

## АСИММЕТРИЯ МОЗГА, НЕРАВЕНСТВО И МНОГОАГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ

Ежов А.А., Терентьева С.С.

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

[ezhov@triniti.ru](mailto:ezhov@triniti.ru), [terenteva\\_lana@mail.ru](mailto:terenteva_lana@mail.ru)

Интерес к изучению неравенства и его влияния на поведение экономических агентов в последнее время значительно возрос. Причин этого явления несколько. Во-первых, неоклассическая экономика оказалась неспособной описать форму распределения богатства: это удалось сделать лишь физикам в 2004г. [1]. Во-вторых, поведение людей в ситуации несправедливого распределения оказалось противоречащим основному свойству рационального агента (главного действующего лица “экономикс”) – максимизации *полезности*, что было выявлено при исследовании классической *Ультимативной Игры* (в которой, в частности, неприятие несправедливого раздела может быть подавлено воздействием магнитного поля на правую префронтальную зону головного мозга играющего [2]). В 2010 г. исследования передних долей и стриатума мозга выявило отвращение к несправедливой оплате как у незаслуженно обделенных, так и у незаслуженно вознагражденных людей [3]. Наконец, исследования факторов экономического роста выявило бесполезность улучшения законодательства в области прав собственности, мер стимулирующих рост, демократизации и пр. на фоне резкого расслоения доходов [4]. Все эти обстоятельства сделали необходимым разработку таких экономических моделей и моделей экономических агентов, которые могли бы учитывать *влияние неравенства* на поведение последних. Разработка таких моделей ведется в рамках *эконофизики*, нацеленной на переосмысление положений экономических теорий. В *эконофизике* экономическая система, как и социум, рассматриваются как *сложные*, и их описание осуществляется с помощью методов физики, не апеллирующей в общем случае к *принципам оптимальности*. Агенты социума – люди – могут быть соотнесены с “атомами”, которые должны иметь возможность в определенном смысле “*притягиваться*” и “*отталкиваться*” друг от друга (это и делает их систему похожей на физическую). Для реалистичного описания экономики и демонстрации нетривиального поведения агенты должны быть при этом и *разными*. Интересно, что *именно представления об асимметрии мозга* и дает возможность построить модели агентов, которые ведут себя так, как это привычно для физиков, а также исследовать влияние на них неравенства предложений к увеличению доходов. Действительно, асимметрия может быть естественным образом связана с доминантностью одного из полушарий головного мозга. Таким образом, оказывается возможным введение агентов двух типов – право- и

левополушарно доминантных, что уже достаточно для построения модели с богатым поведением. На этом пути получены некоторые интересные результаты [5], которые позволяют сформулировать следующие две темы данного доклада:

1. Зачем физикам, занимающимся сложными системами (экономическими и социальными) знания об асимметрии мозга и как они могут использовать их для изучения влияния неравенства на поведение людей?
2. Какую пользу может принести исследование многоагентных моделей с агентами, имитирующими поведение людей с различными доминирующими полушариями, специалистам, изучающим асимметрии мозга человека?

Попытка ответить на эти два вопроса и составляет цель представляемого доклада.

Начнем с того, что экономические агенты во многих случаях вынуждены решать противоречивую задачу, как минимум, удерживать два ресурса. Первый из них (можно назвать его *материальным*) связан с их биологическим выживанием – агент должен хотя бы иногда отвечать на предложения окружающей среды, обеспечивающие ему питание, денежное вознаграждение, поддержание жизнедеятельности. С другой стороны, как личность, и профессионал, агент не может быть безоглядно конъюнктурен, и должен отказываться от выгодных предложений ухудшающих его выживание с тем, чтобы не потерять квалификацию, профессию, самоуважение. Иными словами, у агента есть еще и некий *нематериальный* ресурс, который ему также нельзя потерять. Достижение обеих целей – удержание обоих ресурсов – часто находится в остром конфликте. Легко показать, что у таких агентов могут быть только две *фундаментальные стратегии*: 1) абсолютный *конформизм* и неизменное согласие на получение первого материального ресурса, в надежде, что предложения эти не будут часто противоречить его профессиональной самоидентификации; 2) абсолютный *профессиональный консерватизм* и сохранение нематериального ресурса в надежде на то, что предложение материального ресурса не противоречащее профессиональной самоидентификации агента будет происходить достаточно часто.

Две эти стратегии могут быть представлены в виде двух булевых функций, которые были названы в [5] лево- и правополушарными, соответственно. Такое соотнесение с доминантностью одного из полушарий головного мозга имеет определенные основания.

Дело в том, что булевы функции могут быть представлены в *экспоненциальной форме*, выражающей функцию *импликации*:

$$b \rightarrow a = a^b = a + \bar{b}$$

Для левополушарной стратегии такая форма имеет вид (рис. 1b)

$$\Psi(a) = a^{\bar{a}} = a,$$

а для правополушарной (рис. 1a) –

$$\Psi(a) = a^a \equiv 1.$$

(здесь  $a=1$  если среда предлагает материальный ресурс без смены профессии, и  $a=0$  со сменой – рис 1a. Функция  $\psi(a)=1$  если агент остается в прежней профессиональной нише, и  $\psi(a)=0$  если он ее намеревается сменить – рис 1b).

Обратим внимание, что в первом случае в показателе экспоненты стоит логическое отрицание (рис. 1b), а во втором – нет (рис 1c). Если обратиться к работам одного из основателей математической психологии, В.А. Лефевра [6], то мы сможем интерпретировать выражение в показателе экспоненты как представление агента о сделанном ему предложении. Если же мы учтем, что формально-логические операции являются прерогативой левого полушария головного мозга, то логическое отрицание первой функции будет означать, что такая стратегия будет возможна только для левополушарно доминантного агента. А вот вторая (где такой операции нет) – вполне доступна правополушарно доминантному агенту.

К сожалению, *однородные ансамбли* агентов, имеющих описанные фундаментальные стратегии, малоинтересны. Правополушарные агенты сохраняют начальное случайное распределение по “профессиональным нишам”, а левополушарные принимают форму распределения, которым описывается предложение первого (материального) ресурса.

Для того, чтобы сделать существенный шаг вперед необходимо ввести *взаимодействие между агентами*. Сделать это произвольным образом нельзя – модель станет малообоснованной. Но можно вновь обратиться к работам Лефевра [6]. Им было, в частности, показано, что модели математической психологии позволяют построить *два этических исчисления*, различающихся интерпретацией двух алгебраических операций – сложения и умножения, трактуемых как *конфронтация* и *компромисс* между агентами, и наоборот.

Замечательно то, что построенные этические системы хорошо описывают экспериментальный материал, отражающий поведение представителей этических систем

западного и советского обществ. Если для первого основой этики является *формальный запрет поступков, трактуемых негативно*, то для второго – *неформальное одобрение положительно оцениваемых поступков*. Здесь можно воспользоваться аргументом, связывающим формальные схемы мышления с левым полушарием, а неформальные (противоречивые, диалектические) с правым. Если такое отождествление делается, то весь аппарат алгебры Лефевра, описывающий 1-ю и 2-ю этические системы, может быть непосредственно применен для описания взаимодействия агентов с лево- и правополушарными стратегиями. Произвола в выборе правил взаимодействия агентов удастся таким образом избежать.

Введение, таким образом определенного взаимодействия между агентами, приводит к интересным результатам. Ансамбли левополушарных агентов начинают следовать некоторому варианту статистики Ферми-Дирака. Ансамбли правополушарных агентов подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна (такая связь становится достаточно естественной для физиков, если заметить, что функция, описывающая решения левополушарных агентов антисимметрична, а решение правополушарных – симметрична). Приблизительно это может трактоваться как наличие эффективного взаимного отталкивания левополушарных агентов и эффективного взаимного притяжения правополушарных (рис. 1d). Интересно, что самовоздействие агентов формально приводит к смене их доминантности (рис. 1e). Такая же смена может быть естественно введена в модель в случае, когда используемая агентом стратегия должна быть немедленно изменена из-за возникновении риска потери того из ресурсов, на сохранение которого данная стратегия не ориентирована.

Описанная модель уже становится вполне приемлемой для изучения ее методами статистической физики. В частности, в ней обнаруживается нетривиальный фазовый переход, происходящий тогда, когда степень неравенства предложения материального ресурса в разных профессиональных нишах превышает некоторое критическое значение.

Чтобы увидеть этот переход необходимо оставить *равновесные распределения* агентов по профессиональным нишам и сосредоточиться на изучении флуктуаций этих распределений – их случайных отклонений от средних значений. Если попытаться проследить за всеми *историями* агентов, то окажется, что их решения в каждый момент времени может быть отнесено к одной из трех категорий (рис. 1f).

1. Агент соглашается на предложение получить материальный ресурс и остается в прежней профессиональной нише. От такого предложения агент, по понятным

причинам никогда не отказывается. Если обозначить принятие предложения буквой А (Accept), а сохранение профессиональной ниши буквой S (Stay), то такое решение можно описать парой символов – AS.

2. Агент соглашается на предложение получить материальный ресурс и сменить для этого свою профессиональную нишу (именно в ней ему материальный ресурс к его разочарованию и предлагается). Если переход в новую нишу обозначить буквой G (Go), то такое решение можно описать парой символов – AG.
3. Агент отказывается от предложения получить материальный ресурс и сменить для этого свою профессиональную нишу. Если такой отказ от перехода в новую нишу обозначить буквой R (Reject), то такое решение можно описать парой символов – RS.

Таким образом, историю агента можно представить в виде трехсимвольной последовательности (из чисел 1,2,3) или же последовательностью трех пар символов AS, AG, RS. Заметим, что пара RG в ней появиться не может в принципе.

Следующее трудное допущение состоит в том, что мозг, по-видимому, может работать не с трехсимвольными, а лишь с бинарными кодами (в поддержку этого предположения есть экспериментальные данные [7]). Если это так, то можно ограничиться парами символов А и R или S и G, проектируя трехсимвольные последовательности на бинарные. К чему это приведет?

1. В каждом из случаев информация о событиях станет неполной.
2. Выбор бинарным кодировки станет неопределенным.

В этом месте можно представить, что два полушария “мозга” искусственных агентов вполне могут *кооперировать*, используя различные кодировки, для восстановления полной картины историй, как кооперируют наши полушария, например, при интеграции информации от двух полей зрения (правого и левого). Эта гипотеза получает некоторое подкрепление, если мы начнем непредвзято изучать обе бинарные кодировки для ансамблей лево- и правополушарных агентов. Оказывается (это было впервые обнаружено при компьютерном моделировании и вычислении некоторых ультраметрических свойств пространств историй агентов, характеризующих их иерархичность [5]), что если вероятности предложения ресурсов слабо отличаются в разных профессиональных нишах, то обе кодировки будут дополнительны для ансамблей обоих типов агентов. Степени ультраметричности наборов памяти в однородных

ансамблях агентов разных типов будут обладать высокой симметрией, совпадая при простой замене кодировок AR на SG у лево- и правополушарных агентов, и наоборот. Но, если распределение материального ресурса станет *слишком неоднородным* (высокая степень неравенства), то в системе останется лишь одна симметрия, выполняемая в том случае, если левополушарные агенты используют кодировку SG, а правополушарные AR, *но не наоборот!* Для физиков нарушение симметрии – привычная ситуация, и для них асимметрия есть, как правило, именно следствие *потери изначально имеющейся симметрии*. Этому факту можно дать достаточно интересную интерпретацию. Левополушарные, невзаимодействующие агенты (“фермионы”) имеют фундаментальную встроенную стратегию потребления материального ресурса. Для них главную опасность представляет потеря второго ресурса (в нашей интерпретации – профессионализма). Для того чтобы этого избежать, им было бы выгодно *считать* число случаев, когда они меняют свою профессиональную нишу. И именно для этого необходимо и достаточно использовать для кодирования памяти символы S и G, которые и дадут полную информацию о числе смен таких ниш. Напротив, правополушарные невзаимодействующие агенты автоматически сохраняют профессиональную нишу. Для них главное, не умереть при этом от голода. А это можно сделать, *подсчитывая*, сколько же раз их кормили. Но для решения этой задачи достаточно кодировать истории агентов символами A и R. Таким образом, в несправедливом обществе, с резко неравномерным предложением материального ресурса у агентов возникнут специфические для них кодировки памяти, позволяющие следить за *неприоритетным ресурсом*. Иными словами, появятся предпосылки появления *простейшей когнитивной технологии – счета*. Это же дает намек на возможность различных неполных схем кодирования информации в разных полушариях головного мозга не только у искусственных агентов, но и у людей. Такая интерпретация модели может показаться чрезмерно смелой, но она, все же, позволяет надеяться на возможность использования многоагентных систем для моделирования такого процесса как, возникновения асимметрии памяти, в частности, использования разными полушариями разных ее кодировок. Такая возможность ранее наблюдалась в исследованиях распознавания текстов и мелодий [8]. Кроме того, так как истощение того или иного ресурса может парироваться изменением доминантности полушарий (сменой фундаментальной стратегии), то подобная модель может использоваться для описания этого процесса. Поэтому, помимо таких факторов, как влияния функциональных состояний [9], воздействия алкоголя [10] и пр., модель в принципе позволяет учитывать воздействие *социальных факторов*, таких как *экономическое неравенство*, на процессы смены доминантности полушарий и возникновение специфических кодировок памяти.

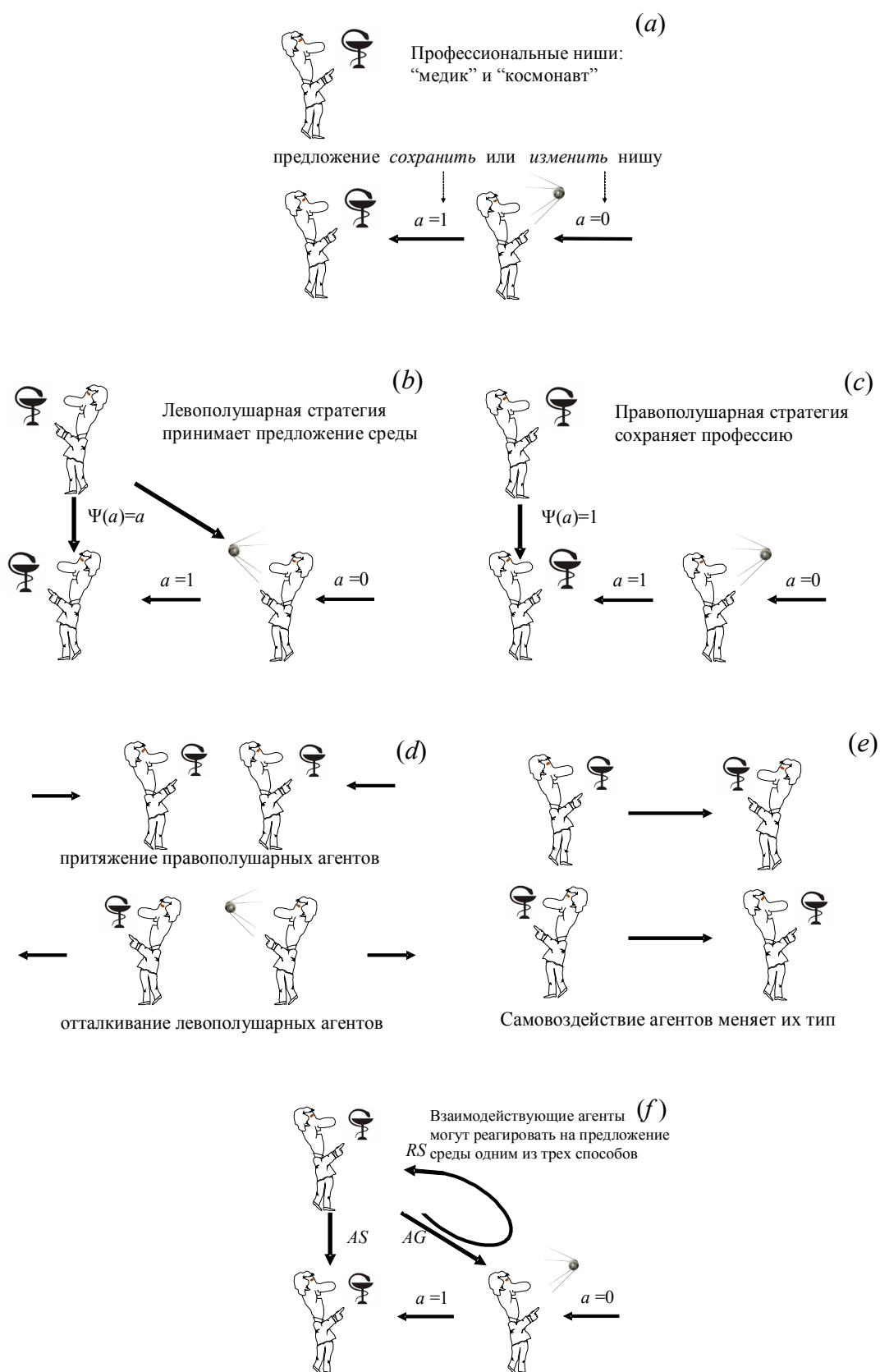


Рисунок 1. Предложения среды материального ресурса в двух нишах – “медик” и “космонавт”, стратегии левополушарных и правополушарных агентов (повернутых на рисунке доминантным полушарием), их взаимодействие и типы решений.

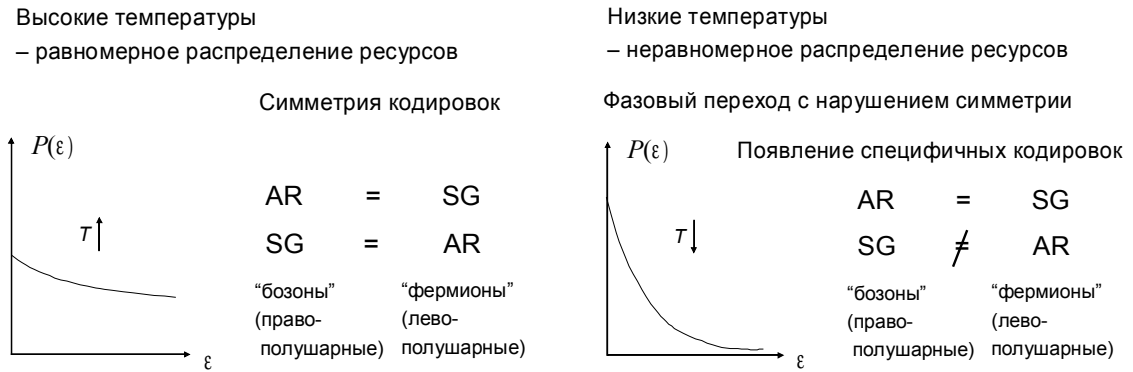


Рисунок 2. При высоких температурах (низкая степень неравенства) кодировка историй лево- и правополушарных агентов симметрична и дополнительна (слева). При низких температурах (высокая степень неравенства) только AR кодировка правополушарных агентов эквивалентна дополнительной SG кодировке левополушарных агентов (справа).

### Литература:

1. Scafetta N., Picozzi S., West B.J. An out-of-equilibrium model of the distributions of wealth. *Quantitative Finance*. 2004. V.4. P.353–364.
2. Knoch D., Gianotti, L.R., Pasquale-Leone A., Treyer V., Regard M., Hohmann M., and Brugger P. Disruption of right prefrontal cortex by low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation induces risk-taking behavior. *J. of Neuroscience*. 2006. V. 26. P.6469–6472.
3. Tricomi E. et al. Neural evidence for inequality-averse social preferences. *Nature*. 2010. № 463. P.1089–1091.
4. Easaw J., McKay A., Savoia A. Inequality, Democracy, and Institutions. *World Development*. 2010. V.38. P.142–154.
5. Ezhov A.A., Khrennikov A.Yu., Terentyeva S.S. Indication of a possible symmetry and its breaking in a many-agent model obeying quantum statistics. *Phys. Rev. E*. 2008. V. 77. P. 031126: 1–12.
6. Лефевр В.А. Алгебра совести. М.: Когито-центр. 2002.
7. Lin L., Osan R., Tsien J. Organizing principles of real-time memory encoding: neural clique assemblies and universal neural codes. *Trends in Neurosciences*. 2006. V 29. P. 48–57.
8. Samson S. Zatorre, R.J. Recognition memory for text and melody of songs after unilateral temporal lobe lesion: Evidence for dual encoding. *J. of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*. 1991. V. 17. P. 793–804.
9. Фокин В.Ф. Динамическая функциональная асимметрия как отражение функциональных состояний. *Асимметрия*. 2007. Т. 1. С.4–9.
10. Никонов Ю.В. Межполушарная асимметрия головного мозга и квантовые статистики при алкогольной зависимости. *Асимметрия*. 2010. Т.4. С. 12–23.