

# ЭМПИРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## *ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ АВДОНИН*

доктор политических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Института научной информации по общественным наукам  
Российской академии наук,  
Москва, Россия  
e-mail: avdoninvla@mail.ru



## *АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ СПИРОВ*

кандидат биологических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Института эволюционной физиологии  
и биохимии им. И.М. Сеченова  
Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sspirov@yandex.ru



## *АНТОН ВАЛЕНТИНОВИЧ ЕРЕМЕЕВ*

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры прикладной и вычислительной математики  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Омский государственный  
университет им. Ф.М. Достоевского»  
Омск, Россия  
e-mail: eremeev@ofim.oscsbras.ru



## Междисциплинарный трансфер знаний как метафорические переносы: эволюционная биология, эволюционные вычисления и вычислительная эволюционная биология как области междисциплинарных трансферов

УДК: 001.2+001.4+001.53

DOI: 10.24411/2079-0910-2020-14007

В статье предлагается методология изучения трансфера знаний в междисциплинарных исследованиях, основанная на сочетании методологии историко-научных, социокультурных исследований научной коммуникации с подходом семиотики и когнитивной лингвистики к изучению средств трансфера знаний в науке. В качестве таких средств рассматриваются метафорические переносы смыслов между дисциплинарными контекстами как концептуальными доменами. С помощью этой методологии и авторской методики параллельного словаря смысловых значений исследуется трансфер знаний между активно развивающимися научными областями эволюционной биологии, эволюционных вычислений и вычислительной эволюционной биологии. Проводится сопоставительный анализ смысловых значений ряда ключевых терминов этих научных областей, определяются характерные особенности их смысловых трансформаций (редукций) при трансфере, выдвигается идея цикла трансфера между этими областями, включающего прямой и обратный трансфер, предлагается аналитическая схема этих трансферов. Дается характеристика вычислительной эволюционной биологии как междисциплинарной научной области, возникшей и развивающейся во многом как результат обратного трансфера знаний.

**Ключевые слова:** междисциплинарность, трансфер знаний, метафорические переносы в науке, эволюционная биология, эволюционные вычисления, вычислительная эволюционная биология.

### Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 17-18-01536, реализованного в Институте научной информации по общественным наукам Российской академии наук.

Современную науку трудно представить без активно развивающегося в ней значительного сегмента разнообразных междисциплинарных исследований, проектов и разработок. Порой с этой тенденцией даже связывается основная линия развития научного знания в современных условиях и в будущем [Степин, 2015; Brier, 2014; Междисциплинарность..., 2010 и др.]. В многочисленных исследованиях по междисциплинарности в науке часто основное внимание уделяется вопросам структурной организации междисциплинарных областей, их составным частям, типологии, соотношениям с моно-, мульти-, трансдисциплинарностью и др. [The Oxford Handbook..., 2017; An Introduction..., 2016; Repko, Szostak, 2017]. Значительный объем исследований также связан с историко-научными, коммуникационными и социолого-научными аспектами междисциплинарности, становлением,

развитием, институционализацией отдельных междисциплинарных направлений и областей [Galison, 1997; Sismondo, 2010; Kacavin, 2016 и др.]. Отмечая и учитывая достигнутые в этих исследованиях результаты, в данной статье мы предполагаем сосредоточить основное внимание на процессах междисциплинарных взаимодействий, и прежде всего на трансфере знаний между науками, на его условиях и средствах. Мы полагаем, что при всем значении других компонентов именно трансфер знаний является ключевым процессом для развития научного знания на почве междисциплинарности.

Исследовать наш предмет мы предполагаем на материале взаимодействия таких активно развивающихся и актуальных научных областей, как эволюционная биология, эволюционные вычисления и вычислительная эволюционная биология, достижения которых во многом связаны с трансфером знаний между ними. Также вполне очевидно, что этот трансфер является междисциплинарным, так как связывает достаточно разные и по предметам, и по методам, и по характеру и циклам развития области биологических и математических (вычислительных) наук. В то же время он весьма продуктивен, поскольку задает в этих науках новые векторы развития, а результаты дают эффекты в конкретных исследованиях и разработках<sup>1</sup>. Успехи эволюционных и генетических алгоритмов и близких к ним подходов открыли путь к формированию новых разделов прикладной математики. Это повторялось неоднократно и в итоге сформировало обширную область эвристических подходов, вдохновленных биологическими идеями. Анализ этого трансфера на основополагающем и самом развитом примере эволюционных и генетических алгоритмов должен иметь немалое методологическое значение.

Мы также предполагаем рассмотреть этот трансфер, фокусируя внимание на семиотических средствах переноса знаний с учетом исторических особенностей научной коммуникации между вышеназванными научными областями. Объединение всех этих планов анализа позволяет как конкретизировать обсуждение ряда дискуссионных вопросов теории междисциплинарности, так и внести вклад в объяснение конкретного междисциплинарного взаимодействия активно развивающихся научных областей. Оно также дает возможность лучше понять проблемы, возникающие в ходе междисциплинарных трансферов, и предложить идеи по их стимулированию и повышению эффективности как в познавательном, так и в институциональном плане.

## **1. Междисциплинарный трансфер знаний как коммуникативный и когнитивный процесс**

Исследование трансфера знаний в науке предполагает, что данное явление представляет собой одновременно и коммуникационный, и когнитивный (познавательный) процесс. И оба этих качества в нем тесно связаны. Выделение и рассмотрение одного без другого затруднительно, поэтому, как правило, когда речь идет

---

<sup>1</sup> Например, Нобелевская премия по химии 2018 г. была присуждена биологу Френсис Арнольд за работы по экспериментальной молекулярной эволюции, и именно она с соавторами отмечала, что эволюционные вычисления могут служить теоретическим фундаментом эволюции *in vitro* [Voigt et al., 2002].

о трансфере знаний, применяются в тесном взаимодействии коммуникационные и эпистемологические планы анализа [Гутнер, 2008; Коммуникативная..., 2009; Антоновский, 2015; и др.]. Сама по себе связь коммуникации и познания относится, конечно, не только к трансферу знаний в науках, но и к множеству других социальных и ментальных явлений и процессов и даже иногда в рамках некоторых информационно-коммуникационных теорий рассматривается как универсальное свойство познания и мироздания [Brier, 2014, Deacon, 2011].

Но в нашем случае акцент на этой связи особенно характерен, так как понять без этого существо трансфера знаний в науках, и особенно подойти к анализу его свойств, средств и механизмов было бы, на наш взгляд, довольно сложно. При постановке вопроса об этой взаимосвязи применительно к трансферу знаний в науке значимую роль играет определение исходного приоритета в исследовательском подходе. И, поскольку речь идет в первую очередь именно о трансфере (процессе переноса, перемещения знания между разными смысловыми областями/контекстами), то таким приоритетом, очевидно, будет коммуникационный план исследования. Имеется в виду, что исходным моментом рассмотрения является перенос знания в ходе научной коммуникации, что позволяет фиксировать внимание на самом этом процессе (переносе/трансфере), на его особенностях, средствах и механизмах. И лишь затем переходить к результирующей познавательной составляющей этой коммуникации — формированию в ее ходе и результате нового научного знания (познавательный план). Хотя, строго говоря, в самом трансфере и условия, и процесс, и результат, а также коммуникационные и познавательные аспекты тесно переплетены, а их выделение и различение целесообразны, прежде всего, для целей изучения.

В качестве примеров и образцов такого подхода можно назвать исследования таких историков науки, как Питер Галисон, Пол Тагард и др. [Galison, 1999; Галисон, 2004; Тагард, 2014 и др.], которые рассматривают трансфер знаний в контексте практики коммуникативного взаимодействия разных научных сообществ. Последние уподобляются разным культурным сообществам, а их взаимодействия, в том числе и трансфер знаний, — некоему роду межкультурных обменов. Различия их исходных дисциплинарных «культур» не позволяют им общаться всесторонне и полноценно, подобно тому, как могут общаться представители одной «культуры», но некий редуцированный и в то же время эффективный трансфер знаний между ними происходит. Это имеет место в так называемых зонах обмена, где люди с различными знаниями вступают в реальную коммуникацию для решения общих задач [Galison, 1999, p. 145–149]. П. Галисон сравнивает языки такого обмена знаниями с жаргонами и пиджинами — упрощенными языками межкультурной коммуникации, ориентированными на ограниченные и прагматические взаимодействия. В лингвистике и культурной антропологии описано множество таких языков. Редукция выражается в практически полном отсутствии в них грамматики, в крайне огрубленной фонетике, в применении, главным образом, семантической функции языка и выработке так называемых промежуточных словарей понимания (“in-between” vocabularies).

В науке они возникают на ранних этапах междисциплинарного взаимодействия, когда оно сталкивается с проблемами, но тем не менее способны давать эффективный результат при решении конкретных задач. В качестве примера П. Галисон приводит работу над проектом «Радар» в начале Второй мировой войны, в которую были вовлечены ученые разных специальностей (физики-теоретики,

экспериментаторы, инженеры). Возникший в общении между физиками-теоретиками, специализировавшимися в области теории поля, и инженерами-электротехниками упрощенный язык (пиджин) способствовал быстрому нахождению ключевых технологических решений для создания радаров большой мощности [Galison, 1999, p. 149–153].

По мере развития междисциплинарности редуцированные языки могут развиться в нечто большее, подобно тому, как упрощенные пиджины развиваются в креолы — гибридные языки полноценного общения, и обеспечивать более полную коммуникацию научных дисциплин. Известный историк когнитивной науки и один из ее создателей Пол Тагард, используя подход П. Галисона, также объединяет в исследовании междисциплинарных трансферов эпистемологический и социально-антропологический аспекты. На примере становления такой ярко выраженной междисциплинарной области, как когнитивная наука, он исследует не только трансфер знаний между разными дисциплинами, но и роль в этом отдельных людей и институтов. По существу, П. Тагард описывает формирование галисоновской «зоны обмена» (в его терминологии «торговой зоны») в когнитивистике, обеспечивающей эффективный трансфер знаний между такими разными науками, как психология, нейробиология, лингвистика, исследование искусственного интеллекта и др. Несмотря на существенные различия этих наук, трансфер идей между ними возможен в силу общей заинтересованности возникшего сообщества когнитивистов в продвижении исследований. В частности, П. Тагард приводит примеры, как концепт «ментальной репрезентации» из психологии и философии был трансферирован в области лингвистики, искусственного интеллекта, нейробиологии и антропологии, вызвав там продуктивные эвристические эффекты [Тагард, 2014, с. 49]. В то же время относительно языка общения, обслуживающего этот междисциплинарный трансфер в когнитивистике, он в духе П. Галисона отмечает, что типологически это скорее упрощенный пиджин, чем полноценный креол, создание которого в когнитивистике — дело будущего [Тагард, 2014, с. 35].

В работах российских авторов, анализировавших этот подход, предлагались проблематизации и типологизации «галисоновских зон обмена», дискутировались вопросы концептуальных характеристик этой методологии и возможности применения в анализе междисциплинарных исследований концептуального аппарата социокультурной антропологии. В целом признается ее продуктивность в концептуализации определенных проблемных ситуаций в научной коммуникации, разрешение которых может давать научные достижения [Касавин, 2017, с. 11–12; Дорожкин, 2017].

Коммуникационный ракурс исследования трансфера знаний в науке в теоретическом плане также предполагает опору на семиотические теории коммуникации, направленные на рассмотрение трансфера не количественных параметров информации, а смыслообразующей информации или информации, организованной в смыслы и организующей смыслы. Они акцентируют знаковую, кодовую сторону переноса/трансфера смыслов, фокусируются на знаках и знаковых системах как средствах трансфера, на восприятии, декодировании и интерпретации (семиозисе) знаковых средств в различных контекстах, на формировании на этой основе новых смысловых значений и новых знаний [Де Соссюр, 2004; Пирс, 2001; Моррис, 2001; Семиотика..., 2001 и др.]. Важным аспектом этих теорий является анализ лингво-се-

миотических и лингво-когнитивных средств трансфера смыслообразующей информации [Лингвистика и семиотика..., 2016]<sup>2</sup>.

Эти теории также активно используются в когнитивной лингвистике, которая исходит из тесной связи языка и познания и подчеркивает, что в основании языков лежат такие когнитивные познавательные способности, как категоризация, концептуализация, интерпретация, метафоризация [Evans, Green, 2006; The Oxford Handbook..., 2011; Демьянков, 1994 и др.]. В рамках когнитивной лингвистики разрабатываются объяснительные теории различных когнитивных аспектов языка, которые могут быть полезны в нашем исследовании трансферов в науке. Важную роль в когнитивной лингвистике играет исследование когнитивных или концептуальных метафор как средств переноса смыслов (когнитивного содержания) между разными концептами («концептуальными доменами»), приводящих к появлению новых смысловых значений (новых знаний). В лингвистике в основном исследуется употребление концептуальных метафор в обыденном языке, в художественной литературе, в языке СМИ, в политических и юридических документах и дебатах, но есть также и направление исследования таких метафор в науке.

В когнитивной лингвистике существует несколько теорий концептуальных метафор [Теория метафоры, 1990]. Наиболее известные из них были выдвинуты М. Блэком, Э. МакКормаком, Д. Лакоффом и Дж. Джонсоном и др. Этой тематике были посвящены также работы российских исследователей Н.Д. Арутюновой, Г.С. Баранова, Э.В. Будаева, В.Н. Телия и др. В большинстве этих теорий концептуальные метафоры рассматриваются как средства связывания разных смысловых или концептуальных «доменов» («пространств», контекстов), среди которых могут быть выделены домены-источники и домены-цели. Метафора переносит смысл из домена-источника, который представляет собой более познанное и понятное концептуальное (смысловое) пространство, к домену-цели, в котором концептуальное пространство менее познано и определено. Перенос смысла из домена-источника к домену-цели позволяет создавать в последнем новые смыслы и получать тем самым новые знания. Как формулирует Э.В. Будаев: «В результате однонаправленной метафорической проекции (metaphorical mapping) из сферы-источника в сферу-мишень сформировавшиеся в результате опыта взаимодействия человека с окружающим миром элементы сферы-источника структурируют менее понятную концептуальную сферу-мишень, что составляет сущность когнитивного потенциала метафоры» [Будаев, 2007, с. 16].

В теориях также обычно говорится о преимущественно однонаправленном векторе концептуальных метафор от более конкретных и познанных доменов к более абстрактным, позволяющим получать о последних более конкретные знания. В то же время такая направленность не исключает в некоторых случаях и обратный перенос — от более абстрактных доменов к более конкретным, о чем будет сказано ниже. Особенностью концептуальной метафоры также считается перенос не всех, а лишь части смыслов домена-источника к домену-цели. По поводу того, какова эта часть, существуют разные мнения. Иногда говорят о смысловых аналогиях или сходствах

---

<sup>2</sup> В нашем исследовании, ориентированном на взаимосвязь коммуникационных и познавательных аспектов трансфера знаний в науке, важно учитывать расширенный лингво-семиотический контекст, на который уже обращалось внимание в ряде работ [Ильин, 2018; Золян, 2017; Колесов, 2018 и др.].



концептуальных доменов, которые выделяет метафора, иногда о смысловых схемах, переносимых метафорой, иногда о переносимых ею достаточно сложных и комплексных смысловых конструктах [Metaphor and Thought, 1993 (2002)].

В литературе по когнитивной лингвистике также идет речь о развитии теории концептуальных метафор в направлении «смешивания» или «блендирования» смыслов [Turner, Fauconnier, 2000]. В этих подходах идея двух концептуальных доменов (источника и мишени/цели) дополняется еще двумя пространствами (доменами) — пространством генезиса метафоры (genetic space) и пространством «смешения» смыслов (blended space). Первое из них представляет собой некоторую область подготовки и формирования возможной концептуальной метафоры, область предварительного согласования и некоторого соответствия связываемых в ней смыслов. А вторая возникает уже после переноса смыслов от домена-источника к домену-цели. Она, по замыслу авторов, является уже новым концептуальным доменом, в котором перенесенный в домен-цель смысл ставится «блендом» (гибридным или смешанным смыслом) и получает возможность модифицироваться по разным траекториям (либо вновь сближаясь с доменом-источником, либо развиваясь в домене-цели, либо трансформируясь в направлении новых доменов) [Turner, Fauconnier, 2000, p. 137].

Коммуникативный подход к трансферу, выделяя в нем свойство переноса смыслов между концептуальными доменами, применительно к наукам означает, что и междисциплинарный трансфер знаний есть по существу процесс переноса смысловых значений между концептуальными пространствами двух различных научных дисциплин. Особенность здесь состоит в том, что концептуальные пространства наук являются значительно более строгими и упорядоченными по сравнению с доменами других областей. И здесь требуется более точная передача смыслов. В то же время концептуальная упорядоченность научных доменов означает, что при трансфере между разнородными доменами/контекстами сами смыслы (знания) претерпевают существенные трансформации для эффективного «встраивания» в новый контекст. В научном трансфере требуется точный и в то же время подвергающийся большей трансформации и редукции перенос смыслов. Отчасти это напоминает свойства пиджированных языков междисциплинарных обменов из работ П. Галисона и П. Тагарда.

Может ли с этим справиться концептуальная метафора или тот метафорический перенос смыслов, который выделяет когнитивная лингвистика? Ответ содержится в исследованиях, подчеркивающих значимость и эффективность познавательного потенциала концептуальных метафор [Гусев, 1984; Петров, 1985; Debatin, 1995; Brown, 2003; Седов, 2000 и др.] Они показывают, что эти метафоры многослойны и могут содержать не только лежащие на поверхности, но и внутренние, обобщенные и редуцированные смыслы концептуальных доменов в виде схем, структурных аналогий, сценариев, фреймов. В трансфере знаний в науках это особенно важно, так как там речь часто идет о переносе смысла абстрактных идей и теорий, призванных к тому же выполнить эвристическую функцию порождения нового знания в целевом домене.

В дальнейшем в исследовании темы трансфера знаний между научными областями эволюционной биологии и эволюционных вычислений мы будем применять опирающуюся на представления о роли метафорических переносов в трансфере методику параллельного вокабуляра (словаря смысловых значений терминов).

(Предварительный вариант методики см.: [Фомин, 2015, с. 80–81]). Она исходит из идей «логико-семантического треугольника» (треугольника Фреге)<sup>3</sup>, раскрывающего связь термина (имени, знака), предметного значения (денотат или референт) и смысла (смыслового значения, знания) [Фреге, 1997; Степанов, 1971]. Методика основывается на сопоставлении и анализе смысловых значений ряда идентичных научных терминов в разных научных областях и предполагает, что идентичность терминов свидетельствует о трансфере знаний между этими областями, а различия смысловых значений — о частичных изменениях смыслов при их переносе. Средством трансфера предлагается считать метафорический перенос (концептуальную метафору) значимой части смысла из исходного (более познанного) домена (дисциплинарного контекста) в целевой (менее познанный) домен, способный породить в нем новое знание (подробнее см.: [Авдонин, 2019]). Технически параллельный словарь выполняется в виде таблицы сопоставления смысловых значений терминов в дисциплинах-источниках и в целевых дисциплинах, дополняемых графой о соответствующих смысловых трансформациях (см. Раздел 3).

## **2. Эволюционная биология, эволюционные вычисления и вычислительная эволюционная биология как области междисциплинарных трансферов**

Теперь, ознакомившись с концептуальными основаниями нашего подхода, можно перейти к рассмотрению трансфера между научными областями эволюционной биологии и эволюционных вычислений.

Прежде всего, о поле этого трансфера. Считается, что оно возникает в 60–70-е гг. XX в. на стыке эволюционной биологии и вычислительной математики. Главными инициаторами этого трансфера выступают специалисты-математики из сферы компьютерного программирования. Хотя определенную поддержку они встречают и у биологов-эволюционистов, ориентированных на использование в своих исследованиях вычислительной техники. Этот интерес математиков к трансферу знаний из эволюционной биологии возникает как составная часть более широкого течения в вычислительных компьютерных науках по исследованию и использованию «естественных вычислений» или «природных моделей вычислений» (Natural computing, Nature-inspired models of computation) [Фогель, Оуэнс, Уолш, 1969; Brabazon, O'Neill, McGarraghy, 2015].

При формировании области эволюционных вычислений происходила ассимиляция базовых идей синтетической теории эволюции (СТЭ), которые использовались как вдохновляющий пример для разработки и развития эвристических алгоритмов в прикладной математике. Способы, которыми в живой природе решаются какие-то более или менее частные или общие задачи, осознавались, упрощались и формализовывались математиками и в итоге становились работающими техниками и алгоритмами для решения более широкого спектра (прикладных) задач [Holland, 1975; Koza et al., 1999; Backofen, Clote, 1997; Ereemeev, 2008].

---

<sup>3</sup> Впервые эти идеи были изложены Г. Фреге в знаменитой статье «О смысле и значении», опубликованной в 1892 г.



В рамках «естественных вычислений» интерес был проявлен не только к эволюционной биологии в широком смысле, но и к исследованиям функционирования мозга, иммунных и генетических систем организмов, а также группового поведения, управленческих систем и др. Хотя эволюционная биология как источник или донор этого трансфера оставалась приоритетной [De Jong, 2006].

Следует также отметить, что к моменту начала трансфера знаний из эволюционной биологии в вычислительные науки сама эволюционная биология пережила ряд существенных трансформаций, главной из которых было утверждение в ней классического эволюционного синтеза, или СТЭ. Существо синтеза состояло в объединении в единый комплекс дарвиновского эволюционного учения и законов классической генетики, что позволяло подвести под биологическую эволюцию прочный генетический фундамент [Smocovitis, 1996; Колчинский, 2015 и др.]. Положения эволюционного синтеза находили подтверждения во многих отраслях биологической науки, а их применение в исследованиях давало положительные результаты. Для нас здесь важно отметить то, что становление в биологии эволюционного синтеза не обошлось без влияния математики. Особенно это относится к игравшей важную роль в эволюционном синтезе популяционной генетике, где вычисления, связанные с динамикой популяций и комбинациями единиц генетической наследственности, занимали важное место, и целый ряд положений популяционной генетики был выражен в математической форме (теоремы Фишера, Холдейна, закон Харди–Вайнберга и др.) [Provine, 1978]. И этот трансфер из прикладной математики в эволюционную биологию, проходивший сначала через популяционную генетику, а затем и молекулярную генетику, микробиологию и ряд других отраслей, на этапе становления классического эволюционного синтеза действительно имел место. По сути, это был некоторый предварительный этап, без которого возникший затем эффективный трансфер из эволюционной биологии в вычислительную математику был бы значительно менее вероятен. Исследователи истории математизации популяционной генетики в 1920–1930-е гг. [Георгиевский, 2011; Ермолаев, 2012 и др.] также отмечают влияние того периода на развитие последующих связей эволюционной биологии с математикой, видя в этом некий единый процесс. Но, на наш взгляд, тот этап трансфера все же был более специфичен, хотя бы потому, что область компьютерного программирования (как основная область последующего трансфера) к тому времени еще не сложилась.

Таким образом, еще до начала трансфера знаний из эволюционной биологии в эволюционные вычисления сама эволюционная биология подверглась первичной математизации (т. е. трансферу знаний из математики) и была в некотором роде подготовлена к тому трансферу, который начался позже.

К настоящему времени одним из важных результатов трансфера знаний из эволюционной биологии в математику является обширная и активно развивающаяся область эволюционных вычислений. Она представляет собой часть вычислительной математики, тесно связанной с компьютерным программированием. В этой области успешно разрабатываются эволюционные и генетические алгоритмы и близкие к ним подходы, находящие применение в решении самых разнообразных задач науки и практики. Этот путь формирования новых разделов прикладной математики повторялся неоднократно и сформировал в итоге обширную область эвристических подходов [Brabazon, O'Neill, McGarraghy, 2015].

Примечательно, что по мере развития области эволюционных вычислений, усложнения и совершенствования различного рода алгоритмов и моделей в ней стали складываться условия для того, что можно было бы назвать обратным трансфером. Имеется в виду некоторый комплекс знаний по алгоритмизации, математическому моделированию, компьютерному программированию и решению задач, который стал активно внедряться в отдельные области биологических исследований (в исследование генных сетей, геновое моделирование и дизайн генов и др.) [*Spirov, Holloway*, 2012, 2013, 2016].

Следует отметить, что на практике этот процесс шел непросто и занял довольно много времени (более двух десятилетий). И в этом смысле он отличался от быстрого формирования междисциплинарных областей науки в 1940–1960-е гг., объединенных вокруг решения конкретных научно-технологических задач (и что было описано, в частности, П. Галисоном). В данном случае таких конкретных объединительных задач поставлено не было и процесс шел более «естественным» для науки путем. В основном замедленность объяснялась сдержанным отношением к такому трансферу со стороны представителей биологических наук, которые долго рассматривали математику (и программирование) лишь в качестве «внешнего» вспомогательного и технического средства в собственно биологических исследованиях, а не как эвристическое средство получения новых знаний в области биологических наук.

Но постепенно положение изменилось и взаимодействие стало принимать форму двустороннего («взаимно заинтересованного», по П. Галисону) трансфера знаний между научными областями. Показателем этого, на наш взгляд, может служить и формирование некоторого редуцированного языка общения или, как упоминалось выше, пиджина, который стал обслуживать этот взаимный трансфер. Этот язык (точнее, ряд его элементов) последние полтора-два десятилетия используется как в области компьютерного моделирования эволюции генных сетей, так и в смежной области компьютерного эволюционного дизайна генов и генных сетей [*Spirov, Holloway*, 2013, 2016] (т. е. он выполняет функции языка общения специалистов из этих разных областей).

На наш взгляд, это имеет место, прежде всего, когда методы и подходы из области эволюционных вычислений используются для исследования фундаментальных проблем моделирования эволюции и более прикладных проблем компьютерного дизайна генов / генных сетей [*Francois, Hakim*, 2004; *Francois, Siggia*, 2010]. Эти области принадлежат к современной вычислительной эволюционной биологии, и этот язык можно рассматривать как упрощенный язык (пиджин) для совместной работы профессионалов этих научных областей<sup>4</sup>.

В связи с этим можно также утверждать, что, как в свое время набор эволюционно-биологических понятий послужил основой для разработки эволюционных вычислений в прикладной математике, так через пару десятилетий этот набор понятий (трансформировавшийся в этой новой области математики) становится языком общения специалистов по эвристическим методам в математике со специалистами-модельерами биологических эволюционных процессов.

---

<sup>4</sup> По сравнению с развитым и высокоматематизированным языком эволюционных вычислений, язык моделирования (дизайна) в вычислительной эволюционной биологии пока является, скорее, пиджином, т. е. упрощенным языком междисциплинарной коммуникации математиков и биологов-модельеров.

Таким образом, сегодня можно полагать, что в зоне этого (обратного) трансфера формируется новая междисциплинарная область науки, иногда определяемая термином «вычислительная эволюционная биология» (Computational evolutionary biology) [Foster, 2001]. Статус и границы этой области не являются четко очерченными. Она выступает как часть эволюционных вычислений, направленная на область эволюционной биологии, в основном на применение генетических алгоритмов в ДНК-исследованиях филогенеза, генетики популяций, в эволюционном моделировании биологических систем и объектов. Часто она также сближается с областью вычислительных геномных исследований и исследованиями эволюции биомолекул.

И характер трансфера (обратного трансфера) знаний в эту область, и сами свойства возникающей в ней междисциплинарности представляют значительный интерес, поскольку могут расширить наши представления и о трансфере, и о междисциплинарности в современной науке.

Ниже мы предполагаем рассмотреть цикл трансфера знаний из эволюционной биологии в эволюционные вычисления и обратно, опираясь на идеи теории концептуальных метафор с использованием методики параллельного сопоставления смысловых значений (параллельного вокабуляра), а также на идеи смысловых редуций (упрощений) и «насыщений» в ходе междисциплинарного трансфера знаний в науках.

### 3. Параллельный вокабуляр

Методика параллельного вокабуляра (словаря смысловых значений терминов) в исследовании междисциплинарного трансфера, как уже отмечалось выше, основывается на сопоставлении и анализе смысловых значений ряда идентичных научных терминов в разных научных областях. Предполагается, что идентичность терминов свидетельствует о трансфере знаний между этими областями, а различия смысловых значений — о модификациях смыслов в результате трансфера. В нашем случае, учитывая роль концептуальных метафор в трансфере знаний, мы предполагаем также рассматривать этот трансфер и соответствующий ему вокабуляр сквозь призму переносов смыслов из домена-источника к домену-цели. Еще одна особенность нашей методики параллельного вокабуляра состоит в том, что мы пытаемся рассмотреть с ее помощью цикл трансфера (т. е. прямого и обратного трансфера). И в связи с этим включаем в него также графу смысловых значений, образованных обратным трансфером. Ниже представлена таблица этого параллельного вокабуляра (словаря).

Сам подбор терминов вокабуляра (в первом столбце) указывает на исходный концептуальный домен трансфера — эволюционную биологию (домен-источник). Их современные смысловые значения в этой научной области представлены во втором столбце. И сама терминология, и ее смысловые значения наглядно демонстрируют присутствие в современной эволюционной биологии эволюционного синтеза, прочно связавшего эволюцию организмов с генетическими процессами. В некоторых из определений также хорошо видны «следы» контакта эволюционного синтеза с математикой. В них, например, часто встречаются термины «единицы», «последовательности», «совокупности», «наборы», которым сравнительно легко можно придать математический смысл.

Табл. 1. Параллельный вокабуляр терминов между эволюционной биологией, эволюционными вычислениями и вычислительной эволюционной биологией

Общий термин	Значение в эволюционной биологии (домен-источник)	Значение в эволюционных вычислениях (домен-цель)	Значение в вычислительной эволюционной биологии (домен-бленд)
«Эволюция»	Необратимое историческое развитие живой природы, сопровождающееся изменением генетического состава популяций, формированием адаптации, образованием и вымиранием видов, преобразованием биогеоценозов и биосферы в целом	Реализация случайного процесса в пространстве популяций, описанного эволюционным алгоритмом (ЭА) <sup>5</sup> . В некоторых контекстах под эволюцией может пониматься не только последовательность популяций, построенная ЭА, но также и последовательность всех действий в процессе выполнения такого алгоритма	Значение в основном соответствует таковому в эволюционных вычислениях. Специфика проявляется в разделах, которые нацелены на эволюцию макромолекул, генно-регуляторных сетей и клеточных регуляторных сетей, и здесь значения сближаются с таковыми для биологической эволюции на молекулярном уровне
«Ген»	Материальный носитель наследственности, единица наследственной информации, способная к воспроизведению и расположенная в определенном локусе хромосомы. Обеспечивает преемственность в поколениях того или иного признака или свойства организма. Ген представляет собой участок ДНК, задающий последовательность определенного полипептида либо функциональной РНК	Синоним термина «компонента», если генотип рассматривается как вектор. Если же генотип рассматривается как строка, то ген — элемент, символ в заданной позиции этой строки. Как правило, принимает конечное множество значений (например, 0 или 1), хотя может быть и вещественным числом	Последовательность оснований, далеко не всегда линейная и непрерывная, составляющая структурные и функциональные компоненты гена. Например, цис-регуляторные элементы, промотер, экзоны, интроны. Функционально образуют ансамбль, обеспечивающий регулируемый синтез полипептидов (или РНК) данного гена в надлежащих местах организма и в надлежащее время <sup>6</sup>

<sup>5</sup> В общем виде в эволюционных вычислениях эволюционный алгоритм означает (эвристический) способ решения задач оптимизации и моделирования, в основу которого положены биологические принципы естественного отбора и изменчивости [Букатова, 1972]. Работа эволюционного алгоритма предполагает вычисление последовательности «популяций» пробных решений (особей) с использованием следующих основных рандомизированных операторов: построение начальной популяции, селекция родительских особей, вариация (например, мутация и рекомбинация) и пополнение популяции новыми особями [Cotta, Alba, 2004].

<sup>6</sup> Одно из наиболее радикально отличающихся по смыслу от понимания в эволюционной биологии.

Общий термин	Значение в эволюционной биологии (домен-источник)	Значение в эволюционных вычислениях (домен-цель)	Значение в вычислительной эволюционной биологии (домен-бленд)
«Генотип»	Совокупность всех наследственных задатков особи, наследственная основа организма, составленная совокупностью генов	Вектор или строка (последовательность) символов некоторого алфавита, как правило, алфавита 0, 1	Совокупность всех генов организма, представленная в каждом ядре клетки, позволяющая определять регуляторные связи между генами (генные регуляторные сети)
«Фенотип»	Совокупность всех внутренних и внешних признаков и свойств индивида, сформировавшихся на базе генотипа в процессе индивидуального развития	Элемент пространства решений рассматриваемой прикладной задачи, получаемый после декодирования генотипа	В противоположность общебиологическому значению, может рассматриваться в узком конкретном значении. Например, фенотип молекулы РНК, кодируемой данным геном
«Аллель»	Одна из возможных форм одного и того же гена. Аллели расположены в одинаковых участках (локусах) гомологичных (парных) хромосом; определяют варианты развития одного и того же признака, контролируемого данным геном	Значение гена	В целом структурно и функционально сходные наборы генных элементов, но различающиеся в некоторых деталях последовательностей оснований (иногда различаются лишь одной точечной мутацией, приводящей к радикальным различиям функций аллелей) <sup>7</sup>
«Хромосома»	Структурные элементы ядра клетки, содержащие ДНК, в которой заключена наследственная информация организма. В хромосоме расположена основная часть генов организма	Синоним термина «генотип». Используется редко	Линейная последовательность структурных и регуляторных элементов генов и других компонентов генома (например, псевдогенов, повторов, вирусных последовательностей, мобильных элементов, и проч.) Все элементы состоят из последовательностей нуклеотидов (оснований) <sup>8</sup>

<sup>7</sup> Здесь важно, что молекулярные биологи объяснили в молекулярных деталях понятия аллелей из классической генетики.

<sup>8</sup> Одно из наиболее радикально отличающихся по смыслу от понимания в эволюционной биологии.

Общий термин	Значение в эволюционной биологии (домен-источник)	Значение в эволюционных вычислениях (домен-цель)	Значение в вычислительной эволюционной биологии (домен-бленд)
«Точечная мутация»	Точечная мутация — тип мутации в нуклеиновой кислоте, для которого характерна замена одного азотистого основания другим	Случайное изменение одного из генов генотипа	Соответствует общебиологическому значению
«Рекомбинация»	Перераспределение генетической информации путем физического обмена участками хромосом. Появление новых сочетаний генов, ведущих к новым сочетаниям признаков у потомства. Наибольшего своего развития процессы рекомбинации достигают у диплоидных организмов при половом размножении	Построение генотипа потомка на основе двух заданных родительских генотипов. В результате рекомбинации в каждом гене потомка его аллель выбирается из аллелей генов, занимающих те же места в генотипах родителей, что и рассматриваемый ген. Синоним термина «кроссинговер»	Значение типично соответствует таковому в эволюционных вычислениях. Но в задачах исследования диплоидности и роли полового размножения определение приближается к таковому в биологии
«Половое размножение»	Процесс, заключающийся в соединении половых клеток двух родителей. Половые клетки (гаплоидные клетки) содержат только половину числа хромосом родительских клеток (диплоидных клеток). В результате слияния пары половых клеток восстанавливается полный (диплоидный) набор хромосом	Специального термина нет. Аналог п. р. в эволюционных вычислениях используется редко, он имеется в так называемых диплоидных генетических алгоритмах (diploid genetic algorithms) <sup>9</sup> . Можно сказать, что аналог п. р. — способ построения потомков в диплоидных генетических алгоритмах	В основном соответствует общебиологическому значению. Используется, когда анализируются и моделируются процессы с диплоидным генотипом и половым процессом. Например, при использовании диплоидных генетических алгоритмов

<sup>9</sup> См.: [Shengxiang Yang, 2006].



Общий термин	Значение в эволюционной биологии (домен-источник)	Значение в эволюционных вычислениях (домен-цель)	Значение в вычислительной эволюционной биологии (домен-бленд)
«Отбор»	В практической генетике или селекции — процедура исключения организмов с нежелательным генотипом из группы организмов с желательным генотипом, например при селекции растений и животных, ведет к созданию новых (строго определенных по своим признакам) линий. В биологическом определении фактически имеется в виду как естественный (в живой природе), так и искусственный (в селекции) отбор <sup>10</sup>	Оператор селекции, его действие. Как правило, такие операторы дают особи тем большую вероятность отбора, чем выше значение функции приспособленности на этой особи. Наиболее известные операторы селекции (пропорциональная, турнирная, $(\mu, \lambda)$ -селекция) могут рассматриваться как упрощенные модели естественного отбора в определенных условиях, а $(\mu, \lambda)$ -селекция — и как модель искусственного отбора	Ряд методов селекции, не имеющих явной аналогии в эволюционной биологии, но введенных и исследованных в эволюционных вычислениях, может быть с успехом применен в этой области
«Приспособленность/адаптация»	Совокупность морфофизиологических, поведенческих, популяционных и др. особенностей биологического вида, обеспечивающая возможность специфического образа жизни особей в определенных условиях внешней среды. Адаптацией называется и сам процесс выработки приспособлений организмов к условиям их существования, а также те признаки организмов, благодаря которым они могут выживать в борьбе за существование. В популяционной генетике приспособленность — это способность к размножению особей с определенным генотипом	Синоним целевой функции задачи оптимизации или ее композиции с некоторой возрастающей функцией. Аналог популяционно-биологического понятия «приспособленность», т. е. среднее число потомков в следующем поколении от заданной особи текущего поколения в эволюционных вычислениях принято называть интенсивностью воспроизведения (reproduction rate)	Синоним целевой функции, имеющей различные значения в разных контекстах. Выражает «качество» последовательности нуклеотидов в контексте процедуры SELEX <sup>11</sup> или в направленной эволюции макромолекул

<sup>10</sup> По сути, в эволюционных вычислениях смысловое значение отбора соответствует искусственному отбору. Искусственный отбор имеет место и в биотехнологиях, и в синтетической биологии.

<sup>11</sup> См., например: [Zhang, Simon, 2003].

Общий термин	Значение в эволюционной биологии (домен-источник)	Значение в эволюционных вычислениях (домен-цель)	Значение в вычислительной эволюционной биологии (домен-бленд)
«Популяция»	Совокупность особей одного вида, обладающих общим генофондом и занимающих определенную территорию. Особи популяции свободно скрещиваются между собой	Набор генотипов; множество из генотипов; вектор с компонентами из пространства генотипов. В некоторых ЭА популяция не может содержать особей с идентичными генотипами, в этом случае популяция — подмножество множества всех генотипов	В общем соответствует значению в эволюционных вычислениях. Обеспечивает более компактное понимание популяции
«Покоеление»	Группа особей в популяции, состоящих в одинаковой степени родства по отношению к общим предкам, т. е. представляющих собой непосредственное потомство особей предыдущего поколения	Покоеление — популяция, возникающая на какой-то итерации эволюционного алгоритма	Больше соответствует значению в области эволюционных вычислений. В задачах, нацеленных на исследование роли поколений, может приближаться к таковому в ряде разделов биологии
«Диплоидный и гаплоидный геномы»	Организмы, размножающиеся половым путем, содержат в клетках двойной (диплоидный) набор генов. Половые клетки содержат половинный, гаплоидный набор генов. В эволюции типично появление полиплоидных организмов	Особи большинства эволюционных алгоритмов имеют не двойной хромосомный набор (диплоидный), а одинарный (гаплоидный). Особи ЭА сходны с бактериями или такими многоклеточными организмами, как мхи-гаметофиты или некоторые виды водорослей, которые имеют одинарный набор хромосом в течение длительного этапа жизни <sup>12</sup>	Ближе к значению в эволюционных вычислениях. Особи типично имеют одинарный набор хромосом. Двойной набор хромосом релевантен в задачах, исследующих важность диплоидного набора для эволюции

<sup>12</sup> См., например: [Cavill, Smith, Terrell, 2005].

В следующем (третьем) столбце представлены смысловые значения общих терминов в целевом концептуальном домене трансфера — эволюционных вычислениях. Смысловых сходств с эволюционно-биологическими и генетическими (в классической генетике) значениями здесь мало, что свидетельствует о заметной редукции их биологических смыслов при трансфере.

Так, сильнейшей редукции и/или трансформации при трансфере в прикладную математику подверглись, например, понятия хромосомы, аллеля, рекомбинации, полового размножения, отбора. При этом геном как совокупность генов (понятие редко используется в эволюционных вычислениях) существенно редуцирован и формализован (преимущественно для теории и методологии тех задач генетических алгоритмов, на которых область и ее теории формировались). Наглядным примером является понятие аллели гена. В классическом случае бинарных стрингов как хромосом трансфер отождествляет размерность двоичного кода с бинарной аллельностью генов [Holland, 1975].

В то же время важные смысловые трансферы все же обнаруживаются. Их в той или иной мере можно проследить в большинстве приведенных определений.

Например, понятия рекомбинации и отбора, пусть и в редуцированной форме, охватывают и формализуют существенно более широкие спектры вариантов, чем в эволюционной биологии. При этом некоторые формы рекомбинации, неочевидные с биологических позиций (как, например, оптимальная рекомбинация), оказываются весьма эффективными для ускорения эволюционного поиска.

В целом при анализе смысловых значений терминов можно обнаружить, что переносимые смыслы соответствуют общей идее теории концептуальных метафор о переносе смыслов из более конкретных концептуальных доменов-источников в более абстрактные домены-цели. В значительной своей части смыслы терминов эволюционной биологии, в том числе и приведенных в таблице, для специалистов в области эволюционных вычислений метафоричны и неоперациональны в их концептуальном домене. Но какая-то их часть (редуцированная, абстрактно-схематическая) перенесена средствами концептуальной метафоры в новый домен (новую научную область) и находит там эвристическое применение.

Например, основатель генетического программирования Джон Коза [Kozs et al., 1999] неоднократно упоминал, что один из ключевых принципов этого подхода — дублирование с изменением элементов программ, представленных деревьями, — был вдохновлен идеями эволюционной биологии о дубликации генов и их последующей дивергенции из книги Сусуму Оно «Эволюция путем дубликации генов» [Ohno, 1970].

Здесь можно упомянуть и о базовой концептуальной метафоре, которая лежит у истоков этого трансфера и которая в той или иной мере помогает ему и сегодня. Как уже говорилось, она связана с идеей «естественных вычислений» в вычислительной математике и компьютерных науках и лежит в ее русле. На наш взгляд, это — концептуальная метафора «биологической эволюции как естественного/природного вычисления», задающая базовые ориентиры для трансфера знаний из эволюционной биологии в область эволюционных вычислений.

#### 4. Обратный трансфер

Теперь обратимся к последнему (четвертому) столбцу таблицы нашего параллельного вокабуляра/словаря (табл. 1). В нем представлены смысловые значения выбранных терминов в области вычислительной эволюционной биологии. В данном случае наша гипотеза состоит в том, что эта область или по крайней мере ее важные составные части, формируются под заметным влиянием трансфера знаний из области эволюционных вычислений. То есть речь в некотором роде может идти об обратном трансфере знаний из этой области в область биологических наук. Таблица смысловых значений нашего вокабуляра показывает, что в какой-то мере обратный трансфер действительно имеет место. Значения терминов из последнего столбца таблицы в целом ближе к смысловым значениям в эволюционной биологии, чем к их значениям в эволюционных вычислениях. В ряде случаев они даже фактически совпадают. Но по ряду ключевых терминов (например, «ген» и др.) смысловое расхождение с биологией радикальнее, чем с вычислением и программированием. Вероятно, здесь мы имеем дело с каким-то частичным обратным трансфером, когда часть знаний (смыслов) из концептуального домена-цели «возвращается», т. е. сближается со смыслами домена-источника, но не возвращается к ним полностью, а формирует свой отдельный домен.

Только с сохранением некоторой редукции биологических понятий, принятой в эволюционных вычислениях, возможно использование методов и подходов этой науки в вычислительной эволюционной биологии. Движение обратно к глубоким биологическим смыслам осуществляется постепенно, поэтапно и в конкретных направлениях биологии. Для полномасштабного восстановления исходно-биологической глубины потребуется еще немало времени и работ. К тому же и сами биологические смыслы терминов не остаются неизменными. За последние полвека многие понятия и биологии вообще, и эволюционной биологии (такие как ген, аллель, хромосома, мутации, кроссинговер и др.) существенно усложнились и детализировались, что составляет сегодня определенную проблему и в самих биологических науках [Инге-Вечтомов, 2015]. По смыслу они сейчас заметно отличаются от тех, что участвовали в трансфере в эволюционные вычисления ранее, и это тоже создает для трансфера определенные сложности.

С точки зрения классических теорий концептуальных метафор обратный трансфер знаний/смыслов трудно объяснить, поскольку основной направленностью таких метафор является перенос смыслов от более конкретных доменов к более абстрактным. Обратный же перенос уже не будет, строго говоря, метафорическим и осуществляется другими средствами. В то же время последующие разработки в области концептуальных метафор, о которых упоминалось выше, считают обратные переносы вполне допустимыми. В частности, обсуждается идея «гибридных концептуальных доменов», которые допускают переносы смыслов в разных направлениях. В них происходит «смешивание» как абстрактных, так и конкретных смысловых значений, и потому от этих доменов трансфер возможен по разным направлениям [Fauconnier, Turner, 2002; Turner, Fauconnier, 2000].

Вероятно, что в науке формирование таких «гибридных доменов» характерно при становлении определенных типов междисциплинарности. Для нашего случая междисциплинарного трансфера эта идея может быть объяснительно продуктивной. Можно предположить, что обратный трансфер смыслов из каких-то сег-

ментов эволюционных вычислений в какие-то части вычислительной биологии, отраженный в нашем вокабуляре, объясняется началом формирования в эволюционных вычислениях подобия некоторого гибридного смыслового домена, что и стимулирует обратный трансфер. Этот прообраз «гибридного домена» в вычислениях выступает своего рода триггером для запуска обратного трансфера смыслов в биологию, но смыслов уже измененных, гибридных и потому неспособных просто вернуться в «родной» домен. Поэтому в ходе трансфера формируется новый концептуальный домен с еще более выраженными свойствами гибридности и междисциплинарности.

На рисунке 1 представлена примерная схема прямого и обратного трансфера между эволюционной биологией и эволюционными вычислениями и образования в зоне обратного трансфера междисциплинарной области вычислительной эволюционной биологии.

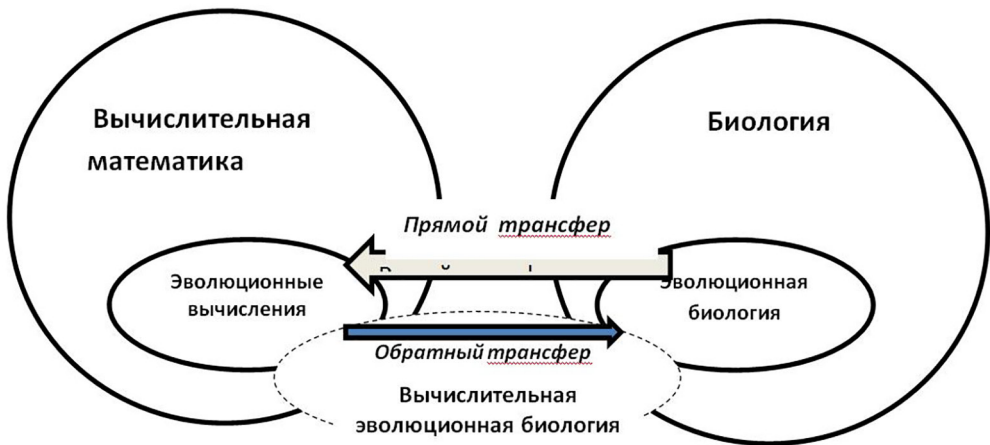


Рис. 1. Схема прямого и обратного трансфера

При обратном трансфере можно выделить, во-первых, трансфер методов и подходов: методы, вдохновленные основными положениями СТЭ, используются для разработки компьютерных моделей эволюции и решения модельных задач, которые можно решить только на компьютере. Во-вторых, можно наблюдать трансфер теоретических положений и теоретических разработок из теории эволюционных алгоритмов в теорию биологической эволюции (особенно — эволюции биологических макромолекул [Spirov, Holloway, 2012]). В частности, важно выделить раздел, где рассматривается роль нахождения и сохранения модулей (доменов в биологии, строительных блоков в эволюционных алгоритмах) как основы эффективности процессов эволюционного поиска [Voigt et al., 2002; Spirov, Holloway, 2012; Спиров, Еремеев, 2019].

К одному из важных событий обратного трансфера можно отнести и основополагающие работы В. Стеммера по методу «перетасовывания» ДНК (“DNA shuffling”) [Stemmer, 1994a, b]. Автор уже в 1994 г. отмечал, что именно в области генетических алгоритмов была продемонстрирована высокая эффективность кроссинговера (в сравнении с точечными мутациями) для решения сложных задач эволюционным поиском и эти результаты вдохновили его на разработку генно-инженерного метода “DNA shuffling”.

С помощью этих соображений можно пытаться объяснить ряд черт и особенностей новой развивающейся научной области вычислительной эволюционной биологии, в том числе ее отдельных сегментов и междисциплинарных взаимодействий.

Она тесно связана с областью эволюционных вычислений, математики и компьютерных наук, откуда получает постоянный приток основополагающих знаний. Например, в подходах к моделированию эволюции генных сетей средствами расширенных генетических алгоритмов и генетического программирования достигнут ряд существенных результатов, и эти исследования составляют активно развивающуюся область в современном компьютерном моделировании эволюции [Francois, Hakim, 2004; Francois, Siggia, 2010; Spirov, Holloway, 2012, 2013, 2016].

В то же время мы видим, что вычислительная эволюционная биология продолжает быть тесно связанной и с доменом знаний биологических наук, особенно с такими его разделами, как генетика, геномика, молекулярная биология, протеномика и др. Следует также отметить ее связь с блоком технологических дисциплин — таких как биотехнология и биоинженерия.

Например, К. Фойгт с коллегами в начале 2000-х гг. заимствовали идею теоремы схемы и гипотезы строительных блоков Джона Холланда для разработки и развития новых подходов в инженерии новых, химерных белков [Voigt et al., 2002]. К настоящему времени в области разработки и применения подходов из генетических алгоритмов и генетического программирования в современной вычислительной эволюционной биологии работает целый ряд коллективов из программистов, математиков и биологов-экспериментаторов.

В целом концептуальное пространство вычислительной эволюционной биологии выглядит значительно более междисциплинарным, чем у связанных с ней узлами определенной преемственности областей эволюционной биологии и эволюционных вычислений. Какова в трансфере знаний в таком пространстве может быть роль концептуальных метафор? Представляется, что она есть и будет очень значительной и разнообразной, а учитывая элементы гибридности в ее исходном концептуальном пространстве, и разнонаправленной. Имеется в виду перенос знаний как в прямом, так и в обратном трансфере.

Если продолжить мысль о базовой концептуальной метафоре трансфера знаний в этой области, то по сравнению с базовой метафорой трансфера, представленной выше, она будет несколько иной. Можно предложить, например, метафору исходя из того, что в этой области биологическая жизнь и ее эволюция в основном моделируются. В этом случае базовой концептуальной метафорой трансфера в вычислительной эволюционной биологии может быть «модель» («биологическая эволюция — это модель») или «совокупность/множество моделей». И в функции базовой концептуальной метафоры она, вероятно, могла бы способствовать междисциплинарному трансферу знаний в этой научной области.

## Заключение

Таким образом, примененный в данном исследовании подход, объединивший историко- и социолого-научное рассмотрение материала с аппаратом когнитивной лингвистики и семиотики (теории концептуальных метафор), позволяет конкретизировать и прояснить ряд вопросов, относящихся и к конкретному трансферу



знаний между эволюционной биологией и эволюционными вычислениями, и к междисциплинарным трансферам в целом. Так, с достаточным основанием можно утверждать, что эффективному междисциплинарному трансферу предшествует формирование некоторого коммуникативного пространства или зоны заинтересованного общения (поля трансфера) представителей разных дисциплин, в котором возможно разрешение проблемных ситуаций, связанных с междисциплинарной коммуникацией.

В статье было предложено краткое описание формирования такого поля трансфера между эволюционной биологией и эволюционными вычислениями с его характерными особенностями и чертами. Общение в этом поле является заинтересованным, но проблемным и достигается в основном средствами метафорических переносов отдельных частей смысловых значений (знаний) из эволюционной биологии (более познанного домена-источника) в эволюционные вычисления (домен-цель). Сам этот перенос, исследованный с помощью методики параллельного словаря, сопоставляющей смысловые значения основных общих терминов в соответствующих доменах, показывает характерные трансформации биологических смыслов в плане их редукции к абстрактным математическим смысловым значениям. Тем не менее он позволяет достигать эвристического эффекта в определенных областях вычислительной математики (генетические и эволюционные алгоритмы, задачи оптимизации и др.), что привело к институциональному закреплению и развитию эволюционных вычислений в качестве субдисциплинарной области математических и компьютерных наук.

Среди результатов исследования также следует отметить обнаружение в области эволюционных вычислений гибридного домена, который был определен как вычислительная эволюционная биология (*Computational evolutionary biology*). Ряд содержательных характеристик смысловых значений (знаний) этого домена был также исследован с помощью методики параллельного вокабуляра. Это исследование показывает в них признаки «блендирования» (смешивания) биологических и математических смыслов, выступающих результатами уже обратного трансфера знаний из эволюционных вычислений в эволюционную биологию. При этом значительное число блендированных смысловых значений (знаний) в этой области указывает на ее междисциплинарный характер. Имеется в виду несводимость ее ни к области только биологических или только (прикладных) математических наук, а ее локация именно в междисциплинарном пространстве.

В целом применение концептуального аппарата когнитивной лингвистики к исследованию средств междисциплинарного трансфера знаний требует, разумеется, дальнейшего изучения, проработки и систематизации. И метафорические переносы, и смысловые значения и их виды, и сами концептуальные домены и виды порождаемых эвристик имеют в науке множество особенностей, проблемных аспектов и нуждаются в дальнейшем исследовании. В дальнейшей проработке нуждается и методика параллельного словаря смысловых знаний, предложенная выше. Тем не менее их применение в исследовании междисциплинарного трансфера знаний между эволюционной биологией и эволюционными вычислениями позволило получить достаточно интересные результаты, включающие в том числе аналитическую конструкцию.

И в заключение еще одно соображение о некоторых институциональных аспектах формирования области междисциплинарного трансфера между эволюционными

вычислениями и эволюционной биологией, и даже шире — между вычислительной математикой и биологией в целом. Мы предлагаем скорректировать представление о том, что трансфер знаний здесь может обеспечиваться только взаимными интересами, систематическими контактами и совместными проектами зрелых ученых и специалистов из областей эволюционной биологии и вычислительной математики, и дополнить его еще одним аспектом междисциплинарного взаимодействия, касающимся сферы подготовки молодых специалистов. Согласно ему, выпускники небиологических (математических и компьютерных) кафедр и факультетов приходят работать (обычно еще студентами) в лаборатории и группы, занимающиеся вычислительной биологической проблематикой. Их знания в биологии, как правило, крайне ограничены, но они заинтересованы применить свои знания в математике и компьютерных науках для решения биологических проблем. Со временем они приобретают требуемый уровень знаний по биологии конкретно изучаемых ими проблем, оставаясь при этом на базовом уровне квалифицированными специалистами в области математики и компьютерных наук. В дальнейшем в такие уже созданные группы приходят учиться работать и новые студенты с небиологических кафедр. То есть мы можем говорить, что вычислительная эволюционная биология в немалой степени развивается посредством «экспансии» небиологов в биологию. В качестве конкретной практической рекомендации можно было бы предложить стимулировать такую «экспансию» студентов-небиологов в биологические лаборатории посредством программы грантовой поддержки для студентов, намеревающихся начать работу в биологических лабораториях, и дополнительной поддержки биологических лабораторий на цели привлечения к работе таких студентов.

## Литература

- Авдонин В.С.* Об условиях и средствах трансфера знаний в междисциплинарных исследованиях // Социологический журнал. 2019. Т. 25. № 3. С. 99–116.
- Антоновский А.Ю.* Понимание и взаимопонимание в научной коммуникации // Вопросы философии. 2015. № 2. С. 45–69.
- Будаев Э.В.* Становление когнитивной теории метафоры // Лингвокультурология. Вып. 1. Екатеринбург, 2007. С. 16–32.
- Букатова И.Л.* Эволюционное моделирование и его приложения. М.: Наука, 1979. 231 с.
- Галисон П.* Зона обмена: координация убеждений и действий // Вопросы истории естествознания и техники. 2004. № 1. С. 64–91.
- Георгиевский А.Б.* К истории закона Харди — Вейнберга // Историко-биологические исследования. 2011. Т. 3. № 1. С. 63–75.
- Гусев С.С.* Наука и метафора. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 152 с.
- Гутнер Г.Б.* Смысл как основание коммуникативных практик // Эпистемология и философия науки. 2008. № 4. С. 44–52.
- Демьянков В.З.* Когнитивная лингвистика как разновидность интерпретирующего подхода // Вопросы языкознания. 1994. № 4. С. 17–33.
- Дорожкин А.М.* Проблемы построения и типологии зон обмена // Эпистемология и философия науки. 2017. № 4. С. 20–29.
- Ермолаев А.И.* Роль Сьюэла Райта в создании популяционной генетики // Историко-биологические исследования. 2012. Т. 4. № 2. С. 61–95.

Золян С.Т. Неопределенность и множественность перевода как проекция семантики текста // МЕТОД: Московский ежегодник трудов из обществоведческих дисциплин: Сб. науч. тр. М.: ИНИОН РАН, 2017. Вып. 7. С. 159–170.

Ильин М.В. Образ: исходные когнитивные схемы и этимоны // МЕТОД: Московский ежегодник трудов из обществоведческих дисциплин: Сб. науч. тр. М.: ИНИОН РАН, 2018. Вып. 8. С. 12–24.

Инге-Вечтомов С.Г. Ретроспектива генетики. СПб.: Изд-во Н-Л, 2015. 336 с.

Касавин И.Т. Зоны обмена как предмет социальной философии науки // Философия и эпистемология науки. 2017. № 1. С. 8–17.

Касавин И.Т. Социальная философия науки и коллективная эпистемология. М.: Кнорус, 2016. 264 с.

Колесов В.В. Суждения о концепте Образ // МЕТОД: Московский ежегодник трудов из обществоведческих дисциплин: Сб. науч. тр. М.: ИНИОН РАН, 2018. Вып. 8. С. 25–46.

Колчинский Э.И. Единство эволюционной теории в разделенном мире XX века. СПб.: Нестор-История, 2015. 824 с.

Коммуникативная рациональность. Эпистемологический подход / Отв. ред. И.Т. Касавин, В.Н. Порус. М.: ИФ РАН, 2009. 2015 с.

Лакофф Дж., Джонсон М. Метафоры, которыми мы живем: Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. А.Н. Баранова. М.: Едиториал УРСС, 2004. 256 с.

Лингвистика и семиотика культурных трансферов. М.: Культурная революция, 2016. 500 с.

Междисциплинарность в науках и философии / Отв. ред. И.Т. Касавин. М.: ИФРАН, 2010. 205 с.

Моррис Ч.У. Основания теории знаков // Семиотика: Антология / Сост. Ю.С. Степанов. М.: Академический проект, 2001. С. 45–97.

Петров В.В. Научные метафоры: природа и механизм функционирования // Философские основания научной теории. Новосибирск: НГУ, 1985. С. 176–220.

Пирс Ч.С. Принципы философии. Т. II. СПб.: Санкт-Петербургское философское общество, 2001. 320 с.

Седов А.Е. Метафоры в генетике // Вестник Российской академии наук. 2000. Т. 70. № 6. С. 526–534.

Семиотика: Антология / Сост. Ю.С. Степанов. М.: Академический проект, 2001. 702 с.

Соссюр Ф. де. Курс общей лингвистики / Пер. с фр. М.: Едиториал УРСС, 2004. 256 с.

Спиров А.В., Еремеев А.В. Модульность в биологической эволюции и эволюционных вычислениях // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 6. С. 523–539.

Степин В.С. Философия и методология науки. Избранное. М.: Академический проект, 2015. 716 с.

Степанов Ю.С. Семиотика. М.: Наука, 1971. 168 с.

Тагард П. Междисциплинарность: торговые зоны в когнитивной науке // Логос. 2014. № 1 (97). С. 35–60.

Теория метафоры: Сб. / Пер. с англ., фр., нем., исп., польск.; Вступ. ст. и сост. Н.Д. Арутюновой. М.: Прогресс, 1990. 512 с.

Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. М.: Мир, 1969. 230 с.

Фомин И.В. Семиотика или меметика? К вопросу о способах интеграции социально-гуманитарного знания // Полис. 2015. № 2. С. 72–84.

Фреге Г. Избранные работы / Сост. В.В. Анашвили, А.Л. Никифоров. М.: Дом интеллектуальной книги, 1997. 159 с.

An Introduction to Interdisciplinary Research: Theory and Practice / Ed. S. Menken, M. Keestra. Amsterdam: Amsterdam Univ. Press B. V., 2016. 130 p.

*Backofen R., Clote P.* Evolution as a Computational Engine // Proceedings of the Annual Conference of the European Association for Computer Science Logic, Springer Lecture Notes in Computer Science. Vol. 1414. Berlin: Springer-Verlag, 1997. P. 35–55.

*Brabazon A., O'Neill M.* Natural Computing Algorithms. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 554 p.

*Brier S.* Cybersemiotics: Suggestion for a Transdisciplinary Framework Encompassing Natural Life, and Social Sciences as Well as Phenomenology and Humanities // International Journal of Body, Mind, and Culture. 2014. Iss. 1 (1). P. 3–53.

*Brown T.* Making Truth. The Roles of Metaphor in Science. Urbana: University of Illinois Press, 2003. 232 p.

*Cavill R., Smith S., Terrell A.* The Performance of Polyploid Evolutionary Algorithms is Improved Both by Having Many Chromosomes and by Having Many Copies of Each Chromosome on Symbolic Regression Problems // IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2005. Vol. 1. P. 935–941. DOI: 10.1109/CEC.2005.1554783.

*Cotta C., Alba E.* Evolutionary Algorithms // Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2005. P. 3–20.

*De Jong K. A.* Evolutionary Computation — A Unified Approach. Cambridge, Mass.: MIT press, 2006. 256 p.

*Deacon T. W.* Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter. N. Y.: W. W. Norton, 2011. 602 p.

*Debatin B.* Die Rationalität der Metapher. Berlin; New York: de Gruyter, 1995. 381 S.

*Eremeev A. V.* On Complexity of Optimal Recombination for Binary Representations of Solutions // Evolutionary Computation. 2008. Vol. 16. № 1. P. 127–147.

*Evans V., Green M.* Cognitive Linguistics. An Introduction. Edinburgh: University Press, 2006. 830 p.

*Fauconnier G., Turner M.* The Way We Think: Conceptual Blending and the Mind's Hidden Complexities. New York: Basic Books. 2002. 440 p.

*Foster J.* Evolutionary Computation // Nature Reviews Genetics. 2001. № 2 (6). P. 428–436.

*Francois P., Siggia E.D.* Predicting Embryonic Patterning Using Mutual Entropy Fitness and in Silico Evolution // Development. 2010. Vol. 137. № 14. P. 2385–2395.

*Francois P., Hakim V.* Design of Genetic Networks with Specified Functions by Evolution in Silico // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2004. Vol. 101. № 2. P. 580–585.

*Galison P.* Trading Zone. Coordinating Action and Belief // The Science Studies Reader / Ed. M. Biagioli. N. Y: Routledge, 1999. P. 137–160.

*Holland J.* Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. 183 p.

*Koza J.R., Bennett F.H., Andre D., Keane M.A.* Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1999. 1154 p.

*Metaphor and Thought / Ed. A. Ortony.* 2 ed. Cambridge NY: Cambridge University Press, 1993 (2002). 678 p.

*Ohno S.* Evolution by Gene Duplication. Berlin: Springer, 2014. 160 p. (1 ed.: 1970).

*Provine W.B.* The Role of Mathematical Population Geneticists in the Evolutionary Synthesis of the 1930s and 1940s // Studies in the History of Biology. 1978. Vol. 2. P. 167–192.

*Repko A.F., Szostak R.* Interdisciplinary Research: Process and Theory. Los Angeles: SAGE, 2017. 425 p.

*Sismondo S.* An Introduction to Science and Technology Studies. Malden, MA.: Willey Blackwell, 2010. 244 p.

*Shengxiang Yang.* On the Design of Diploid Genetic Algorithms for Problem Optimization in Dynamic Environments: 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Vancouver, BC, 2006. P. 1362–1369. DOI: 10.1109/CEC.2006.168846.

*Smocovitis V.* Unifying Biology. The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology. Princeton: Princeton univ. press, 1996. 230 p.

*Spirov A., Holloway D.* Using Evolutionary Computations to Understand the Design and Evolution of Gene and Cell Regulatory Networks // *Methods*. 2013. Vol. 62. № 1. P. 39–55.

*Spirov A., Holloway D.* New Approaches to Designing Genes by Evolution in the Computer // *Real-World Applications of Genetic Algorithms* / Ed. O. Roeva. Intech Open, 2012. P. 235–260. DOI: 10.5772/2674.

*Spirov A., Holloway D.* Using Evolutionary Algorithms to Study the Evolution of Gene Regulatory Networks Controlling Biological Development. *Evolutionary Computation in Gene Regulatory Network Research* / Eds. H. Iba, N. Noman. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2016. DOI: 10.1002/9781119079453.ch10.

*Spirov A., Holloway D.* Using Evolutionary Computations to Understand the Design and Evolution of Gene and Cell Regulatory Networks // *Methods*. 2013. Vol. 62. № 1. P. 39–55.

*Stemmer W.P. C.* DNA Shuffling by Random Fragmentation and Reassembly — in-Vitro Recombination for Molecular Evolution // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1994. № 91. P. 10747–10751.

*The Oxford Handbook of Cognitive Linguistics* / Ed. D. Geeraerts, H. Cuyckens. Oxford: Oxford Univ. Press, 2011. 1334 p.

*The Oxford Handbook of Interdisciplinarity* / Ed. R. Frodeman, J. Th. Klein, R. C. Dos Santos Pacheco. 2 ed. Oxford University Press, 2017. 652 p.

*Turner M., Fauconnier G.* Metaphor, Metonymy, and Binding // *Metaphor and Metonymy at the Crossroads: A Cognitive Perspective* / Ed. A. Barcelona. Berlin; New York: Mouton de Gruyter, 2000. P. 133–148.

*Voigt C.A., Martinez C., Wang Z.G., Mayo S.L., Arnold F.H.* Protein Building Blocks Preserved by Recombination // *Nature Structural & Molecular Biology*. 2002. № 9. P. 553–558.

*Zhang G., Simon A.E.* A Multifunctional Turnip Crinkle Virus Replication Enhancer Revealed by in Vivo Functional SELEX // *Journal of Molecular Biology*. 2003. № 326. Iss. 1. P. 35–48.

## **Interdisciplinary Transfer of Knowledge as Metaphorical Transfers: Evolutionary Biology, Evolutionary Computing, and Computational Evolutionary Biology as Areas of Interdisciplinary Transfers**

*VLADIMIR S. AVDONIN*

The Institute of Scientific Information on Social Sciences  
of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia  
e-mail: avdoninvla@mail.ru

*ALEXANDER V. SPIROV*

I.M. Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry  
of the Russian Academy of Sciences,  
St Petersburg, Russia  
e-mail: sspirov@yandex.ru

*ANTON V. EREMEEV*

Dostoevsky Omsk State University,  
Omsk, Russia  
e-mail: eremeev@ofim.oscsbras.ru

The article proposes a methodology for studying the transfer of knowledge in interdisciplinary research based on a combination of the methodology of historical-scientific, sociocultural studies of scientific communication with the approach of semiotics and cognitive linguistics to the study of means of transferring knowledge in science. The metaphorical transfers of meanings between disciplinary contexts as conceptual domains are considered as such means. Using this methodology and the authors' technique of a parallel dictionary of semantic meanings, the authors study the transfer of knowledge between the actively developing scientific fields of evolutionary biology, evolutionary computing and computational evolutionary biology. A comparative analysis of the semantic meanings of a number of key terms of these scientific areas is carried out, the characteristic features of their semantic transformations (reductions) during transfer are determined, the idea of a transfer cycle between these areas, including direct and reverse transfers, is put forward and an analytical scheme of these transfers is proposed as well. The research characterizes computational evolutionary biology as an interdisciplinary scientific field that has arisen and develops in many aspects as a result of the reverse transfer of knowledge.

**Keywords:** interdisciplinarity, knowledge transfer, metaphorical transfers in science, evolutionary biology, evolutionary computing, computational evolutionary biology.

## Acknowledgment

The research was carried out with support from the Russian Science Foundation (RSF) according to the research grant No. 17-18-01536 realized in the Institute of Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences.

## References

- Antonovski, A.Yu. (2015). Ponimaniye i vzaimoponimaniye v nauchnoy kommunikatsii [The Understanding and consensus in the scientific communication]. *Voprosy filosofii*, no. 2, 45–69 (in Russian).
- Arutiunova, N.D. (ed.) (1990). Teoriya metafory [Theory of metaphor]. Moskva: Progress (in Russian).
- Avdonin, V.S. (2019). Ob usloviyakh i sredstvakh transfera znaniy v mezhdistsiplinarnykh issledovaniyakh [On the conditions and means of knowledge transfer in interdisciplinary research]. *Sotsiologicheskii zhurnal*, no. 3, 99–116 (in Russian).
- Backofen, R., Clote, P. (1997). Evolution as a Computational Engine. In *Proceedings of the Annual Conference of the European Association for Computer Science Logic*, Springer Lecture Notes in Computer Science (pp. 35–55), vol. 1414. Berlin: Springer-Verlag.
- Brabazon, A., O'Neill, M. (2015). *Natural Computing Algorithms*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brier, S. (2014). Cybersemiotics: Suggestion for a Transdisciplinary Framework Encompassing Natural Life, and Social Sciences as Well as Phenomenology and Humanities. *International Journal of Body, Mind, and Culture*, 1 (1) 3–53.



- Brown, T. (2003). *Making Truth. The Roles of Metaphor in Science*. Urbana: University of Illinois Press.
- Budaev, E.V. (2007). Stanovleniye kognitivnoy teorii metafory [The Formation of the cognitive theory of metaphor]. *Lingvokul'turologiya*, vyp. 1, 16–32 (in Russian).
- Bukatova, I.L. (1979). *Evolutionnoye modelirovaniye i ego prilozheniya* [Evolutionary modeling and its applications]. Moskva: Nauka (in Russian).
- Cavill, R., Smith, S., Terrell, A. (2005). The Performance of Polyploid Evolutionary Algorithms is Improved Both by Having Many Chromosomes and by Having Many Copies of Each Chromosome on Symbolic Regression Problems. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 935–941), vol. 1. DOI: 10.1109/CEC.2005.1554783.
- Cotta, C., Alba, E. (2005). Evolutionary Algorithms. In *Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications* (pp. 3–20). Boca Raton: CRC Press.
- De Jong, K.A. (2006). *Evolutionary Computation — A Unified Approach*. Cambridge, Mass.: MIT press.
- Deacon, T.W. (2011). *Incomplete Nature: How Mind Emerged from Matter*. N. Y.: W. W. Norton.
- Debatin, B. (1995). *Die Rationalitat der Metapher*. Berlin; New York: de Gruyter (in German).
- Dem'yankov, V.Z. (1994). Kognitivnaya lingvistika kak raznovidnost' interpretiruyushchego podkhoda [Cognitive linguistics as a kind of interpretive approach]. *Voprosy yazykoznaneya*, no 4, 17–33 (in Russian).
- Dorozhkin, A.M. (2017). Problemy postroeniya i tipologii zon obmena [Design and typology problems of trading zones]. *Epistemologiya i filosofiya nauki*, no 4, 20–29 (in Russian).
- Eremeev, A.V. (2008). On Complexity of Optimal Recombination for Binary Representations of Solutions. *Evolutionary Computation*, 16 (1), 127–147.
- Ermolaev, A.I. (2012). Rol' S'yuela Rayta v sozdanii populyatsionnoy genetiki [Sewall Wright's role in the creation of population genetic]. *Istoriko-biologicheskiye issledovaniya*, 4 (2), 61–95 (in Russian).
- Evans, V., Green M. (2006). *Cognitive Linguistics. An Introduction*. Edinburgh: University Press.
- Fauconnier, G., Turner, M. (2002). *The Way We Think: Conceptual Blending and the Mind's Hidden Complexities*. New York: Basic Books.
- Fogel', L., Owens, A., Uolsh, M. (1969). *Iskusstvennyy intellekt i evolyutsionnoye modelirovaniye* [Artificial intelligence and evolutionary modeling]. Moskva: Mir (in Russian).
- Fomin, I.V. (2015). Semiotika ili memetika? K voprosu o sposobakh integratsii sotsial'no-gumanitarnogo znaniya [Integrating the Humanities: Semiotics or Memetics?]. *Polis*, no. 3, 72–84 (in Russian).
- Foster, J. (2001). Evolutionary Computation. *Nature Reviews Genetics*, no. 2 (6), 428–436.
- Francois, P., Hakim, V. (2004). Design of Genetic Networks with Specified Functions by Evolution in Silico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101 (2), 580–585.
- Francois, P., Siggia, E.D. (2010). Predicting Embryonic Patterning Using Mutual Entropy Fitness and in Silico Evolution. *Development*, 137 (140), 2385–2395.
- Frege, G. (1997). *Izbrannye raboty* [Selected works]. Moskva: Dom intellektual'noy knigi (in Russian).
- Frodeman, R., Klein, J. Th., Dos Santos Pacheco, R. C. (Eds) (2017). *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*, 2 ed. Oxford University Press.
- Galison, P. (1999). Trading Zone. Coordinating Action and Belief. In M. Biagioli (Ed.), *The Science Studies Reader* (pp. 137–160). N. Y: Routledge.
- Galison, P. (2004). Zona obmena: koordinatsiya ubezhdeniy i deystviy (Trading zone: coordination of beliefs and actions). *Voprosy istorii estestvoznaniya i tekhniki*, no. 1, 64–91 (in Russian).
- Geeraerts, D., Cuyckens, H. (Eds.) (2011). *The Oxford Handbook of Cognitive Linguistics*. Oxford: Oxford Univ. Press.
- Georgievskiy, A.B. (2011). K istorii zakona Khardi–Veynberga [On the history of the Hardy–Weinberg law]. *Istoriko-biologicheskiye issledovaniya*, 3 (1), 63–75 (in Russian).

Gusev, S.S. (1984). *Nauka i metafora* [Science and metaphor]. Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta (in Russian).

Gutner, G.B. (2008). Smysl kak osnovaniye kommunikativnykh praktik [Meaning as the basis of communication practices]. *Epistemologiya i filosofiya nauki*, no. 4, 44–52 (in Russian).

Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Ilyin, M.V. (2018). Obraz: iskhodnyye kognitivnyye skhemy i etimony [Image: emergent cognitive schemata and etymons]. *METOD: Moskovskiy yezhegodnik trudov iz obshchestvovedcheskikh distsiplin: Sb. nauch. tr.* Moskva: INION RAN, vyp. 8, 12–24 (in Russian).

Inge-Vechtomov, S.G. (2015). *Retrospektiva genetiki* [Retrospective of genetics]. S.-Peterburg: Izd-vo N-L (in Russian).

Kasavin, I.T. (ed.) (2010). *Mezhdistsiplinarnost' v naukakh i filosofii* [Interdisciplinarity in sciences and philosophy]. Moskva: IF RAN (in Russian).

Kasavin, I.T., Porus, V.N. (eds.) (2009). *Kommunikativnaya ratsional'nost'. Epistemologicheskii podkhod* [Communicative rationality. An epistemological approach]. Moskva: IF RAN (in Russian).

Kasavin, I.T. (2016). *Sotsial'naya filosofiya nauki i kollektivnaya epistemologiya* [Social philosophy of science and collective epistemology]. Moskva: Knorus (in Russian).

Kasavin, I.T. (2017). Zony obmena kak predmet sotsial'noy filosofii nauki [Trading zones as a subject of social philosophy of science]. *Filosofiya i epistemologiya nauki*, no. 1, 8–17 (in Russian).

Kolchinsky, E.I. (2015). *Edinstvo evoliutsionnoy teorii v razdelenom mire XX veka* [The unity of evolutionary theory in the 20<sup>th</sup> century divided world]. S.-Peterburg: Nestor-Istoriya (in Russian).

Kolesov, V.V. (2018). Suzhdeniya o kontsepte Obraz (Judgments about the concept Image). In *METOD: Moskovskiy yezhegodnik trudov iz obshchestvovedcheskikh distsiplin: Sb. nauch. tr.* (pp. 25–46). Moskva: INION RAN, vyp. 8 (in Russian).

Koza, J. R., Bennett, F. H., Andre, D., Keane, M.A. (1999). *Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann,

Lakoff, G., Johnson, M. (2004). *Metafory, kotorymi my zhivem* [Metaphors we live by]. Moskva: Editorial URSS (in Russian).

*Lingvistika i semiotika kul'turnykh transferov* [Linguistics and semiotics of cultural transfers] (2016). Moskva: Kul'turnaya revoliutsiya (in Russian).

Menken, S., Keestra, M. (eds.) (2016). *An Introduction to Interdisciplinary Research: Theory and Practice*. Amsterdam: Amsterdam University Press B. V.

Morris, Ch. (2001). Osnovaniya teorii znakov [Foundations of the theory of signs]. In Yh. S. Stepanov (Ed.), *Semiotika: Antologiya* (pp. 45–97). Moskva: Akademicheskii proyekt (in Russian).

Ohno, S. (2014). *Evolution by Gene Duplication*. Berlin: Springer.

Ortony, A. (Ed.) (1993 (2002)). *Metaphor and Thought*. 2 ed. Cambridge NY: Cambridge University Press.

Peirse, Ch.S. (2001). Printsipy filosofii [Principles of philosophy]. T. II. S.-Peterburg: Sankt-Peterburgskoye filosofskoye obshchestvo (in Russian).

Petrov, V.V. (1985). Nauchnye metafory: priroda i mekhanizm funktsionirovaniya [Scientific metaphors: nature and mechanism of functioning]. In *Filosofskiy osnovaniya nauchnoy teorii* (pp. 176–220). Novosibirsk: NGU (in Russian).

Provine, W.B. (1978). The Role of Mathematical Population Geneticists in the Evolutionary Synthesis of the 1930s and 1940s. *Studies in history of biology*, vol. 2, 167–192.

Repko, A.F., Szostak, R. (2017). *Interdisciplinary Research: Process and Theory*. Los Angeles: SAGE.

Saussure, F. de. (2004). *Kurs obshchey lingvistiki* [Course in general linguistics]. Moskva: Editorial URSS (in Russian).

Sedov, A.E. (2000). Metafory v genetike [Metaphors in genetics]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 70 (6), 526–534 (in Russian).

Shengxiang Yang. (2006). *On the Design of Diploid Genetic Algorithms for Problem Optimization in Dynamic Environments: 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. Vancouver, BC, pp. 1362–1369. DOI: 10.1109/CEC.2006.168846.

Sismondo, S. (2010). *An Introduction to Science and Technology Studies*. Malden, MA.: Wiley Blackwell.

Smocovitis, V. Unifying Biology (1996). *The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology*. Princeton: Princeton university press.

Spirov, A., Holloway, D. (2012). New Approaches to Designing Genes by Evolution in the Computer. In O. Roeva (Ed.), *Real-World Applications of Genetic Algorithms*. Intech Open (pp. 235–260). DOI: 10.5772/2674.

Spirov, A., Holloway, D. (2013). Using Evolutionary Computations to Understand the Design and Evolution of Gene and Cell Regulatory Networks. *Methods*, 62 (1), 39–55.

Spirov, A., Holloway, D. (2016). Using Evolutionary Algorithms to Study the Evolution of Gene Regulatory Networks Controlling Biological Development. In H. Iba, N. Noman (Eds.), *Evolutionary Computation in Gene Regulatory Network Research*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, DOI: 10.1002/9781119079453.ch10.

Spirov, A.V., Eremeev, A.V. (2019). Modul'nost' v biologicheskoy evolyutsii i evolyutsionnykh vychisleniyakh [Modularity in biological evolution and evolutionary computing]. *Uspekhi sovremennoy biologii*, 139 (6), 523–539 (in Russian).

Stemmer, W.P.C. (1994). DNA Shuffling by Random Fragmentation and Reassembly — in-Vitro Recombination for Molecular Evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, no. 91, 10747–10751.

Stepanov, Yu.S. (1971). *Semiotika* [Semiotics]. Moskva: Nauka (in Russian).

Stepanov, Yu.S. (Ed.) (2001). *Semiotika: Antologiya* [Semiotics: Anthology]. Moskva: Akademicheskii proyekt (in Russian).

Stepin, V.S. (2015). *Filosofiya i metodologiya nauki. Izbrannoe* [Philosophy and methodology of science. Selected works]. Moskva: Akademicheskii proyekt (in Russian).

Tagard, P. (2014). Mezhdistsiplinarnost': trgovye zony v kognitivnoy nauke (Being interdisciplinary: trading zones in cognitive science). *Logos*, no. 1 (97), 35–60 (in Russian).

Turner, M., Fauconnier, G. (2000). Metaphor, Metonymy, and Binding. In A. Barcelona (Ed.), *Metaphor and Metonymy at the Crossroads: A Cognitive Perspective* (pp. 133–148). Berlin; New York: Mouton de Gruyter.

Voigt, C.A., Martinez, C., Wang, Z.G., Mayo, S.L., Arnold, F.H. (2002). Protein Building Blocks Preserved by Recombination. *Nature Structural & Molecular Biology*, no. 9, 553–558.

Zhang, G., Simon, A.E. (2003). A Multifunctional Turnip Crinkle Virus Replication Enhancer Revealed by in Vivo Functional SELEX. *Journal of Molecular Biology*, 326 (1), 35–48.

Zolian, S.T. (2017). Neopredelennost' i mnozhestvennost' perevoda kak proektsiya semantiki teksta (The indeterminacy of translation as a projection of the dynamic semantics of text), In *METHOD: Moskovskiy yezhegodnik trudov iz obshchestvovedcheskikh distsiplin: Sb. nauch. tr.* Moskva: INION RAN, vyp. 7, 159–170 (in Russian).