

Михаил Волошин*

КОНТИНГЕНТНОСТЬ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ: PRO ET CONTRA**

Получено: 05.08.2022. Рецензировано: 23.08.2022. Принято: 02.11.2022.

Аннотация: В рамках исторической эпистемологии (Ж. Кангилем, М. Фуко, Л. Луазон) концептуальный аппарат научной дисциплины мыслится как исторически и культурно контингентный, то есть не predetermined — по крайней мере в основном — внутренней логикой развития науки. Почти четверть века назад, в 2000 г., была предпринята фундаментальная попытка доказать контингентность концепции генетической информации и существование эпистемического разрыва между ней и предшествующей биологической теорией (Л. Кей). Эта работа существенна не только для истории биологии, но и для методологии истории науки и для современной биологии, как было показано в недавнем исследовании И. А. Кузина. В данной статье подвергаются критике взгляды обоих авторов: показывается, что социокультурные (экстерналистские) концептуализации истории биологии содержат серьезные противоречия, с которыми может успешно справляться интернализм. Использование дискурса как эксплананса не способно объяснить ключевые сюжеты истории генетического кода: в нем оказываются спутанными дискурс, концепция и метафора информации; история расшифровки генетического кода фактически произвольно делится на две не связанные между собой фазы; проблематично объясняется переход от синтаксической теории информации к семантической (от метафоры шифра к метафоре кода). В то же время интерналистская позиция позволяет как сохранить представление о контингентности концепции информации (но в виде методологической, а не историко-культурной контингентности), так и логичным образом включить ее в общий контекст внутреннего развития предметной области генетики. Переоценка исследуемого исторического периода (1940–1960-е годы) влечет за собой переоценку современных дискуссий о роли информации в биологии и позволяет предложить новый взгляд на имеющиеся и утраченные альтернативы концепции информации.

Ключевые слова: генетическая информация, контингентность, историческая эпистемология, история биологии, философия биологии, интернализм, экстернализм, генетический код.

DOI: 10.17323/2587-8719-2023-1-317-339.

*Волошин Михаил Юрьевич, аспирант; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва), allrou95@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-6379-4771.

**© Волошин, М. Ю. © Философия. Журнал Высшей школы экономики.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Сохранение мирового культурно-исторического наследия».

ВВЕДЕНИЕ

Непосредственным поводом к написанию этой статьи послужил иностранный комментарий Ивана Александровича Кузина (Кузин, 2022) к работе историка наук о жизни Лили Кей (Кау, 2000), которая посвящена истории генетического кода и, шире, окружающего ее информационного дискурса в биологии. Вслед за И. А. Кузиным я полагаю, что эта книга должна быть вовлечена в актуальный дискурс вокруг теории генетической информации, генетического детерминизма, возможностей computer science и их влияния на смежные дисциплины. Однако в отличие от И. А. Кузина я хотел бы предложить скорее критический и альтернативный взгляд на тот фрагмент истории науки, который для Лили Кей становится центральным в ее исследовании. Иван Кузин делает из собственного разбора текста Кей и смежного историко-научного контекста выводы, касающиеся не только истории молекулярной биологии, но и принципов работы истории науки вообще и исторической эпистемологии (Ж. Кангилем, М. Фуко, Л. Луазон) в частности: как должен или не должен работать историк науки, из каких методологических регулятивов он может или не может исходить, наконец, как соблюсти баланс между антикваризмом — историей науки, рассказанной из временной позиции изучаемого периода, — и презентизмом — историей науки с точки зрения ее современного состояния.

Статья И. А. Кузина содержит попытку ответа на два уровня вопросов: 1) о функционировании концепции генетической информации в биологии вообще и в молекулярной биологии в частности и 2) об уместной и адекватной историко-научной методологической рамке, определяющей эпистемические возможности историка науки. Хотя работе свойствен уклон в первую из этих тематик, я полагаю, что принципиальное значение имеет не столько позиция Лили Кей или И. А. Кузина по поводу конкретной концепции в биологии, сколько демонстрация вариативности способов работы историка науки, обладающего (конечным) набором фактов, подлежащих интерпретации (и всегда *уже* некоторым образом проинтерпретированных), и «набрасывающего» на эти факты некоторую методологическую сетку (или, если угодно, использующего определенную оптику). Лили Кей, как и И. А. Кузин, полагает, что концепция генетической информации исторически и культурно контингентна. Я, в свою очередь, считаю, что тот способ рассмотрения истории молекулярной биологии, который избрали оба упомянутых автора, также является контингентным. Тот же самый фактический

материал, которым обладала Лили Кей, может быть переинтерпретирован в совсем ином историко-научном духе, а именно в духе Лакатоса (Lakatos, 1971): становление концепции генетической информации может быть объяснено как часть *внутренней*, а не *внешней* истории науки. Такое внутреннее объяснение не является необходимым (свидетельство чему — сама работа Лили Кей), но я хочу показать, что оно возможно, и, следовательно, рассмотрение истории генетического кода как исторически и культурно контингентного эпистемического разрыва не является необходимым.

Конкретно И. А. Кузин пишет, комментируя тезис Лили Кей о контингентности (Кузин, 2022: 125):

Взлет концепции генетической / биологической информации нельзя полностью объяснить внутренней, естественной логикой развития науки... переход к концепции генетической информации был скачкообразным и вероятностным, то есть имел место эпистемический разрыв.

Это именно то утверждение, которое я попытаюсь оспорить в данной статье.

В центре внимания Лили Кей находится совсем короткий, но насыщенный значимыми событиями период с 1953 года (открытие двойной спирали ДНК Уотсоном и Криком) по 1967 (завершение расшифровки генетического кода). Предшествующие и последующие события Л. Кей рассматривает постольку, поскольку они релевантны, с ее точки зрения, для понимания происходящего в этот период. Во второй главе, названной «Пространства специфичности: дискурс молекулярной биологии до эпохи информации», вводится концепция *специфичности* как предшествующая понятию информации альтернатива (Кау, 2000: 38–72). Тезис о контингентности понятия информации в биологии означает среди прочего то, что в силу внутренней логики развития науки не было необходимого перехода от концепции специфичности к концепции информации. Информационная метафора, таким образом, предстает внешним эффектом, своего рода «дисциплинарной прививкой», переброшенной в биологию из дисциплин, которые даже трудно назвать смежными (из весьма отдаленных, например, баллистика). И. А. Кузин намечает два возможных пути дальнейшего разворачивания этой мысли: а) можно попытаться рационализировать использование концепции информации в молекулярной биологии, «опираясь на телеосемантическую концепцию» (Кузин, 2022: 131) и более современную философию биологии (И. А. Кузин делает это во втором разделе своей статьи),

б) можно, напротив, подчеркнуть контингентность (в некотором смысле — иррациональность) концепции информации, «откатить» современную биологическую теорию все дальше и дальше в прошлое в поисках все более и более радикальных альтернатив» (Кузин, 2022: 131) (этому посвящен четвертый раздел статьи). При этом наличие исторически возможных альтернатив интерпретируется И. А. Кузиным не только как конкретизация тезиса Лили Кей о контингентности, но и как способ актуальной критики использования концепции информации в современной биологии. Тем самым историко-научная методологическая позиция, названная Л. Луазоном «критическим презентизмом» (Loison, 2016), дает возможность двусторонней — можно сказать диалектической — критики: современная наука позволяет рационально осмыслить сюжеты истории науки, а история науки, в свою очередь, показывает контингентность современного научного знания. Дисбаланс внутренней и внешней истории науки, присутствующий в классической работе Лакатоса (чем больше истории можно объяснить внутренними средствами, тем лучше), здесь выравняется: двусторонняя критика должна позволить историку избежать как избыточной нормативной рационализации (и переноса процесса роста научного знания в трансцендентный «третий мир»), так и избыточной социологизации / психологизации¹ развития науки, которая всегда рискует скатиться в социокультурный релятивизм.

Однако, несмотря на всю благость намерений И. А. Кузина, я полагаю, что задача поддержания баланса между релятивизацией и рационализацией не была решена успешно ни в работе Лили Кей, ни в комментарии Кузина к ней.

ДИСКУРС, КОНЦЕПЦИЯ, МЕТАФОРА

Поверхностный взгляд на историю молекулярной биологии может навести на мысль, что в 1950-х генетики, биохимики и ученые из смежного научного поля совершили ряд открытий, в результате которых выяснилось, что в основе жизни лежит некий код, а в нем зашифрована определенная информация; тем самым концептуальный аппарат других областей, давно работающих с кодами и информацией (семиотика, лингвистика, криптография, радиоэлектроника, комбинаторика и т. д.), оказался эффективно применимым в молекулярной биологии. Этот взгляд — проявление виговского подхода к истории науки, то есть

¹Напомним, что это классическая пара наук, работающих с контекстом открытия в представлении Томаса Куна.

истории с позиции победителей: «Различные истории молекулярной биологии обычно предпочитали подходы „победителей“, тогда как „проигравших“ ожидала короткая расправа и лишение признания в процессе канонизации первых» (Кау, 2000: 115). Канонизация информационного подхода, по мысли Кей, была не следствием, а причиной процессов, происходивших в молекулярной биологии в 1940–1960-х годах: переход от мышления в терминах специфичности к мышлению в терминах информации был культурно контингентным и зависел от огромного количества факторов, среди которых не последнее место занимают Вторая мировая и последовавшая за ней холодная война, гонка вооружений, советские и американские космические программы, развитие кибернетики и, конечно, конкретные персонажи.

Лили Кей довольно точно датирует этот эпистемический разрыв (ibid.: 71–72):

Код — тайное зашифрованное письмо, записанное в хромосомах — еще не существовал в 1952 году. Не существовало проблемы кодирования... Не изображалось отношение между двумя объектами или двумя наборами символов... Ни Шредингер, ни Штерн, ни Хиншелвуд или Даунс² не использовали (до 1955 года) термины *информация*, *программа*, *инструкция*, *алфавит*, *слова*, *сообщения* и *тексты*. Они пока что отсутствовали в лексическом репертуаре.

Здесь уместно задаться вопросом: а насколько важно для истории *концепции*, употреблялись ли связанные с ней *термины*? Методологический аппарат Лили Кей представляет собой главным образом историческую эпистемологию в духе Фуко и Кангилема с привлечением критики письма (Ж. Деррида) и истории эпистемических вещей (Х.-Й. Райнбергер), но в целом ее методологию нельзя назвать прозрачной: термины «концепция информации», «информационная метафора» и «информационный дискурс» используются практически как синонимы. И. А. Кузин эксплицирует свое предпочтение термина «концепция», причем пишет (Кузин, 2022: 116):

Под концепцией мы понимаем... нечто промежуточное между понятием и теорией (концепция как определенная интерпретация ключевого понятия) [или] нечто промежуточное между метафорой и теорией.

Представляется разумным отличать «теорию» от «концепции», «концепцию» от «понятия», а «понятие» от «термина» или «слова». Если

²Персонажи второй главы книги Кей, которые в рамках презентистской историографии выглядят непосредственными предшественниками концепции информации.

придерживаться такого различия, то отсутствие термина «информация» в лексиконе ученых *никак не свидетельствует* о том, что отсутствовала соответствующая «концепция», тем более что, например, «теория» информации существовала как минимум с 1928 года (классическая работа Хартли: Хартли, Фурдуйев, 1959). Нам представляется, что фукольдиданский или наследующий ему анализ дискурсивных практик не сводится к фиксации частот словоупотребления.

Поскольку Лили Кей заранее отождествляет «концепцию» информации с «понятием» и «термином», ее выводы об эпистемическом разрыве оказываются predeterminedными методологией, а не фактическим положением дел в дискурсе. Их можно было бы назвать методологически контингентными³: другая концептуальная рамка произвела бы другие различия. Если возможен сдвиг значений одного и того же термина, почему не может быть возможен сдвиг терминов относительно синонимичного значения?

С этой точки зрения нам нужно заново оценить разрыв между понятиями «специфичность» и «информация». Кей указывает, что

специфичность — это аристотелевская материальная причина, основанная на трехмерности молекулярных структур и на экспериментально определенных измерениях, связывающая молекулы с организмами и видами. Информация — это аристотелевская форма (формальная причина. — прим. М. В.), абстракция в виде одномерной ленты, взаимодействие, свободное от экспериментальных измерений и материальных связей. Специфичность соотносилась с телом, а информация — с душой (Кей, 2000: 41).

Связь души и формы восходит, конечно, к Аристотелю, но было бы странно утверждать, что она не претерпела изменений на протяжении последних тысячелетий. Настолько же странным было бы утверждение, что *весь* информационный дискурс исходит из нематериальности, неэкспериментальности информации, ибо сама Лили Кей довольно подробно говорит о том, как во время второй — биохимической, экспериментальной раг excellence — стадии расшифровки ее ключевые «игроки» (в частности и в особенности М. Ниренберг) описывают свои материальные эксперименты в терминах информационного дискурса. Например, она цитирует интервью Маттеи, коллеги Ниренберга (*ibid.*: 249, курсив Кей):

³В том смысле контингентности, который был очень удачно, на мой взгляд, сформулирован И. А. Кузиным: «...пропозиция *контингентна*, когда она в некоторых возможных мирах истинна, а в некоторых — ложна» (Кузин, 2022: 124). Возможно представить себе мир, в котором положение дел обстоит иначе, чем в данном.

На тот момент гипотеза состояла в том, что существуют нуклеотидные последовательности *без кодирующей активности* и что если они стимулируют присоединение аминокислот... то наш анализ передатчика сообщения (messenger assay) не очень хорош.

Маттеи имеет в виду мРНК, но, если в одном предложении с *assay* (анализ, обычно — некоторого пробирного образца) стоит *messenger* и если кодирование описывается как активность нуклеотидов, информация не может быть свободной от экспериментальных измерений. Следуя логике Кей, где-то здесь в этом смещении означающих нужно искать еще один эпистемический разрыв, но она этого не делает. Следовательно, в рамках ее методологии это различие в значениях центрального понятия (материальность или нематериальность информации), остающееся в пределах концепции информации, не является столь же существенным, как различие между информацией и специфичностью. Спрашивается, какова же та мера расстояния между концепциями, которая должна быть обозначена как эпистемический разрыв?

ДВА ЭТАПА РАСШИФРОВКИ КОДА

Там, где Л. Кей ищет различие, можно, напротив, обнаружить удивительное сходство и даже логичную связь. Например, одна из центральных идей книги — различие между двумя стадиями «расшифровки» генетического кода: формально-комбинаторной и экспериментально-биохимической. На первой стадии (1953–1961) использовался подход, который

игнорирует внутреннюю биохимическую машинерию и рассматривает синтез белка как «черный ящик», в котором на вход подается ДНК-информация, а на выходе появляется полипептидная цепь (Кау, 2000: 193).

Этому подходу были привержены среди прочих Георгий Гамов, Френсис Крик и весь Клуб РНК-галстуков. На второй стадии (1961–1967) благодаря открытию роли мРНК стал возможен прямой биохимический подход: «транскрипт ДНК мог использоваться в бесклеточной системе *E. coli* для прямой трансляции белков» (ibid.: 231). И. А. Кузин выражает различие между этими фазами даже более явно, чем Лили Кей (Кузин, 2022: 125–126, курсив мой. — *М. В.*):

На контингентность информационного дискурса в биологии указывает *громкая неудача* первой — теоретической, генетико-математической — фазы расшифровки генетического кода... Лишь в рамках биохимической фазы в ходе

прямых экспериментов над бесклеточной системой синтеза белка удалось осуществить расшифровку.

Причина первоначальной неудачи видится обоим в ошибочном отождествлении понятий «код» и «шифр»: «кодируются семантические единицы, а шифруются синтаксические единицы» (Кузин, 2022: 126); концепции генетической информации был дополнительно придан не свойственный ей на самом деле семантический аспект. Отказ от криптографически-комбинаторного подхода в пользу экспериментально-биохимического тем самым превращается в доказательство большей правоты концепции специфичности или как минимум ее серьезных эпистемических преимуществ перед концепцией информации.

Можно поставить под сомнение практически каждое положение этого рассуждения. Вторая фаза связывается Кей с личностью Маршалла Ниренберга, который предстает в тексте книги талантливым и трудолюбивым одиночкой с биохимическим бэкграундом (Кей, 2000: 235–246); именно этот бэкграунд (и сформированная им оптика) объясняет, почему Ниренберг имел преимущество перед Криком. Но при этом описание молекулярно-биологической карьеры Ниренберга Кей начинает с его знакомства с оппонировавшей альтернативой — с рецензии на сборник «Химическая основа наследственности», полный статей сторонников подхода «черного ящика» (ibid.: 240). Хотя Ниренберг «имел лишь весьма расплывчатое представление о Клубе РНК-галстуков» (ibid.), «формулировка проекта белкового синтеза началась в рамках пространства репрезентаций и дискурса проблемы кодирования» (ibid.: 248). На тот момент наиболее распространенной версией кода был «код без запятых» (идея Ф. Крика, в которой некоторые триплеты «бессмысленны», то есть не кодируют аминокислот, и нет кодонов для старта / прерывания транскрипции). Ниренберг использовал полиадениловую кислоту (целиком состоящую из нуклеотидов А, poly-A), чтобы расшифровать кодон AAA, и полиуридилловую кислоту (poly-U) для кодона UUU соответственно. Кей указывает, что если бы Ниренберг следовал модели «кода без запятых», то он должен был, вслед за Криком, считать кодон AAA бессмысленным, а его наблюдаемые эффекты списать на особенности проведения эксперимента. Ниренберг так не поступил. Но есть большая разница между тем, чтобы следовать конкретному варианту кода, и тем, чтобы организовывать научную (в том числе материальную) практику в комбинаторно-математическом дискурсе. Иначе говоря, идея о том,

что некоторые наборы нуклеотидов соответствуют некоторым аминокислотам, имеющая явный «комбинаторный» привкус, *продолжала оформлять научную практику Ниренберга*, хотя его частное представление о «расшифровке» кода действительно не наследовало Крику.

После «расшифровки» кодона UUU Ниренбергом началась конкурентная гонка между ведущими биохимическими (к этому времени уже можно назвать их молекулярно-биологическими) лабораториями, и Кей характеризует эту гонку так (Кау, 2000: 256):

Бесчисленные исследователи... приняли текстовые репрезентации и информационные дискурсивные практики проблемы кодирования, как она была сформулирована Клубом РНК-галстуков в 1950-е, для упорядочивания своих подходов, объектов и методов.

Статья группы Ниренберга, датируемая декабрем 1961 г., охарактеризована Кей как «сдвиг с биохимических репрезентаций к текстуальным (scriptural) означающим» (ibid.: 262). В рамках этого сдвига они пришли, в частности, к идее триплетов («минимальное кодирующее соотношение — три, а очень возможно, что и больше»; цит. по ibid.: 263), тем самым воспроизводя ранние спекуляции Гамова, Крика и Ичаса; здесь же они, по свидетельству Кей, впервые цитируют статью Гамова 1954 года (Gamow, 1954)⁴, также Ниренберг знакомится со статьей Ичаса «Белковый текст» (Yčas, 1956), буквально напичканной концептами информационного дискурса. Лили Кей подчеркивает, что

эти текстуальные репрезентации были для Ниренберга не только риторической оберткой, [но и] законченными понятийными конструкциями, оформлявшими экспериментальную практику (Кау, 2000: 264).

С учетом всего вышесказанного траектория расшифровки генетического кода вообще не выглядит двухчастной: информационный дискурс (концепция, метафора) доминировал как с 1954 по 1961 гг., так и с 1962 по 1968 гг.; единственный короткий промежуток, когда биохимическая материальность происходящего действительно доминировала над формалистским криптоанализом — это несколько месяцев, приблизительно с ноября 1960 по август 1961 гг., и только у Ниренберга.

⁴Статья «Possible Relation between Deoxyribonucleic Acid and Protein Structures» описывает «ромбический код» и носит в основном комбинаторно-спекулятивный характер.

Нельзя назвать «вторую стадию» биохимической только на том основании, что Ниренберг пришел в молекулярную биологию из биохимии⁵. Его коллега, в дуэте с которым были сделаны первые шаги к расшифровке кода, Генрих Маттеи, до встречи с Ниренбергом занимался физиологией растений; вторая фаза расшифровки ровно с тем же успехом может быть названа «физиолого-растениевой». Биохимики, как указывает Кей, «сами того не зная, воспроизводили те же [исследовательские] вопросы, которыми Гамов, Рич и Ичас задавались в 1950-х» (Кау, 2000: 250). Выходит, что биохимический анализ дополнял комбинаторный, а не противопоставлялся ему; общая концептуальная рамка сохранялась. Восклицание Ф. Крика «Если бы только у нас был белок!» (ibid.: 254) дополнительно свидетельствует о том, что биохимическое («материальное») экспериментирование было не чуждо даже главным проповедникам криптоаналитического подхода.

«Таким образом, распространение информационного дискурса в молекулярной биологии нельзя объяснить успешностью его применения», — делает вывод И. А. Кузин (Кузин, 2022: 126). Но в таком случае успешность применения биохимии также не может быть аргументом в пользу того, что концепция специфичности (ассоциируемая с материальностью экспериментальных практик) является возможной альтернативой концепции информации (ассоциируемой с чисто формальными подходами). Для Лили Кей успех Ниренберга был «победой материальной изобретательности (*material ingenuity*) над пифагорейскими идеалами» (Кау, 2000: 255), но если выясняется, что «пифагорейские идеалы» во многом фундировали «материальную изобретательность», то кто в итоге победил? Ниренберг и Маттеи в 1961 году не знали, является ли код триплетным, а Крик, Гамов и Ичас обсуждали триплетность как наиболее вероятный вариант еще в середине 1950-х; остается только повторить вопрос: кто в итоге победил?

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИНТЕРНАЛИЗМ

Вопрос о победителе в данном случае важен в связи с представлением о виговской историографии — написании истории с точки зрения победи-

⁵ Даже в этом утверждении можно усомниться на основании данных самой же Кей: сначала она указывает на «отчужденность биохимии от классической и молекулярной генетики» (Кау, 2000: 237), а затем, на следующей странице, — на то, что Ниренберг, перейдя в НИ, внезапно увлекся двумя дополнительными курсами по генетике (ibid.: 238) еще до начала работы над «проблемой кодирования». То есть совсем «внешним» по отношению к генетике Ниренберга счесть сложно.

телей. И. А. Кузин специально отличает вигизм от корректных, на его взгляд, форм презентизма: вигизм — это «злоупотребление каузально-нарративным и нормативным презентизмом, то есть замена каузальности и нормативности на телеологию» (Кузин, 2022: 131). Телеологичная история молекулярной биологии схематично может быть изображена, например, так: гены — это носители наследственной информации; генетики и биохимики вместе долго искали вещество, ответственное за передачу информации, и постепенно пришли к верной концепции; а сходства между послевоенным дискурсом информационных технологий и способами объяснения в молекулярной биологии явно свидетельствуют о том, что в некотором смысле изучаемые объекты представляют собой одно и то же (например, сообщения); таким образом, произошла удивительная конвергенция разных путей развития разных дисциплин.

Картина, которую рисует Л. Кей, принципиально антiteleологична: то, что в нашем схематичном изображении было целевой причиной (конвергенция дисциплин), у Кей становится действующей причиной (конкретные люди и институции произвели дискурс, который порождает высказывания о генетической информации). В своей книге Кей специально говорит о вигизме лишь однажды (Кау, 2000: 4–5):

Ретроспективно виговские мифы, вращающиеся вокруг книги Э. Шредингера «Что такое жизнь» и рассматривающие ее как предшественника генетического кода, скрывали историчную природу его собственных интересов и научный и социальный контекст 1950-х.

Быть против вигизма для Кей — значит быть подлинно историчным.

Но если виговская историография — это нарратив победителей, то верно и обратное: если историк хочет, чтобы проигравшие выглядели победителями, он должен написать историю с их точки зрения. Кажется, именно этим пытается заниматься Кей. Мы уже приводили примеры того, как исторические события, изложенные ей, могут получить иную, а иногда и прямо противоположную интерпретацию; в этом смысле дискурс, производимый ее текстом и производящий ее текст, также контингентен⁶.

На основе тезиса о контингентности концепции генетической информации И. А. Кузин предлагает ряд «все более и более радикальных альтернатив» (Кузин, 2022: 131). Фактически за счет *истории науки*

⁶Стандартный прием оппонирования какой бы то ни было релятивизации в истории философии, от ответа Сократа Протагору и до принципа рефлексивности Блэра.

демонстрируется, что контингентностью обладает *современная* научная теория и что возврат внимания историка науки к развилке на пути развития дисциплины — это повод для альтернативного взгляда на актуальные биологические концепции, причем чем раньше произошла развилка, тем альтернативнее будет взгляд. Но тогда для полноты картины недостает нарратива, который был бы альтернативой самой идее контингентности концепции информации, то есть нарратива, в некотором смысле обосновывающего внутреннюю необходимость концепции информации. Иначе говоря, может ли историк науки предложить не «соломенное чучело», вроде нашего гипотетичного телеологического схематизма, а действительно содержательную и при этом интерналистскую альтернативу?

Авторы учебника по философии биологии А. Розенберг и Д. Макшей в завершение обсуждения концепции информации в философии биологии объявляют, что первая буквально «эндемична (endemic) для биологической теории и биологического описания» (Rosenberg, McShea, 2007: 184), то есть биология является для нее некоей естественной средой обитания⁷. Можно предложить ретроспективное описание происхождения этой «естественности» как минимум по отношению к генетике и в качестве методологического регулятива использовать, например, идею Г. Риккерта о существовании фундаментального различия в способах развития естественных и гуманитарных наук. Естественные науки, по Риккерт, отличает специфическая форма генерализации, стремление к «последней естественной науке», оперирующей «последними вещами» (Риккерт, Воден, 1997: 111–118), то есть объяснение через все более элементарные взаимодействия, охватывающие все более широкий круг явлений при помощи все более простых объектов. Хотя Риккерт говорит о конвергенции всех естественных наук, можно ограничить этот явный интернализм отдельными дисциплинами. Например, необходимая (не контингентная!) траектория развития физики представляет собой стремление к *теории всего*, базовыми объектами которой будут наиболее элементарные частицы.

Тот же тренд можно обнаружить, обратившись к истории генетики, если начать ее рассмотрение не с 1940-х, как это делает Лили Кей, а с 1865 г. — с экспериментов Грегора Менделя с горохом. Если под

⁷Аналогично И. А. Кузин цитирует Джона Мейнарда Смита: «Идея информации является центральной в философии биологии» (цит. по Кузин, 2022: 118).

законами, или правилами, Менделя понимать пропорции распределения фенотипических признаков, то, во-первых, ничего нового они не содержали: в середине XIX века те же результаты уже получали другие ученые, в том числе Чарльз Дарвин. Во-вторых, результаты Менделя не воспроизводились на многих других экспериментальных объектах, например на пчелах (Голубовский, 2000: 30). Гораздо более значимой частью работы Менделя было предположение о наличии некоторого дискретного объекта, который отвечает за некоторый фенотипический признак. Мендель назвал его наследственным фактором (термина «ген» еще не было) и предположил, что за каждый признак отвечает пара факторов (то, что позже было названо аллелями). И это принципиальный момент: искомый наследственный фактор определяется функционально — как причина проявления признака (Мендель, 1935: 46–47). Неявным предположением, которое считалось настолько очевидным, что для XIX века не требовало уточнения, было то, что наследственный фактор представляет собой некоторый *материальный объект*. В версии Менделя носителями этой причинности выступали сами клетки. Несколько позже Карл Нэгели, постоянный корреспондент Менделя, формулирует разделение клетки на идиоплазму — носителя причин проявления признаков — и трофоплазму — остальную часть клетки; только идиоплазма передается потомкам (Назаров, 2005: 164). В 1882–1883 гг. исследования Флемминга и ряда других ученых показали, что в процессе деления клеток хроматиды распределяются поровну. После переоткрытия правил Менделя в 1900 г. было также обнаружено, что распределение родительских хроматид среди потомков подчиняется им (Crow and Crow, 2002). Соответственно, теперь хромосома претендует на роль носителя аллеля.

В 1909 г. В. Иогансен вводит термин «ген», сопровождая его следующим комментарием (цит. по Любищев, 1925: 10):

...особенности организма обусловлены особыми, находящимися в гаметах отделимыми и потому самостоятельными состояниями, основами, зачатками... Мы легко можем говорить о «гене свойства» вместо громоздкой фразы «ген, который обуславливает свойство». [...] Каждая особенность, в основе которой лежит особый ген, может быть названа единичной особенностью.

В конце XX – начале XXI века именно этот устойчивый оборот («ген чего-то», «gene for») станет объектом критики со стороны антиредукционистских стратегий в философии биологии (Dupre, 2012), но в начале XX в. это был базовый способ мыслить о генах. Томас Морган, экспериментируя с *Drosophila Melanogaster*, создает хромосомную теорию

наследственности, в рамках которой носителем аллеля выступает не вся хромосома, а некоторый ее фрагмент, способный быть минимально неделимой единицей при кроссинговере (Морган, 1924: 9–13).

Дальнейшее стремление к «последним вещам» уже непосредственно затрагивает биохимию: в 1928г. Н. К. Кольцов обосновывает идею матричного синтеза и предполагает, что искомым носителем наследственности — белок (Кольцов, 1936). Это предположение будет доминировать следующие двадцать лет; на его основе будет искать «наследственный фактор» среди белков, например, Лайнус Полинг — первооткрыватель белковых альфа-спиралей, пространственных компонент белка (Strasser, 2006); идея устойчивости альфа-спирали непосредственно повлияла на то, что именно спиральную конструкцию искали Дж. Уотсон и Ф. Крик. В 1944 г. Эвери и коллеги установили связь между изменениями в нуклеиновой кислоте и фенотипическими проявлениями мутаций у пневмококков, тем самым добавив серьезный (хотя и не окончательный) аргумент в пользу ДНК и против белков как носителей «наследственных факторов» (Avery et al., 1944)⁸. И заключительный шаг в этом стремлении к риккертовским «последним вещам» делают Уотсон и Крик: минимально возможным носителем наследственности оказывается нуклеотид.

На протяжении всей этой истории термин «информация» применительно к наследственным факторам, или генам, не использовался в отличие от понятия «специфичность», которое действительно занимало прочное место в лексиконе биологов первой половины XX века. Но, как мы указывали выше, не следует из отсутствия термина делать вывод об отсутствии концепции или как минимум ее ростков. В тот момент, когда цепочка «последних вещей» (клетка — часть клетки — хромосома — части хромосом — молекулы — нуклеиновые кислоты — нуклеотиды) подошла к концу, стал заметным тот двойственный характер концепции наследственного фактора, который был заложен в генетику еще Менделем и подкреплен Иогансенем. С одной стороны, ген — это «ген чего-то», ген признака; с другой стороны, это элементарный материальный объект — «находящиеся в гаметах, отделимые состояния, основы, зачатки» (цит. по Любищев, 1925: 10). Эти два способа определить, что такое ген, были неразличимы до тех пор, пока материальный

⁸Выглядит подозрительным, что в книге Лили Кей Освальду Эвери отведено всего полторы страницы.

аспект их существования совпадал с функциональным. Но применительно к нуклеотиду это уже не так: отдельный нуклеотид не является причиной никакого признака, хотя является, допустим, минимальной единицей мутации или кроссинговера. Только в 1953 г. становится ясно, что быть геном признака и быть элементарным объектом генетики — не одно и то же.

И именно в этот момент Георгий Гамов переинтерпретирует проблему в комбинаторном духе: если есть 4 нуклеотида и 20 аминокислот, то для возможности установить соответствие нужны как минимум три нуклеотида (Gamow, 1954). Тем самым минимальной *функциональной* единицей наследственности становится триплет, а минимальным *материальным* фактором — нуклеотид. Материальная специфичность отдельного нуклеотида оказывается незначимой. Концептуальные интуиции Лили Кей о том, что «специфичность соотносилась с телом, а информация — с душой» (Kay, 2000: 41), вполне корректны в этом отношении: именно тогда, когда материальные, телесные характеристики объекта теряют свою объяснительную способность, информационный дискурс вступает в свои права. Показательный эпизод: в 1957 г. Сеймур Бензер, пытаясь решить проблему с неясностью значения термина «ген», предложил вообще больше его не использовать и заменить его на три других: «мутон» как минимальную единицу мутации, «рекон» как минимальную единицу рекомбинации и «цистрон» как минимальную единицу функции (The Elementary Units of Heredity, 1966). Но в итоге мутон и рекон оказались тождественны нуклеотиду, а цистрон — более современному значению термина «ген» (участок цепи ДНК, кодирующий один белок).

Эта история, рассказанная вкратце и наспех, вряд ли по своей продуманности может соперничать с фундаментальным трудом Кей, но она показывает, на наш взгляд, как, не противореча фактуальным утверждениям Кей, им все же можно придать интерналистскую интерпретацию. В ней эпистемический разрыв между специфичностью и информацией получает свое объяснение: концепция генетической информации — это реализация внутренних потенций генетики, заложенных в нее в процессе ее становления. Специфичность с этой точки зрения — недоработанная концепция информации. Выше мы предложили считать концепцию Кей методологически контингентной; это же можно сказать и о концепции генетической информации: определяющими факторами, формирующими дискурс, оказываются не столько историко-культурные факторы, сколько скрытые импликации принятых методологических

обязательств. И если И. А. Кузин хочет рассматривать науку как одновременно контингентную и рациональную, представляется, что «рациональная реконструкция», изложенная выше, гораздо лучше подходит для этой цели.

КОД ИЛИ ШИФР?

Согласно Лакатосу (Lakatos, 1971) историко-культурное, экстерналистское описание развития исследовательской программы требуется в тех случаях, когда рационально объяснить некоторый сюжет из истории науки не удастся. При этом внутренняя логика развития науки рассматривается как необходимая, а внешний социокультурный дискурс — как случайный или контингентный. В предыдущем разделе мы постарались показать, что интерналистское описание также может предполагать контингентность, но другого рода; таким образом, можно развернуть тезис Лакатоса в противоположную сторону: рациональная реконструкция требуется тогда, когда в исторически и культурно контингентном нарративе есть провалы.

Одним из таких провалов нам представляется путаница с понятиями «код» и «шифр», которая существовала, по мнению Л. Кей, и которую И. А. Кузин связывает с семантической и синтаксической концепциями информации соответственно (Кузин, 2022: 118–124, 126). Историю теории информации Кей начинает с К. Шеннона, У. Уивера, Н. Винера и исследований, погруженных в контекст Второй мировой войны и холодной войны. Концепция информации Шеннона — синтаксическая, как и понятие «шифр» (Shannon, Weaver, 1949). «Код работает с лингвистическими объектами и подразделяет материал на значимые элементы, такие как слова или слоги (в то время как шифры отделяли бы „t“ от „h“ в слове „the“» (Кей, 2000: 151). Метафора кода подразумевала бы, что его можно декодировать, используя стандартные в криптографии способы: установление частот распределения элементов (например, пар букв) в любом человеческом языке не является случайным. Но в неправильно называемом генетическом коде не было выявлено никакой связи между соседними элементами. Кей пишет (ibid.: 152):

Как только аналогия между комбинаторными элементами в нуклеиновых кислотах или белках и буквами в алфавитах пустила свои корни, сравнение с языком зажило собственной жизнью. С какого-то момента метафора языка со всеми его двусмысленностями, апориями и тавтологиями начала

восприниматься буквально. И разве могло быть иначе? «Код» — логоцентрический образ, предшествующий эмпирическому свидетельству, — требовал существования языка как своей предпосылки.

«Разве могло быть иначе?» Во-первых, конечно, могло быть иначе — в этом и состоит смысл тезиса об историко-культурной контингентности концепции информации. С этой точки зрения совершенно непонятно, почему Кей вообще так выразилась. Во-вторых, если биологический дискурс в этот период был настолько тотально зависим, как полагает Кей, от социокультурного контекста и доминирующих поствоенных дисциплин (физика, кибернетика, теория коммуникации и т. д.), то как вышло, что классическая для этих дисциплин синтаксическая трактовка в молекулярной биологии приобретает явные семантические черты?

Шеннон, естественно, был в курсе ограничений синтаксической концепции информации.

Фундаментальная проблема коммуникации — это воспроизводство в одном месте точно такого же или приблизительного сообщения, выбранного⁹ в другой точке. Часто сообщения имеют *значение*, то есть они отсылают к некоторой системе с определенными физическими или концептуальными объектами или скоррелированы с такой системой. Эти семантические аспекты коммуникации нерелевантны инженерным проблемам. Значимо только то, что актуальное сообщение было выбрано из множества возможных сообщений (Shannon, 1948: 379).

Специалисты по теории коммуникации, кибернетике, криптоанализу не путают понятия «код» и «шифр»; к путанице, конечно, мог привести дилетантизм отдельных представителей молекулярной биологии (Ф. Крик, например, расписывался в собственной некомпетентности по этому поводу) или сознательный акт расширения концепции для новых областей применения (Г. Кастлер), но какой тогда смысл в тезисе о доминировании поствоенного дискурса, если он оказывается не способен удерживать отдельных личностей в рамках правил производства высказываний? Конечно, при переносе концептов из одной области в другую происходит их трансформация, но тогда логично полагать, что это случается за счет некоторых уже имеющихся во второй области концептуальных каркасов. Иначе говоря, концепцию информации не просто «внесли» в молекулярно-биологический дискурс и оставили как

⁹Сообщение трактуется как запомненный из некоторого количества альтернатив выбор.

есть — нечто в этой дисциплине специфическим образом направляло развитие заимствованных понятий¹⁰.

В частности, если принять рассказанную в предыдущем разделе рациональную реконструкцию истории генетики, то семантическая концепция информации возникает в биологии гораздо раньше, чем это датируется И. А. Кузиным, — не в 1990-е годы (Кузин, 2022: 120), а имплицитно вместе с появлением менделевского представления о дискретных наследственных факторах, отвечающих за (в терминах семантики — обозначающих) фенотипический признак. Тогда сдвиг в сторону семантической интерпретации генетической информации — это результат дальнейшего разворачивания идеи о минимальной единице наследственности — разворачивания, которое начиная с 1953–1954 гг. происходило уже в новых терминах, постепенно переопределяющих собственные значения. С этой точки зрения концепцию специфичности (специфические факторы фенотипических признаков) можно назвать непосредственным предшественником концепции информации, между ними нет эпистемического разрыва.

Как в связи с этим следует переоценить размышления И. А. Кузина о критике современного научного знания с позиции истории науки (там же: 132–135)?

Четыре «все более радикальные» альтернативы теперь не выглядят ни радикальными, ни, собственно, альтернативами. Так, например, возврат к синтаксической концепции информации не представляется возможным, если в прошлом переход от нее к семантической концепции был обусловлен скорее внутренним развитием генетики, чем влиянием внешних дискурсов и институтов¹¹. Отказ от концепции информации в сторону узкой стереоспецифичности выглядит как деградация проблемы наследования, возврат к ранним представлениям Гамова о «ромбическом коде» (которые как раз, наоборот, инспирированы комбинаторным подходом к проблеме кодирования). И. А. Кузин пишет, что генетическая информация, как ее понимал Крик, «оказывается

¹⁰Если же ослабить аргументацию Кей до утверждения, что «поствоенный дискурс оказал влияние», то сама идея исторической и культурной контингентности оказывается размытой до состояния «было множество факторов, а решающее влияние оказала их совокупность»; утверждение с очевидностью истинное, но тривиальное и бессодержательное.

¹¹Вообще говоря, он не был бы возможен и в рамках представлений Лили Кей: для этого пришлось бы заново переписать историю Второй мировой войны и холодной войны, а также некоторым волевым усилием перераспределить капитал, в том числе символический, между институтами.

примером узкой, но не абсолютной специфичности, [так как] на определение последовательности аминокислот в белке влияет множество других факторов» (Кузин, 2022: 134). Это так, но тогда сам генетический код (принцип соответствия, а не конкретная последовательность) становится примером абсолютной специфичности: так, кодон UUU не кодирует другую аминокислоту, кроме фенилаланина, независимо от совокупности эпигенетических факторов. Четвертая альтернатива — переход к более холистической, коллективной биологии — означает среди прочего отказ от дискретности объектов исследования и тем самым оказывается утраченной альтернативой: такой переход невозможен при доминировании виртуального моделирования и компьютерных симуляций, основанных на дискретизации процессов вычисления. Иначе говоря, для этого нужно предать забвению значительную часть результатов, полученных на основе представлений о дискретности генов и белков. Остается неясным, каким образом размытый характер специфических взаимодействий «облегчает математическое моделирование и повышает точность основанных на нем предсказаний» (там же: 135): в общем случае непрерывность процесса приводит к невозможности вычислений без его искусственной дискретизации (см., например Lenhard, 2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

И. А. Кузин пытается в своей работе, с одной стороны, помыслить выход за пределы информационного дискурса в биологии, а с другой, предложить более сбалансированное соотношение между интернализмом и экстернализмом. Нам представляется, что если это и возможно представляется, то вряд ли в союзе с Лили Кей: во-первых, ее представление о социокультурной контингентности концепции генетической информации — это ярко выраженный и даже предвзятый экстернализм, а во-вторых, во многих аспектах оно может быть названо неудовлетворительным и непоследовательным. Как переход от специфичности к информации в целом, так и его отдельные эпизоды могут быть объяснены интерналистски, и тогда ответ на интересный вопрос И. А. Кузина «Каким образом история науки может быть использована для критики современного научного знания?» (Кузин, 2022: 131) будет следующим: зависит от того, как ее рассказать. Это, конечно, тоже тезис о контингентности, но уже несколько иного типа, чем дискурсивное господство.

ЛИТЕРАТУРА

- Голубовский М. Д.* Век генетики : эволюция основных идей и понятий. — СПб. : Борей Арт, 2000.
- Кольцов Н. К.* Физико-химические основы морфологии // Организация клетки. Сборник экспериментальных исследований, статей и речей. — М. : Биомедгиз, 1936. — С. 461—490.
- Кузин И. А.* Концепция генетической информации и историческая эпистемология // Философия : Журнал Высшей школы экономики. — 2022. — Т. 6, № 2. — С. 114—147.
- Любищев А. А.* О природе наследственных факторов. — Пермь : Известия Биологического научно-исследовательского института, 1925.
- Мендель Г.* Опыты над растительными гибридами. — М. : Огиз-Сельхозгиз, 1935.
- Морган Т. Х.* Структурные основы наследственности. — Москва, Петроград : Государственное издательство, 1924.
- Назаров В. И.* Неоламаркизм : эволюция не по Дарвину. — М. : КомКнига, 2005.
- Риккерт Г.* Границы естественнонаучного образования понятий : логическое введение в исторические науки / пер. с нем. А. М. Водена. — СПб. : Наука, 1997.
- Хартли Р.* Передача информации / пер. с англ. В. В. Фурдуева // Теория информации и ее приложения. Сборник переводов : пер. с англ. / под ред. А. А. Харкевича. — М. : ФМЛ, 1959. — С. 5—35.
- Avery O., Macleod C., McCarty M.* Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types : Induction of Transformation by a Desoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from Pneumococcus Type III // Journal of Experimental Medicine. — 1944. — Vol. 79. — P. 137—158.
- Crow E. W., Crow J. F.* 100 years ago : Walter Sutton and the Chromosome Theory of Heredity // Genetics. — 2002. — Vol. 160. — P. 1—4.
- Dupre J.* Processes of Life : Essays in the Philosophy of Biology. — Oxford : Oxford University Press, 2012.
- Gamow G.* Possible Relation between Deoxyribonucleic Acid and Protein Structures // Nature. — 1954. — Vol. 173. — P. 318.
- Kay L. E.* Who Wrote the Book of Life? : A History of the Genetic Code. — Redwood City : Stanford University Press, 2000.
- Lakatos I.* History of Science and Its Rational Reconstruction // PSA 1970 : In Memory of Rudolf Carnap. Boston Studies in the Philosophy of Science. Vol. 10 / ed. by R. Buck, R. Cohen. — Dordrecht, Holland : D. Reidel, 1971. — P. 91—139.
- Lenhard J.* Computer Simulation : The Cooperation Between Experimenting and Modelling // Philosophy of science. — 2007. — Vol. 74. — P. 176—194.
- Loison L.* Forms of Presentism in the History of Science. Rethinking the Project of Historical Epistemology // Studies in History and Philosophy of Science. Part A. — 2016. — Vol. 60. — P. 29—37.
- Rosenberg A., McShea D. W.* Philosophy of Biology : A Contemporary Introduction. — New York : Routledge, 2007.

- Shannon C.* The Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. — 1948. — Vol. 3. — P. 379–423.
- Shannon C., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. — Urbana : University of Illinois Press, 1949.
- Strasser B. J.* A World in One Dimension : Pauling, Crick and the Central Dogma of Molecular Biology // History and Philosophy of Life Sciences. — 2006. — Vol. 28. — P. 491–512.
- The Elementary Units of Heredity // The Chemical Basis of Heredity / ed. by S. Benzer. — Baltimore : John Hopkins University Press, 1966. — P. 70–93.
- Yčas M.* The Protein Text // Symposium on Information Theory in Biology / ed. by H. P. Yockey. — New York : Pergamon Press, 1956. — P. 70–100.

Voloshin, M. Yu. 2023. "Kontingentnost' geneticheskoy informatsii: pro et contra [The Contingency of Genetic Information: pro et contra]" [in Russian]. *Filosofiya. Zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki [Philosophy. Journal of the Higher School of Economics]* 7 (1), 317–339.

MIKHAIL VOLOSHIN

PHD STUDENT

M. V. LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY (MOSCOW, RUSSIA); ORCID: 0000-0002-6379-4771

THE CONTINGENCY OF GENETIC INFORMATION: PRO ET CONTRA

Submitted: Aug. 05, 2022. **Reviewed:** Aug. 23, 2022. **Accepted:** Nov. 02, 2022.

Abstract: Within the framework of historical epistemology (G. Canguilhem, M. Foucault, L. Loison) the key concepts of a scientific discipline are considered as historically and culturally contingent, that is, predetermined by outside factors rather than by the internal logic of the development of science. A fundamental attempt to demonstrate the contingency of the concept of "genetic information" was made in 2000 by Lily Kay, who argues that there was an "epistemic rupture" between this concept and the previous biological discourse of "specificity". As I. A. Kuzin has recently demonstrated, this work is essential not only for the history of biology, but also for the methodology of history of science and for modern biology as well. This paper contains a critical approach to both works. The sociocultural (externalist) conceptualizations of the history of biology contain serious difficulties and contradictions that internalism can successfully cope with. Being an explanans, "discourse" is not able to explain the key features of the history of deciphering the genetic code. "Discourse", "concept" and "metaphor" of information are confused; two separated phases of the deciphering the code are separated groundlessly as "formal" and "material" stages; the transition from syntactic aspect of information to semantic one (from the "cipher" metaphor to the "code" metaphor) is at least problematic. The internalist approach preserves the idea of the contingency of the concept of information (in the form of methodological contingency instead of historical and cultural one), and at the same time incorporates it into the internal development of genetics and molecular biology.

Keywords: Genetic Information, Contingency, Historical Epistemology, History of Biology, Philosophy of Biology, Internalism, Externalism, Genetic Code.

DOI: 10.17323/2587-8719-2023-1-317-339.

REFERENCES

- Avery, O., C. Macleod, and M. McCarty. 1944. "Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types: Induction of Transformation by a Desoxyribonucleic Acid Fraction Isolated from Pneumococcus Type III." *Journal of Experimental Medicine* 79:137–158.
- Benzer, S., ed. 1966. "The Elementary Units of Heredity." In *The Chemical Basis of Heredity*, 70–93. Baltimore: John Hopkins University Press.
- Crow, E. W., and J. F. Crow. 2002. "100 years ago: Walter Sutton and the Chromosome Theory of Heredity." *Genetics* 160:1–4.
- Dupre, J. 2012. *Processes of Life: Essays in the Philosophy of Biology*. Oxford: Oxford University Press.
- Gamow, G. 1954. "Possible Relation between Deoxyribonucleic Acid and Protein Structures." *Nature* 173:318.
- Golubovskiy, M. D. 2000. *Vek genetiki [The Age of Genetics]: evolyutsiya osnovnykh idey i ponyatiy [The Evolution of Basic Ideas and Concepts]* [in Russian]. Sankt-Peterburg [Saint Petersburg]: Borey Art.
- Hartley, R. 1959. "Peredacha informatsii [Transmission of Information]" [in Russian]. In *Teoriya informatsii i yeye prilozheniya. Sbornik perevodov [Information Theory and Its Applications. Collection of Translations]*, ed. by A. A. Kharkevich, trans. from the English by V. V. Furduyev, 5–35. Moskva [Moscow]: FML.
- Kay, L. E. 2000. *Who Wrote the Book of Life?: A History of the Genetic Code*. Redwood City: Stanford University Press.
- Kol'tsov, N. K. 1936. "Fiziko-khimicheskiye osnovy morfologii [Physico-Chemical Foundations of Morphology]" [in Russian]. In *Organizatsiya kletki. Sbornik eksperimental'nykh issledovaniy, statey i rechey [Cell Organization. Collection of Experimental Studies, Articles and Speeches]*, 461–490. Moskva [Moscow]: Biomedgiz.
- Kuzin, I. A. 2022. "Kontseptsiya geneticheskoy informatsii i istoricheskaya epistemologiya [The Concept of Genetic Information and Historical Epistemology]" [in Russian]. *Filosofiya [Philosophy]: Zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki [Journal of the Higher School of Economics]* 6 (2): 114–147.
- Lakatos, I. 1971. "History of Science and Its Rational Reconstruction." In *PSA 1970: In Memory of Rudolf Carnap. Boston Studies in the Philosophy of Science*, ed. by R. Buck and R. Cohen, 10:91–139. Dordrecht, Holland: D. Reidel.
- Lenhard, J. 2007. "Computer Simulation: The Cooperation Between Experimenting and Modelling." *Philosophy of science* 74:176–194.
- Loison, L. 2016. "Forms of Presentism in the History of Science. Rethinking the Project of Historical Epistemology." *Studies in History and Philosophy of Science. Part A* 60:29–37.
- Lyubishchev, A. A. 1925. *O prirode nasledstvennykh faktorov [About the Nature of Hereditary Factors]* [in Russian]. Perm': Izvestiya Biologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta.
- Mendel', G. 1935. *Opyty nad rastitel'nymi gibridami [Experiments on Plant Hybrids]* [in Russian]. Moskva [Moscow]: Ogiz-Sel'khozgiz.
- Morgan, T. Kh. 1924. *Strukturnyye osnovy nasledstvennosti [Structural Foundations of Heredity]* [in Russian]. Moskva and Petrograd: Gosudarstvennoye izdatel'stvo.
- Nazarov, V. I. 2005. *Neolamarckizm [Neo-Lamarckism]: evolyutsiya ne po Darvinu [Evolution not According to Darwin]* [in Russian]. Moskva [Moscow]: KomKniga.
- Rickert, H. 1997. *Granitsy yestestvennonauchnogo obrazovaniya ponyatiy [Die Grenzen der naturwissenschaftlichen begriffsbildung]: logicheskoye vvedeniye v istoricheskiye*

- nauki* [in Russian]. Trans. from the German by A. M. Voden. Sankt-Peterburg [Saint Petersburg]: Nauka.
- Rosenberg, A., and D. W. McShea. 2007. *Philosophy of Biology: A Contemporary Introduction*. New York: Routledge.
- Shannon, C. 1948. "The Mathematical Theory of Communication." *Bell System Technical Journal* 3:379-423.
- Shannon, C., and W. Weaver. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Strasser, B. J. 2006. "A World in One Dimension: Pauling, Crick and the Central Dogma of Molecular Biology." *History and Philosophy of Life Sciences* 28:491-512.
- Ycas, M. 1956. "The Protein Text." In *Symposium on Information Theory in Biology*, 70-100. New York: Pergamon Press.