle // *British Journal of Educational Psychology.* – 2011. – Vol. 81(1). – P. 1–23.
40. *Spinath F.M., Ronald A., Harlaar N., Price T.S., & Plomin R.* Phenotypic g early in life: On the etiology of general cognitive ability in a large population sample of twin children aged 2–4 years // *Intelligence.* – 2003. – Vol. 31. – P. 195–210.
41. *Torgesen J.K., Wagner R.K., & Rashotte C.A.* Test of word reading efficiency. – Austin, TX: Pro-Ed., 1999.
42. *Tymms P.* Baseline assessment, value-added and the prediction of reading // *Journal of Research in Reading.* – 1999. – Vol. 22. – P. 27–36.

THE LONGITUDINAL RELATIONSHIP BETWEEN PHONOLOGY AND ARITHMETIC: BETWEEN AGES 3 AND 12

E. SMITH-WOOLLEY^{1,4}, A.S. MALYKH^{2,3}, E.V. GALAZINSKY⁴,
I.A. VORONIN^{2,4}, Y. KOVAS^{1,2,4}

¹ *Goldsmiths, University of London, London, UK;*

² *Psychological Institute, Russian Academy of Education, Moscow, Russia;*

³ *National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia;*

⁴ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Much research into phonological abilities and arithmetic over time has suggested an association between these traits. The present study explored this relationship over a period of 9 years using a cross-lagged design. Data from 2511 dizygotic and 3584 monozygotic twins across 4 waves of assessment from age 3 to age 12 were analysed. A bi-directional cross-lagged model fit the data best, showing that for both arithmetic and phonology there were significant associations from early measures on one trait to later measures on the other trait, even after controlling for contemporaneous (same time) associations.

Keywords: arithmetic, phonology, relationships, longitudinal study.