



секс с учеными

Половое
размножение
и другие
загадки
биологии

Алексей
Алексенко

18+

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Алексей Алексенко

**Секс с учеными: Половое
размножение и другие
загадки биологии**

«Альпина Диджитал»

2024

УДК 612.6+591.1+581.1
ББК 28.03

Алексенко А.

Секс с учеными: Половое размножение и другие загадки биологии
/ А. Алексенко — «Альпина Диджитал», 2024

ISBN 978-5-00-223192-8

Величайшие биологи прошлого пытались разобраться в том, для чего живым существам нужно половое размножение, как оно возникло, какую пользу принесло и почему не исчезло. В книге «Секс с учеными» рассказывается, как ученые попытались связать секс с мутационным процессом и в результате создали целую область науки – популяционную генетику. Речь заходит о разделении на два пола, в котором ничего нельзя понять без теории игр, и половых хромосомах, вокруг которых закручиваются увлекательные сюжеты из молекулярной биологии. Затем повествование переходит к мейозу, о котором до сих было крайне затруднительно прочесть что-то понятное неспециалистам. В связи с ним затрагивается и важнейший вопрос современной науки – происхождение жизни на Земле. Наконец, нашлось в книге место и для обсуждения роли секса в жизни общества, о которой все вроде бы давным-давно написано, но лишняя пара глав никому не повредит. Будет ли обладать эволюционным преимуществом мутация к бесполому размножению у человека? Девушка, получившая в дар от природы способность беременеть просто так, без всякого внешнего повода, скорее всего, станет большой проблемой для медиков и/или социальных служб. Хотя, конечно, романтические фантазии о новом продвинутом разумном виде вроде «Славных Подруг» из романа братьев Стругацких «Улитка на склоне» тоже имеют право на существование. Для кого? Для всех, кто хочет понять, для чего нужно живым существам половое размножение, как оно возникло, какую пользу принесло и почему не исчезло в процессе эволюции. Эта книга для тех, кто интересуется биологией и генетикой и готов вместе с учеными искать ответы на неразгаданные загадки эволюции. Каждый сперматозоид Льва Николаевича нес в себе ровно половину его диплоидного генома. За всю его жизнь тринадцать сперматозоидов слились

с тринадцатью яйцеклетками его супруги, так что следующему поколению перешло тринадцать половинок генома писателя.

УДК 612.6+591.1+581.1

ББК 28.03

ISBN 978-5-00-223192-8

© Алексенко А., 2024

© Альпина Диджитал, 2024

Содержание

Предисловие	8
Часть первая	12
Глава первая, в которой читатель встретит стадо несуществующих слонов	13
Глава вторая, в которой улитки дорого заплатили за свои глупости	17
Глава третья, в которой рассмотрена роль секса в жизни Льва Николаевича Толстого	22
Глава четвертая, в которой организм отморозил себе уши назло зародышевой плазме	28
Глава пятая, в которой от угрозы генетического вырождения можно отбиться топором	34
Конец ознакомительного фрагмента.	35

Алексей Алексенко

Секс с учеными: Половое размножение и другие загадки биологии

Научный редактор: *Александр Марков, д-р биол. наук*

Редактор: *Анна Щелкунова*

Издатель: *Павел Подкосов*

Руководитель проекта: *Александра Шувалова*

Ассистент редакции: *Мария Короченская*

Художественное оформление и макет: *Юрий Буга*

Корректоры: *Елена Барановская, Елена Рудницкая*

Верстка: *Андрей Ларионов*

Иллюстрации: *Олег Добровольский*

Иллюстрация на обложке: *Getty Images*

Фото автора на обложке: *Александр Грабарь*

Все права защищены. Данная электронная книга предназначена исключительно для частного использования в личных (некоммерческих) целях. Электронная книга, ее части, фрагменты и элементы, включая текст, изображения и иное, не подлежат копированию и любому другому использованию без разрешения правообладателя. В частности, запрещено такое использование, в результате которого электронная книга, ее часть, фрагмент или элемент станут доступными ограниченному или неопределенному кругу лиц, в том числе посредством сети интернет, независимо от того, будет предоставляться доступ за плату или безвозмездно.

Копирование, воспроизведение и иное использование электронной книги, ее частей, фрагментов и элементов, выходящее за пределы частного использования в личных (некоммерческих) целях, без согласия правообладателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

© Алексенко А., 2024

© Добровольский О., иллюстрации, 2024

* * *

Алексей
Алексенко

СЕК С УЧЕНЫМИ

Половое
размножение
и другие
загадки
биологии



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

МОСКВА
2024

Предисловие

Главную проблему научно-популярного жанра почти столетие назад точно обозначил Бертран Рассел: «Пересказ глупым человеком того, что говорит умный, никогда не бывает правильным, потому что он бессознательно превращает то, что слышит, в то, что он может понять»¹. Такое замечание могло бы отбить у меня охоту браться за этот проект, но, кажется, не отбило, и вот почему.

Хорошо, конечно, когда каждый рассуждает только о том, в чем он по-настоящему разбирается. Однако я не уверен, что такой идеал осуществим на практике: это сильно бы затруднило диалог между людьми. Люди очень часто, то есть почти всегда, беседуют между собой о том, в чем разбираются очень слабо или даже вообще ни в зуб ногой. С одной стороны, это ужасно: произносятся такие чудовищные глупости, что хоть заткни уши и беги на край света. Но есть и хорошая сторона: у людей возникают вопросы к себе и друг к другу, пробуждается любознательность, возникает интерес к темам, о которых раньше они не задумывались. Если бы не эти беседы невежд, еще неизвестно, где были бы сейчас наука и цивилизация.

Конечно, для научно-популярного жанра все же, наверное, лучше, чтобы хотя бы один из собеседников был настоящим экспертом в теме. Я определенно не эксперт ни в теоретической биологии, ни в популяционной генетике, ни в молекулярных механизмах мейоза, не говоря уже о зоологии или поведении животных. Поэтому сейчас мне придется ответить на важный вопрос: зачем я вообще за это взялся.

Мне кажется, у каждого биолога (а я по первой специальности как раз биолог) есть как минимум два круга тем, которые побуждают его заходиться от восторга. Во-первых, это та более или менее узкая область биологии, в которой ему довелось работать – ставить опыты, писать оригинальные статьи, с умным видом выступать на конференциях перед восхищенными аспирантками. А во-вторых, это то, что я назвал бы «научным импринтингом». Вот что я имею в виду: только что вылупившийся птенец видит яркое пятно на клюве матери-чайки и навсегда отдает этому пятну свое сердце. Он распаивает навстречу этому пятну свой жадный клюв, следует за ним повсюду и вообще не знает в жизни ничего более прекрасного и обнадеживающего. В последующей взрослой жизни яркое пятно уже никак ему не пригодится, но, если бы он когда-то не влюбился в него с первого взгляда, не стать бы ему взрослой чайкой.

Думаю, что у каждого биолога есть такая тема в биологии, которая когда-то приковала его внимание к этой науке, как красное пятно на чайьем клюве. Из-за нее он отказался от куда более блестящих карьерных вариантов и отправился изучать физиологию низших растений, голоса птиц, химию липидов и другие дисциплины, заставляющие всех прочих землян зевать от скуки. В результате наш герой стал биологом, причем совсем не обязательно в той области, которая когда-то покорила его сердце. Но первое увлечение никуда не делось.

В моем случае область узкой профессиональной компетенции – это молекулярная генетика и геновая инженерия грибов. В ней есть много интересных штук, важных для биотехнологии, медицины или сельского хозяйства, но, когда вы начинаете изучать грибы, вы не сможете пройти мимо их полового размножения. На нем стоит большой и важный раздел классической генетики, и на всех биофаках мира студенты проходят практикум, скрещивая штаммы аспергилла или нейроспоры и подсчитывая варианты потомства. Я когда-то получил тройку на аспирантском экзамене по генетике как раз за сексуальные странности грибов, а затем, как ни удивительно, мне привелось лет десять именно этим и заниматься.

¹ A stupid man's report of what a clever man says can never be accurate, because he unconsciously translates what he hears into something he can understand (Russell B. A History of Western Philosophy. New York: Simon & Schuster, 1947).

манием выслушал рассказ о слиянии гаплоидных гамет, в результате которого возникает первая клетка будущего организма, и о том, как хитрому английскому биологу впервые удалось обойти этот этап. Заодно пришлось узнать о митозе и мейозе, половых хромосомах и других увлекательных материях. Конечно, в те пуританские годы обуреваемый гормонами восьмиклассник вздрагивал, увидев в школьном учебнике слова «половое размножение», но, кроме естественной тяги к запретной тематике, здесь было еще и научное любопытство. По крайней мере, задним числом хочется в это верить.

Итак, оба мои излюбленные уголка большой биологии пересекаются на теме полового размножения. Когда я, оставив науку, занялся написанием развлекательных журнальных заметок, оказалось, что читателям тема секса тоже очень нравится. Я же с удивлением обнаружил, что эта тема позволяет как бы походя рассказывать об очень серьезных биологических предметах, про которые в другом контексте никто просто не стал бы читать. И не беда, что многие очень серьезные ученые уже написали прекрасные книги о половом размножении и связанных с ним эволюционных загадках. Я пишу об этом не потому, что знаю что-то, чего не знают другие, а потому, что мне это интересно. Будем считать это беседой дилетантов, в которой, конечно, истину установить не удастся, но зато может появиться любопытство, а то и паратройка вопросов к серьезным ученым.

Ах, вот еще что: в таких предисловиях принято писать о том, кому адресована эта книга, а я, как назло, об этом и понятия не имею. Местами она очень простая, а где-то я и сам едва понимаю, что написал. И еще в ней много отступлений, в том числе и совершенно неуместных мемуаров о моих учителях или о том, какие странности происходили в отечественных и зарубежных лабораториях в 1980–1990-х. Наверное, честнее всего было бы сказать, что мой идеальный читатель – это тот, кому интересно, о чем же мне тут на старости лет вздумалось написать, но таким образом я сведу круг читателей к собственным детям, друзьям и дюжине бывших коллег, что коммерчески нецелесообразно. Поэтому скажем так: в основном все это написано для тех, кто понимает биологию хуже меня. Такие наверняка существуют. Возможно, для тех, кто в целом понимает биологию лучше меня, интерес могут представлять какие-то детали. Не исключено, что подобный воображаемый читатель здесь что-то такое вычитает, задумается, а потом к нему придет совершенно сногшибательная мысль, которая вызовет революцию в науке, но которую сам я и понять-то толком не смог бы. А что, мечтать не вредно!

Если чуть серьезнее, то это написано для тех, кто, возможно, получил базовое биологическое образование или хотя бы помнит многое из школьного курса. Именно поэтому я позволяю себе употреблять слово «мейоз» за сотни страниц до того, как расскажу, что это такое, и вообще ни разу не объяснить, что ДНК, мол, это двойная спираль, а с нее считывается РНК, которая представляет собой матрицу для синтеза белковой цепочки аминокислот, и так далее и тому подобное. Таким образом я притворяюсь, будто обязательное среднее образование живо и действенно. Тот, кто меня за это упрекнет, восстанет тем самым против общепринятой конвенции. В конце концов, вместо того чтобы возмущаться, всегда можно тайком воспользоваться гугл-поиском, а то и просто пропустить непонятные места.

Похожий принцип использован и в составлении списка литературы. Кто-то может пожаловаться, что он вопиюще неполон. Мне же кажется, что список цитированной литературы из тысячи пунктов в научно-популярной книге выдает желание автора казаться важнее, чем он есть. Меньше всего хотелось бы, чтобы кто-то использовал эту книгу для составления курсовой или, боже упаси, дипломной работы. Я категорически отказываюсь содействовать таким образом системе высшего образования в ее дальнейшей деградации. Поэтому после каждой главы приводится минимальное количество ссылок – в основном на книги и научные обзоры, а на оригинальные исследовательские работы – только в том случае, если они подробно обсуждаются в тексте. В этих обзорах и статьях всегда есть свои списки литературы, и эта ниточка рано

или поздно приведет любознательного читателя к полному владению предметом (каковым я сам похвастаться не могу).

Кому-то из читателей при чтении книги местами может показаться, что он уже когда-то читал нечто похожее. Ничего удивительного: я использовал многие из текстов, опубликованных мной с 2013 по 2020 год в научно-популярной рубрике портала snob.ru. Кроме того, в 2022 году там же публиковались первоначальные черновые варианты некоторых глав. При подготовке печатной книги оказалось, что эти тексты изобилуют ошибками, неточностями, натяжками, неумными аллюзиями и отвратительно развязными разговорными оборотами. При попытке от всего этого избавиться получился совсем другой текст, хотя, боюсь, вышперечисленного мусора в нем осталось тоже немало. Надеюсь на снисходительность и искренне желаю, чтобы эта книга если не принесла пользу, то хотя бы никому не навредила.

Часть первая

Двойная цена

При половом размножении у каждого ребенка два родителя, а если размножаться клонированием или почкованием, то достаточно одного. Первая часть книги – о том, как великие генетики XIX и XX веков пытались объяснить эту расточительность природы и заодно создали новую область науки.

Глава первая, в которой читатель встретит стадо несуществующих слонов *Дарвиновский отбор*

Самое интересное во Вселенной – это жизнь. Возможно, такое мнение продиктовано моей предвзятостью как живого существа: возможно, и для нейтронной звезды нет в мире ничего увлекательнее, чем нейтронные звезды. Однако я все же надеюсь, что здесь есть и объективное зерно. В конце концов, «интерес» – это человеческое свойство, и у нейтронных звезд ничего подобного, скорее всего, просто не бывает.

Что такое жизнь, мы тут даже задумываться не станем, чтобы не сломать себе голову, но понятно, что ее главное свойство – размножение. И не только потому, что, сколько ни создавай жизнь заново, она всякий раз исчезала бы, не умей живые существа размножаться. Есть и второй аргумент: если бы не размножение, жизнь не могла бы меняться, совершенствоваться и порождать все более интересные штуки. Первым это ясно сформулировал Чарльз Дарвин, и, по мнению весьма знаменитого британского биолога Ричарда Докинза (род. 1941), это, возможно, самое главное открытие, которое до сего дня сделала человеческая цивилизация. Если, говорит Докинз, к нам прилетят мудрые трехглазые инопланетяне с щупальцами, то первое, что они спросят: «Ну как вы тут? Эволюцию уже открыли?» Поэтому наши рассказы о половом размножении уместно начать именно с Чарльза Дарвина. Чарльзу Дарвину мы обязаны открытием естественного отбора, а уж отбору, в свою очередь, всем разнообразием жизни на планете, включая автора этой истории и его внимательного, неторопливого читателя.

Рассказ о дарвиновской идее эволюции нередко начинают с галапагосских вьюрков: британский естествоиспытатель якобы пристально разглядывал их клювы во время своего путешествия на корабле «Бигль», и эти вьюрки оказали на него такое же просветляющее действие, как легендарное яблоко на Исаака Ньютона. Можно понять тех далеких от биологии читателей, кто полагает, что нет на свете ничего скучнее галапагосских вьюрков и их разнообразных клювов. Несложно понять и биологов, возмущенных подобным равнодушием к птичкам. К счастью, нам пока можно обойтись без вьюрков. Вероятно, путь Чарльза Дарвина к фундаментальной идее эволюции все же начался не столько с частных примеров различных адаптаций, сколько с другой общей биологической концепции. А именно как раз с размножения.

Известно, что по возвращении в Англию Дарвин внимательно ознакомился с «Опытом о законе народонаселения» Томаса Мальтуса. Идеи Мальтуса можно приблизительно суммировать следующим образом.

1. При наличии доступных ресурсов все живое – хотя Мальтус говорил только о человеческом обществе – неограниченно размножается по экспоненциальному закону: прирост пропорционален численности.

2. Этот рост ограничен конечностью ресурсов, за которые начинает конкурировать растущее население. Мальтус употребил здесь термин «борьба за существование». На практике такая «борьба» означает для людей всевозможные бедствия: нищету, голод, эпидемии и войны. Этот неприятный вывод обычно и имеют в виду, когда говорят о мальтузианстве, но обратим внимание на то, что идея Мальтуса была чуть шире банального тезиса «все очень плохо и станет еще хуже». Он был серьезным ученым, а не болтуном.

О том, что такое экспоненциальный рост, многие знают на примере бородатой арифметической притчи об изобретателе шахмат. Этот мудрый восточный человек якобы попросил своего правителя вознаградить его за такую прекрасную игру, положив на первую клетку шахматной доски одно рисовое зерно, на вторую – два, на третью – четыре и так далее – на каждой следующей клетке число зерен удваивалось. Глупого правителя ожидало горькое разочарова-

ние, потому что на последнюю клетку ему пришлось бы положить около полутриллиона тонн риса – это примерно в тысячу раз больше, чем мировое производство в 2021 году.

На примере этой задачи-притчи детям объясняют страшную силу экспоненциального роста: когда что-то вроде бы спокойно удваивается через равные промежутки времени, то стоит ждать беды, потому что и глазом моргнуть не успеешь, как оно начнет расти катастрофически быстро.

Собственно, для экспоненциального роста величине даже не нужно непременно удваиваться. Давайте слегка модифицируем шахматную притчу: на первую клетку положим рисовое зернышко, на вторую – рисовое зернышко и еще $1/33$ его часть, и так далее. Количество риса теперь будет прирастать каждый раз всего на 3% , как на некоторых банковских депозитах. Однако и в этом случае катастрофа столь же неминуема, просто ждать ее придется чуть дольше. В случае шахматной доски при трехпроцентном приросте те же полтриллиона тонн риса получатся, если вместо обычной доски 8×8 взять доску побольше – 40×40 клеток.

Таким образом, дело не в удвоении: ситуация непременно пойдет вразнос, если прирост какой-то величины пропорционален самой этой величине. Это и есть строгое определение экспоненциального роста. И именно по такому закону размножается все живое: чем этого живого больше, тем, естественно, больше у него рождается детишек.

Самый ошеломляющий пример мощи экспоненциального размножения дают бактерии. Возьмем, к примеру, микроба, который делится раз в 15 минут. Именно с такой скоростью способен размножаться самый многочисленный обитатель человеческого кишечника – кишечная палочка, если посадить его в колбу со свежей питательной средой и взбалтывать, чтобы ему легко дышалось. Если бы бактерия могла поддерживать такой темп, суммарная ее масса уже на вторые сутки превзошла бы массу нашей планеты. На что похожа такая гора кишечной палочки? Яркий зрительный образ несложно сформировать, если вспомнить, что этот почтенный микроб составляет значительную долю массы человеческих фекалий.

Лавинообразный рост микробов способен поразить даже самое косное воображение. Наверное, именно поэтому некоторые противники дарвинизма – а таких до сих пор немало, даже и среди сравнительно образованных людей, – готовы признать, что в огромных массах размножающихся бактерий могут происходить всякие чудеса, вплоть до направленной эволюции путем естественного отбора. Но может ли это относиться к нормальным живым существам – людям, медведям или слонам, которые никого не шокируют темпами своего размножения, а просто живут и понемногу плодятся, как могут? Они, наверное, были созданы сразу готовыми?

Хорошо, давайте посмотрим, как обстоят дела на этом конце шкалы, – слоны так слоны, тем более что и сам Дарвин в «Происхождении видов» выбрал в качестве одной из иллюстраций именно их. Возьмем типичную пару слонов. Слониха начинает рожать примерно в возрасте десяти лет и за следующие сорок лет своей жизни способна принести десять слонят. Из этих слонят пятеро – слонихи, и они тоже в свой срок дадут потомство. Простой расчет показывает, что не пройдет и пятисот лет, как суммарное потомство одной пары слонов должно перевалить за миллион. Но столько слонов на Земле нет и вроде бы никогда не было; более того, их популяция вообще не растет. А значит, этот волшебный сценарий никогда не реализуется. Из миллиона наших воображаемых слонов сей скорбный мир посетят только два. Какие именно два? Те, которых природа выберет из целого миллиона нерожденных. Если выбор этот хоть чуть-чуть не случаен, концепция эволюции путем естественного отбора приобретает живой и наглядный смысл. 999 998 нерожденных слонов – колоссальный капитал, которым природа может, если ей заблагорассудится, оплатить некоторые улучшения у тех слонов, которые выживут.

Видимо, примерно это и вычитал у Мальтуса Дарвин и так описал в своей «Автобиографии»:

«В октябре 1838 года, то есть через пятнадцать месяцев после того, как я начал свое систематическое исследование, мне случилось для забавы прочесть Мальтуса "О народонаселении", и поскольку своими долгими наблюдениями за животными и растениями я был вполне подготовлен к тому, чтобы оценить идею "борьбы за существование", продолжающейся повсюду, мне сразу стало ясно, что при таких обстоятельствах благоприятные вариации будут иметь тенденцию сохраняться, а неблагоприятные – уничтожаться. Результатом этого будет образование новых видов».

Да, в литературе XIX века было принято выражаться вот настолько витиевато и сложно-сочиненно. В своем дневнике в записи от 28 сентября 1838 года Дарвин сказал то же самое куда более образно и ярко: «Можно сказать, что существует сила, подобная сотне тысяч клиньев, которые вбивают всевозможные адаптации в каждый зазор экономики природы – или, скорее, сами создают такие зазоры, выдавливая слабейших» (One may say there is a force like a hundred thousand wedges trying to force every kind of adapted structure into the gaps in the economy of nature, or rather forming gaps by thrusting out weaker ones).

Если вашу фантазию пробудило миллионное стадо несуществующих слонов, промелькнувших на горизонте повествования, возможно, идеи Дарвина больше не будут казаться вам такой уж нелепой натяжкой. Все пароксизмы человеческого невежества вроде креационизма и тому подобных нелепостей происходят, видимо, только от недостатка воображения.

Тут, наверное, можно сделать небольшое отступление, раз уж мы никуда не спешим. Недостаток воображения действительно часто мешает пониманию научных теорий, но само по себе воображение не решило еще ни одну проблему. Возможно, воображение подсказывает вам, что если в каждом поколении тщательно отбирать самых лучших слонов, то со временем слоны изменятся к лучшему. Так думал и Дарвин, но, чтобы превратить интуицию в научную теорию, неплохо бы доказать, что в природе выбор двух выживших слонов из миллиона хотя бы отчасти не случаен – то есть зависит от признаков, способных наследоваться. А кто сказал, что это так? Роль слепого случая в жизни слонов исследована из рук вон плохо, а во времена Дарвина и про наследуемость признаков мало что было известно. Чуть позже мы поговорим о том, насколько меняет дело то обстоятельство, что выживание одного слоненка, а не другого может быть и вполне случайным. Имена американского генетика Сьюэла Грина Райта, а также японского ученого Мотоо Кимуры, которые всерьез рассмотрели такую возможность, еще непременно встретятся в нашем рассказе. Но сейчас не время углубляться в дебри эволюционной теории – мы все-таки едва-едва перевалили через середину первой главы. Пока в сухом остатке повествования лишь огромная сила экспоненциального закона размножения и таящиеся в ней возможности.

Итак, сама возможность экспоненциального роста популяции слонов хотя и никогда не реализуется на практике, зато открывает путь всяким чудесам. Пара слонов размножается, некоторые слонята гибнут, другие доживают до половой зрелости, любят друг друга и рожают собственных слонят, так что суммарное число слонов в этой местности не увеличивается. Стало быть, среднее число потомков в каждом поколении остается равным двум. Допустим, другая пара слонов размножается чуть-чуть эффективнее – всего-то на 3#, так что в каждом следующем поколении среднее число потомков равно 2,06. Фокус с трехпроцентным приростом мы уже показывали в прошлой главе на примере шахматной доски, так что несложно догадаться, к чему это приведет. За двести пятьдесят поколений – примерно столько сменилось на протяжении писаной истории человечества – суммарное потомство второй пары превысит число потомков первой пары в миллион раз.

Поскольку мы договорились, что численность слонов не увеличивается, то эта цифра может означать только одно: с огромной вероятностью никаких потомков первой пары вообще не останется. Это и есть отбор. А наши взятые с потолка 3# (или 0,03) – это та величина, которую биологи-эволюционисты называют коэффициентом отбора. Если вероятность оста-

вить потомство у вас всего на 3# больше, чем у соседа, и если эта повышенная вероятность перейдет по наследству к вашим слонятам, то вы одержали блистательную эволюционную победу: за несколько тысяч лет ваши потомки наследуют землю, а соседские канут в небытие. Вот насколько беспощадно действуют эти «клинья», о которых так вдохновенно рассуждал Чарльз Дарвин.

Зачем мы так долго говорим тут об этих слонах? Во-первых, они милые, большие и серые, так что рассуждать о них одно удовольствие. Во-вторых, мне показалось важным, чтобы понятие «естественный отбор» ассоциировалось с каким-то ярким образом, питающим не только рассудок, но и фантазию. Это нужно потому, что в дальнейшем мы будем иногда задаваться вопросом: «Как могло получиться, что такое-то или такое-то свойство организма было поддержано отбором? Почему отбор давным-давно не избавился от такой-то и такой-то, казалось бы, бессмысленной и вредной чепухи?» Чтобы читатель не просто скользил глазами по подобным ламентациям, а честно изумлялся и вместе с биологами лихорадочно искал ответ, мы и начали с этого небольшого отступления. Если что-то в биологии не согласуется с идеей отбора, то с этим надо срочно разбираться – наверняка мы упускаем что-то очень важное, а то и вообще ничего не понимаем в обсуждаемом вопросе. Великий генетик Феодосий Добржанский сформулировал ту же мысль так: «Ничто в биологии не имеет смысла, кроме как в свете эволюции».

В следующей главе мы доберемся до первого из таких вопросов.

БИБЛИОГРАФИЯ

Дарвин Ч. Р. Происхождение видов / Пер. К. Тимирязева, М. Мензбира, А. Павлова. – М.: АСТ, 2020.

Жуков Б. Б. Дарвинизм в XXI веке. – М.: АСТ, 2020.

Dawkins R. *The Blind Watchmaker*. London: Norton & Company, 1986. (Докинз Р. Слепой часовщик / Пер. А. Гопко. – М.: АСТ, 2015.)

Dawkins R. *The Greatest Show on Earth: The Evidence for Evolution*. London: Free Press: Transworld, 2009. (Докинз Р. Самое грандиозное шоу на Земле. Доказательство эволюции / Пер. Д. Кузьмина. – М.: Астрель: Corpus, 2012.)

Malthus T. R. *An Essay on the Principle of Population*. London, 1798. (Мальтус Т. Р. Опыт закона о народонаселении / Пер. И. А. Вернера. – М., 1895.)

Schwartz J. S. Charles Darwin's Debt to Malthus and Edward Blyth. *Journal of the History of Biology*. 1974. 7(2): 301–318.

Глава вторая, в которой улитки дорого заплатили за свои глупости «Двойная цена» полового размножения

Наша слоновья история начинается не с одинокого слона, а именно с пары, потому что у слонов так повелось, что для размножения слону надо встретить свою половинку. Среди рожденных в этом слоновьем семействе слонят примерно половину составят мальчики: они никак слонят рожать не могут в принципе, их функция – просто любить слоних. Точно так же это устроено у подавляющего большинства животных. Вообразите теперь, что у слонов возникла одна из тех «адаптаций», о которых упомянул Дарвин: слоны-девочки нашли способ рожать без участия слонов-мальчиков, причем все их детишки тоже оказываются слонихами. Полезна ли такая адаптация? Еще как: коэффициент ее отбора будет равен не жалким 3#, а целым ста – ведь теперь все их потомки обретут способность рожать слонят, а не половина. Другими словами, эмансипированные слонихи будут размножаться вдвое эффективнее. Таким образом, за удовольствие заниматься любовью слоны платят огромную эволюционную цену, снижая эффективность своего размножения вдвое!

Совершенно ясно, что такое расточительство абсолютно невозможно в той картине природы, которая полтора столетия назад открылась Чарльзу Дарвину. Здравый смысл подсказывает, что любой слон, воробей, динозавр или рыба, которым за сотни миллионов лет удалось бы научиться не платить за секс двойную цену, должны были бы давным-давно завоевать планету и занять своим потомством все экологические ниши. Однако же это отчего-то не произошло – а значит, секс таит в себе несказанные преимущества, которых мы, в наших жалких попытках все упростить и свести к школьной арифметике, просто не видим.

Впрочем, тут хитрый читатель легко мог бы поймать автора на передергивании. Так ли мы хорошо понимаем быт слонов, чтобы быть уверенными в эволюционном преимуществе стада слоних-амазонок? Может быть, слонятам никак нельзя без папы и это сиротство обошлось бы им куда дороже, чем «двойная цена» секса?

Биологи-теоретики чуть меньше тяготеют к абстракциям, чем, к примеру, физики, но тоже этим грешат: все наши рассуждения относятся к неким «сферическим слонам в вакууме». Когда вы начинаете рисовать на листе бумаге схемы, желая разобраться в тонкостях полового размножения, вы и сами не заметите, как умные серые животные превратятся у вас в некие округлые мешки с генами. Половое размножение в этой модели будет выглядеть так: два мешка с генами слились в один, гены перемешались, потом один мешок опять разделился на два, со случайным набором генов в каждом. Здесь, конечно, не очень понятно, почему бы ему не разделить сразу, без этого слияния-перемешивания, и именно в такой форме обдумывали эту проблему генетики и эволюционисты большую часть XX века. Но если вы замените эти мешки с генами обычной парой живых ворон, вопрос снимется сам собой. Если какая-то ворона-мама вздумает вывести птенцов без участия вороны-папы, ее ждет полное фиаско: птица умрет с голоду еще на стадии высиживания яиц, поскольку именно будущий отец в это время приносит ей еду, а если мама чудом выживет, то не сможет в одиночку выкормить птенцов. Другими словами, мутация к бесполости не принесет вороне – да и большинству других птиц – ровным счетом никакого эволюционного преимущества.



Я не уверен, что подобные спекуляции этически допустимы, однако такой мысленный эксперимент был бы еще нагляднее в случае человеческого общества. Будет ли обладать эволюционным преимуществом мутация к бесполому размножению у человека? Девушка, получившая в дар от природы способность беременеть просто так, без всякого внешнего повода, скорее всего, станет большой проблемой для медиков и/или социальных служб. Хотя, конечно, романтические фантазии о новом продвинутом разумном виде вроде «Славных Подруг» из романа братьев Стругацких «Улитка на склоне» тоже имеют право на существование.

Читатель, которого не шокируют такие рассуждения, может додумать все детали самостоятельно, а мы из деликатности вернемся к воронам. Их коллизию можно перевести на сухой язык эволюционной теории следующим образом: наличие двух родителей дает птенцу преимущество, значительно превосходящее стопроцентную плату за секс. Если вороний родитель всего один, у снесенного им яйца нет вообще никаких шансов превратиться в ворону и передать по эстафете свои гены. Но, с другой стороны, может быть и так, что плата за секс окажется даже больше «двойной цены»: добавим в уравнение, к примеру, каких-нибудь смертельно опасных паразитов, передающихся половым путем. А сколько – дополнительно к «двойной цене» – платят за секс цветковые растения, вынужденные обеспечивать дорогостоящим сладким нектаром сонмы насекомых-опылителей?

Таким образом, «двойная цена» – это, конечно, абстракция. Тем не менее мы не можем бесконечно отмахиваться от общего парадокса частными примерами, сколько бы таких примеров ни было у нас в запасе. Секс – универсальное свойство сложных организмов на этой планете. Даже если многим из них он ничем не вредит, а только помогает, это не снимает большого вопроса: «Какое общее свойство жизни подтолкнуло всех нас на этот путь?» На самом деле здесь есть два разных вопроса. Первый из них мы неявно задали, приводя примеры с воронами и девушками: «Почему среди существ, размножающихся половым путем, не распространяются триумфально мутации к бесполости?» Из наших примеров следовало, что для некоторых из них такая мутация не сулит никаких выгод. С этим никто особенно и не спорит. При этом у других организмов, и имя им легион, подобные мутации очень даже случаются, и бесполое население оказываются вполне успешными (примеры мы рассмотрим чуть позже).

Но есть и второй вопрос, на который придется ответить, если мы хотим узнать, откуда на планете взялось половое размножение. Как этот самый секс мог возникнуть в первоначально бесполой популяции? Почему эксперимент не был немедленно задушен в зародыше и ранние сексуальные экспериментаторы не оказались вытеснены в небытие своими бесполоыми родственниками, а, наоборот, завоевали мир? Здесь не отделаешься ссылкой на социальные установления вроде совместного выкармливания птенцов или планирования семьи, которые наверняка возникли существенно позже. Природа не загадывает наперед: чтобы выжить в неопределенном будущем, в первую очередь совершенно необходимо выжить здесь и сейчас, а там видно будет. Очевидно, что тем, кто первым добровольно снизил эффективность размножения вдвое, выжить было ох как непросто.

Если почаще вставлять в свою речь слово «очевидно» и для пущей убедительности делать широкие движения руками, еще можно как-то завоевать доверие дилетантов, но с учеными такое не проходит: им нужны строгие доказательства. В том, что касается «двойной цены» секса, такое доказательство предложил английский биолог Джон Мейнард Смит (1920–2004). С юношеских лет у Мейнарда Смита было два больших увлечения: теория эволюции и марксизм. Последнее привело его в ряды Коммунистической партии Великобритании, а первое – в лабораторию Джона Холдейна (1892–1964), тоже коммуниста, который еще появится в нашем повествовании. Возможно, юный Мейнард Смит питал некие иллюзии о возможности обоснования марксистского учения на базе эволюционной теории – об этом можно судить по тому, что позже он, согласно некоторым свидетельствам, назвал подобные фантазии «бесплодными», а какой смысл рассуждать о фантазиях, если сам никогда их не фантазировал?

Разочарование Мейнарда Смита в коммунизме наступило в 1956 году, после подавления советскими войсками восстания в Будапеште. А уже в 1960-х Мейнард Смит опубликовал первые работы по теоретической биологии, в которых применил математическую теорию игр к эволюционным процессам. В 1970-х именно он первым произнес слова «двойная цена» в отношении секса – точнее, он говорил о «двойной цене самцов». И не просто произнес, а построил модель, доказывающую, что эту самую «двойную цену» действительно должна платить популяция организмов, по каким-то причинам вздумавшая практиковать половое размножение.

При всей неотразимой убедительности теории Мейнарда Смита всем очень хотелось бы подтвердить ее экспериментально: найти какое-нибудь живое существо, способное к половому размножению, но умеющее обходиться и без него, чтобы в точности подсчитать ущерб, наносимый сексом. Такую попытку предпринял Кертис Лайвли из Университета Индианы. У Лайвли, как и у Мейнарда Смита, два главных увлечения. Первое, как можно догадаться, – проблема происхождения и биологического смысла полового размножения. А второе – миниатюрная улитка *Potamopyrgus antipodarum* (в приблизительном переводе «речная башенка с другой стороны Земли»). Именно эта улитка, с особенностями жизни которой Лайвли познакомился в 1980-х годах, во время работы в Университете Кентербери в городе Крайстчерче, Новая Зеландия, дала ему возможность экспериментально проверить целый ряд гипотез, пытавшихся объяснить распространенность полового размножения среди всевозможных форм земной жизни.

В 2016 году дело дошло и до модели «двойной цены» Мейнарда Смита. Большинство «речных башенок» составляют популяции самок, рожденных другими самками в результате партеногенеза (так по-научному называется «непорочное зачатие», когда существо женского пола воспроизводит себе подобных без участия самца). Однако некоторая часть популяций улиток держится за традиционный уклад, то есть использует для размножения самцов. Вникнув в повседневную жизнь разных популяций улиток, Лайвли не только смог убедиться, что партеногенез дает преимущество в скорости размножения, но и оценил это преимущество количественно. Оно оказалось значительно меньше двух, что, конечно, доставило доктору Лайвли некоторое разочарование, прежде чем он догадался, что и у Мейнарда Смита все не так просто. Согласно модели, двойное преимущество возникает только в начальный момент, когда самые первые особи приобретают способность к бесполому размножению среди популяции, размножающейся половым путем, а популяции новозеландских улиток жили вполне стабильно в окружении себе подобных. Тогда Лайвли применил некую математику, чтобы пересчитать данные на воображаемый момент «первой мутации к бесполости», и результат был впечатляющим: коэффициент в точности равнялся двум.

Итак, «двойную цену» за секс приходится платить как в теории, так и на практике. Если, несмотря на это, идея полового размножения была с таким восторгом поддержана земной биосферой, это значит, что секс обладает какими-то преимуществами, дающими возможность выиграть в эволюционной гонке даже при такой огромной форе. О том, что это за преимущества, в XX веке спорили самые умные биологи человечества. Попробуем разобраться, что интересного они смогли предложить.

БИБЛИОГРАФИЯ

Colegrave N. The Evolutionary Success of Sex. *Science & Society Series on Sex and Science. EMBO Reports*. 2012. 13(9): 774–778.

Gibson A. K., Delph L. F., Lively C. M. The Two-Fold Cost of Sex: Experimental Evidence from a Natural System. *Evolution Letters*. 2017. 1(1): 6–15.

Meirmans S., Meirmans P. G., Kirkendall L. R. The Costs of Sex: Facing Real-World Complexities. *The Quarterly Review of Biology*. 2012. 87: 19–40.

Ridley M. *Evolution*. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 1996.

Smith J. M. *The Evolution of Sex*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. (Смит Дж. М. Эволюция полового размножения / Пер. А. Д. Базыкина. – М.: Мир, 1981.)

Smith J. M. *The Origin and Maintenance of Sex*. In: G. C. Williams, ed. Chicago: Group Selection; Aldine Atherton, 1971. P. 163–175.

Глава третья, в которой рассмотрена роль секса в жизни Льва Николаевича Толстого *Рекомбинация*

В предыдущей главе у нас промелькнуло следующее описание полового размножения, если отвлечься от всех сложностей и свести многообразие жизни к удобной абстракции: «два мешка с генами слились в один, гены перемешались, потом один мешок опять разделился на два, со случайным набором генов в каждом». Хватило всего пары строк, и если уж в таком небогатом материале приходится искать разгадку преимуществ секса, то вполне логично ухватиться за это самое перемешивание генов.

Занудство требует отметить, что «мешки с генами» существуют разве что у некоторых простейших (для тех, кто в теме: классическим мешком с генами является макронуклеус инфузорий, хотя именно он-то в сексе никак не участвует). Такие абстракции еще были прощательны для первых биологов, размышлявших о смысле секса, потому что тогда о генах не знали толком ничего: это что-то такое внутри, что наследуется и определяет разные признаки. С тех пор стало ясно, что гены – это на самом деле отдельные участки большой молекулы ДНК, которая образует хромосому. Хромосом у организма может быть несколько, и при половом размножении они действительно случайно перемешиваются, а гены, находящиеся в одной хромосоме, часто передаются потомкам вместе – они, как выражаются генетики, сцеплены.

Однако – и это серьезный аргумент в пользу того, что мы наконец нащупали что-то важное, – природа, похоже, специально позаботилась о том, чтобы абстракция «случайного перемешивания» как можно точнее описывала реальность. Любой генетик-экспериментатор, который когда-нибудь скрещивал разные организмы, подтвердит вам, что опытным путем обнаружить сцепление генов не так уж просто. Даже если гены находятся на одной хромосоме, но достаточно далеко друг от друга, в потомстве они нередко ведут себя так, как будто их наугад вынимали из пресловутого мешка. За этот эффект отвечает специальный механизм, который называют *рекомбинацией*. С подробностями о том, как это происходит, придется подождать пару десятков глав, но этих подробностей не знали и классики, идеи которых мы сейчас пытаемся понять. Так что начнем с простых примеров – а именно перейдем наконец к обещанной теме этой главы, Льву Николаевичу Толстому.

Идея бесцеремонно использовать великого писателя для иллюстрации биологических идей принадлежит не мне – к ней в далеком 1979 году прибежал мой преподаватель, несравненный Алексей Павлович Акифьев (1938–2007). Именно с этого примера он начинал свой рассказ о генетической рекомбинации и кроссинговере. Среди прочих влияний Алексея Павловича на мое мировоззрение следует отметить также его присказку «Сложность жизни неизмерима», которой он отвечал на вопросы студентов, когда не знал точного ответа.

Итак, у классика русской литературы было тринадцать детей, из них восемь достигли зрелости, и к началу XXI столетия они произвели около трех сотен потомков. Эти потомки проживают в России, Швеции, Германии, Франции и США, среди них есть ученые, бизнесмены, писатели и политики. Некоторые носят бороды. Но вот чего среди нет, так это ни одной копии Льва Николаевича Толстого. И причина этого досадного факта именно в рекомбинации.

Рекомбинация – это то, что происходит в результате секса. В общих чертах процесс выглядит так: две клетки, мамина и папина, встречаются и сливаются друг с другом. Затем сливаются их ядра. На этой стадии мамины и папины хромосомы в клетке перемешаны, но никак не взаимодействуют между собой. Однако перед тем, как дать начало следующему поколению, происходит еще кое-что важное: похожие (по-научному выражаясь, гомологичные) хромосомы папы и мамы находят друг друга, слипаются по всей длине, а затем разрываются в одинако-

вых местах и соединяются крест-накрест. Такое событие – результат рекомбинации двух хромосом – называется *кроссинговером*. К концу этого рандеву никаких папиных и маминых хромосом в клетке больше нет, а есть мозаичные – состоящие из маминых и папиных кусочков. В результате два гена, проживавшие на одной хромосоме, могут расстаться и продолжить свой жизненный путь на разных.

Рекомбинацию наблюдают генетики, когда скрещивают разные организмы. Началось все это еще при Грегоре Менделе (1822–1884). Вероятно, все помнят большую таблицу из школьного учебника, где расписано, что случится, если скрестить растение гороха с желтыми и гладкими семенами с растением, у которого семена зеленые и морщинистые. Многим взрослым людям иногда снятся кошмары, в которых им пришлось вернуться в школьный класс, и из милосердия к их психологической травме мы не станем здесь еще раз описывать менделевское двухфакторное скрещивание. Для нашей истории важно, что в результате во втором поколении появится горох, не похожий ни на одного из родителей, – зеленый и гладкий, а также желтый и морщинистый. Это значит, что гены желтизны и гладкости у потомков перемешались. Конкретно эти два гена так хорошо перемешались у Менделя просто потому, что они на разных хромосомах. Но вот гены окраски цветков и формы семян у гороха находятся на одной и той же хромосоме – на первой, однако Мендель этого не заметил: признаки все равно наследовались независимо. Генетическое сцепление – то есть отклонение наследования от законов Менделя из-за того, что некоторые гены физически объединены на одной хромосоме, – было обнаружено у гороха только в начале XX века. И это именно потому, что генетическая рекомбинация очень хорошо умеет разрушать сцепление генов и помогает им наследоваться «как бы независимо», вводя в заблуждение даже столь въедливых экспериментаторов, как монах-августинец из Брно. Скажем больше: она делает это так хорошо, как будто специально для того и предназначена. Неудивительно, что когда генетики впервые задумались о смысле секса, то сразу же заподозрили, что перетасовка генетических признаков и есть самое главное, ради чего все затевается.

Процесс, в результате которого гены родителей перемешиваются и расходятся к разным потомкам, называется *мейоз*, и он бывает далеко не у всех организмов на планете: бактерии, к примеру, ничего такого делать не умеют (хотя рекомбинация у них тоже бывает, но при совершенно других обстоятельствах). Однако все, кто умеет, – а это все организмы, у которых в клетках есть ядро, то есть *эукариоты*, – проделывают это на удивление похожим образом. Инфузории, елки, жирафы, пауки, грибы и папоротники отличаются друг от друга лишь деталями процесса. Краткое содержание мейоза таково: в диплоидной клетке родительские хромосомы меняются участками, а потом расходятся по разным клеткам, которые вновь становятся гаплоидными.

Тут надо слегка задержаться, чтобы объяснить сложные слова. *Гаплоидными* – то есть несущими одинарный набор хромосом – были клетки мамы и папы, которые слились, то есть *гаметы*, а также клетки, получившиеся в результате мейоза. А вот клетка, получившаяся при слиянии маминой и папиной, – она называется *зиготой* – *диплоидная*, потому что каждая хромосома у нее представлена в двух копиях. Так это и продолжается без конца – гаплоид, диплоид, опять гаплоид, и так далее. Но дело в том, что разные организмы привыкли делать паузу в определенных точках этого цикла. Одним нравится после слияния клеток как можно скорее снова стать гаплоидом. Таким образом, большую часть своей интересной жизни эти существа проводят с единственным набором хромосом, в которых перемешаны папины и мамины гены. Так живут, к примеру, многие грибы. Другие – например, плауны – предпочитают прервать этот цикл два раза: после слияния ядер и после уменьшения числа хромосом. В каждой из пауз они занимаются своими интересными делами. Таким образом, получается две совершенно разные жизненные формы плауна, гаметофит и спорофит, кардинально различающиеся образом жизни. Гаметофит с одиночным набором хромосом (то есть

гаплоидный) годами живет под землей, в тесном союзе с грибами. А диплоидный спорофит – симпатичное наземное растение.

Есть и причудливые варианты. Паразит кукурузы гриб пузырчатая головня самую интересную и долгую часть своей жизни проводит в фазе после слияния клеток, но до слияния ядер – по каким-то причинам это показалось ему удобным. Так и живет он с мамиными и папиными ядрами в гифах грибницы неопределенно долго, а потом ядра сливаются, и цикл быстро завершается образованием гаплоидных (то есть имеющих одинарный набор хромосом) спор.

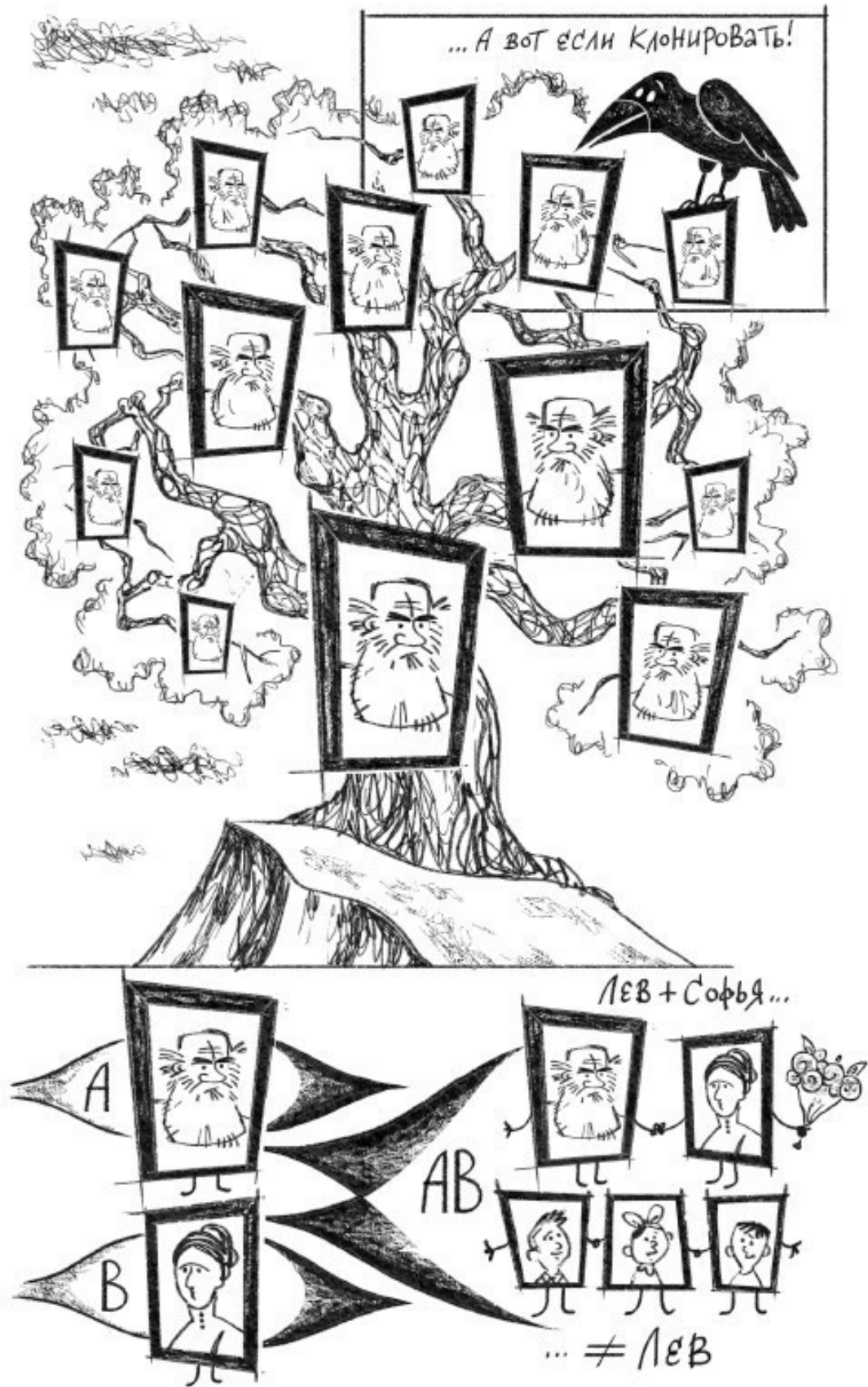
Ну и, наконец, самые важные и заметные живые существа – высшие животные и растения – делают паузу в своем половом цикле после слияния ядер. Таким образом, всю свою жизнь они проводят с двумя наборами хромосом: один от папы, один от мамы. За это их называют диплоидными. Затем происходит перетасовка генов (кроссинговер), образуются половые клетки, вскоре они сливаются, и цикл начинается вновь.

Именно так все и происходило у Льва Николаевича Толстого. Каждый сперматозоид Льва Николаевича нес в себе ровно половину его диплоидного генома. За всю его жизнь тринадцать сперматозоидов слились с тринадцатью яйцеклетками его супруги, так что следующему поколению перешло тринадцать половинок генома писателя.

Затем у его детей произошло то, что мы описали чуть выше: в некий важный момент их жизни хромосомы Льва Николаевича и Софьи Андреевны прильнули друг к другу по всей длине и обменялись своими участками. Папины и мамины гены перетасовались друг с другом, образовав совсем не те комбинации, которые были у их родителей. Кроссинговер повторялся в каждом новом поколении Толстых с добавлением теперь уже генов их жен и мужей. Таким образом, даже если нам вздумается скрещивать потомков Толстого между собой – а один такой брак между правнуками в действительности произошел, – восстановить ту единственную комбинацию генов, которая позволяет написать «Войну и мир», а следом за ней и сказку «Лев и собачка», просто невозможно.

Итак, половое размножение, которому классик отдал дань в своей жизни и творчестве, приводит к тому, что комбинации его генов в потомстве не сохраняются. С одной стороны, это обидно, так как разрушаются удачные комбинации. С другой, видимо, полезно: еще не факт, что Лев Николаевич был бы приспособлен к преподаванию итальянского языка, разведению оленей в Швеции или ведению бизнеса в Калифорнии, а в его потомках такие качества присутствуют. Таким образом, половое размножение создает новые комбинации генов, готовые к завоеванию новых экологических ниш. Среди потомков писателя есть даже господин Петр Толстой, депутат и публицист. Кто мог предсказать, что гены не кого-нибудь, а Льва Толстого можно перетасовать со столь ошеломляющим результатом.

Вообразим теперь, что Лев Николаевич Толстой, находясь под впечатлением от им же написанной «Крейцеровой сонаты», изыскал способ избавиться от постыдной тяги к сексу и научился размножаться почкованием. Точных копий себя самого у него все равно не получилось бы: сейчас уже точно известно, что каждый новорожденный человеческий младенец несет в себе в среднем около семидесяти новых мутаций. Однако интуитивно ясно, что эти маленькие Львовичи все же были бы гораздо сильнее похожи на своего великого родителя, чем потомки их с Софьей Андреевной брака. Из двадцати с лишним тысяч человеческих генов мутагенез за одно поколение способен изменить лишь несколько десятков; в то же время секс и кроссинговер позволяют создать и опробовать в действии новые ансамбли из абсолютно всех генов генома.



Итак, все это нужно для того, чтобы составлять новые комбинации из генов на тот случай, если потомкам придется жить при какой-нибудь новой формации, будь то в палеонтологическом или общественно-политическом смысле? Надо признать, что именно такое объяснение первым пришло на ум ученым. Представление о том, что секс нужен, чтобы опробовать все новые и новые комбинации генов, заворожило генетиков буквально с того момента, как они вообще что-то узнали о генах. Более того, никто не мешал строить гипотезы о роли полового размножения еще до того, как гены вышли на авансцену биологической науки. Чарльз Дарвин, к примеру, о генах еще ничего не знал. Зато он знал о том, что если родители состоят в близком родстве, то потомки нередко оказываются слабыми и больными. С другой стороны, от брака неродственных родителей – например, двух совершенно разных пород собак или двух людей из разных регионов, стран или даже частей света – детишки нередко получаются сильные, ловкие и здоровые. Такой всплеск жизненной силы у отдаленных гибридов давно известен селекционерам (то есть тем, кто занимается искусственным отбором домашних животных и растений, а не теоретизирует о естественном отборе в природе) и называется *гетерозисом*. Разумеется, если потомство обладает повышенной жизнеспособностью, оно с большей вероятностью передаст родительские признаки дальше по цепочке, так что немедленная выгода от скрещивания не подлежит сомнению. Это рассуждение, видимо, убедило Дарвина в том, что в сексе нет никакого парадокса.

Наше уважение к огромному вкладу Дарвина в биологию совершенно не требует думать, что он, обогнав современную ему науку на полстолетия, еще в XIX веке все понимал правильно. Напротив, величие Дарвина в том, что он, фактически еще ничего не понимая, каким-то образом увидел самое главное. В случае гибридного гетерозиса непонимание было налицо: это явление связано не с сексом и рекомбинацией, а с диплоидностью высших организмов. Напомню, что в их клетках есть два набора хромосом, по одному от каждого из родителей. Когда родители не родственники и совсем не похожи друг на друга, их версии одного и того же гена, скорее всего, будут различны (это называется *гетерозиготностью*). А значит, более сильная и здоровая версия способна взять на себя заботу о благосостоянии организма, подменяя версию-инвалида. Собственно, пользоваться этим бонусом можно независимо от секса и диплоидности: к примеру, грибы, в том числе упомянутая выше пузырчатая головня, имеют все преимущества такой диверсификации, просто сочетая в своих гифах два типа родительских клеточных ядер. Конечно, ни о чем подобном Дарвин узнать еще никак не мог.

И все же из этого кажущегося тупика ведет некая тропинка к пониманию. Гетерозис происходит потому, что гены родителей могут быть хуже или лучше, то есть они различны. А различаются они благодаря мутациям. Именно из-за разных мутаций гены отставного поручика Толстого и девицы Софьи Берс изначально были неодинаковы, так что родители хотя бы могли отличать друг от друга своих сыновей и дочерей. Разные мутации добавлялись в этот коктейль и перемешивались в последующих поколениях Толстых, обеспечивая их потомству житейский и репродуктивный успех. В мутациях имело смысл поискать разгадку тайны секса, чем ученые и занимались весь следующий век.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Басинский П. Лев Толстой и его семья. См.: <https://arzamas.academy/courses/47/1>
- Бородин П. М. Генетическая рекомбинация в свете эволюции // Природа. 2007. № 1. С. 14–22.
- Гузева А. Чем занимаются потомки Льва Толстого. См.: <https://rbth.ru/read/1758tolstoy-potomki-nashi-dni>
- Ellis T. H., Turner L., Hellens R. P., et al. Linkage Maps in Pea. *Genetics*. 130(3): 649–663.

Labroo M. R., Studer A. J., Rutkoski J. E. Heterosis and Hybrid Crop Breeding: A Multidisciplinary Review. *Frontiers in Genetics*. 2021. 12: 643–761.

Pulst S. M. Genetic Linkage Analysis. *Archives of Neurology*. 1999. 56(6): 667–672.

Глава четвертая, в которой организм отморозил себе уши назло зародышевой плазме

Изменчивость и мутации

Биология – уникальная наука: история ее стремительного развития началась прямо с открытия самого главного ее закона. Да, речь опять о теории Дарвина. Это примерно как если бы Пифагор для начала открыл теорему Гёделя, а Галилей – квантовую механику, и, только вооружившись этим знанием, их последователи додумались бы до квадратных уравнений и паровых машин. Биология угодила в яблочко, еще ничего толком не зная. Это наложило отпечаток на всю ее историю, включая и размышления о смысле секса. Первые гипотезы о половом размножении оперировали самыми фундаментальными понятиями – мутациями, генами, коэффициентами отбора. На самом деле это было довольно дерзко. Когда мы в нашей истории доберемся до гипотез о происхождении мейоза – о том, в какую передрыгу, возможно, угодил общий предок всей сложной жизни на планете, когда для выживания ему понадобилось столь странное и неочевидное приспособление, – мы убедимся, какой объем информации требуется современным ученым, чтобы не попасть здесь впросак. Те, кто разрабатывал первые генетические теории полового размножения, не знали из этого ровным счетом ничего – они и про ДНК еще не подозревали. Можно лишь восхититься тем, как много они смогли понять.

Пару глав назад я позволил себе слегка иронизировать по поводу «мешков с генами», к которым теоретики нередко сводят неизмеримую сложность жизни. Но хотя это и самонадеянно, зато уж если даже при такой степени обобщения удастся установить какой-нибудь важный закон, то, видимо, этот закон будет описывать абсолютно все варианты живой материи, включая те, что будут обнаружены в окрестностях красных карликов в спиральных рукавах галактики Андромеды. Первые гипотезы о происхождении секса были именно таковы: они претендовали на абсолютную универсальность просто потому, что практически не использовали информацию о частностях нашей земной жизни вроде числа генов в геноме или частоты мутирования. Авторы этих гипотез, величайшие генетики человечества, ничего этого просто не знали.

Первым среди них, наверное, надо назвать немецкого зоолога Августа Вейсмана (1834–1914), который еще не знал даже слова «ген». Роль Вейсмана в истории генетики косвенным образом признали не только его соратники, но и представители враждебного лагеря: советские лжеученые-лысенковцы именовали всех генетиков «вейсманистами-морганистами», тем самым отдав дань заслугам немецкого зоолога. Кстати, вторая часть ругательства связана с именем американского биолога-генетика Томаса Моргана (1866–1945), ставившего опыты с плодовой мушкой и на их основе догадавшегося, как связаны между собой гены и хромосомы. Он появится в нашей истории чуть позже.

На портретах Августа Вейсмана обращают на себя внимание две детали: большая борода, какую в XIX веке было принято носить среди немецких профессоров, и маленькие очки. Обе детали важны для понимания персонажа: будучи немецким профессором, Вейсман писал свои статьи и книги довольно сложным академичным языком, к тому же по-немецки, а потому в наше время, когда международным языком биологии стал английский, его не так уж часто цитируют и не слишком хорошо понимают. Что касается очков, они на нем потому, что Вейсман страдал от прогрессирующей потери зрения. В те периоды, когда зрение улучшалось, Вейсман усаживался за микроскоп и начинал изучать, к примеру, процессы линьки у насекомых или развитие яйца у гидроидных полипов. Наверное, для развития науки это тоже было важно. Но потом глаза опять слабели, и тогда профессор был вынужден заниматься теорией.

Именно этим периодам почти-слепоты человечество обязано его работами, в которых Вейсман впервые собрал в единую систему идеи Дарвина и представления о наследственности.

Терминология Вейсмана показалась бы современному студенту темной и дремучей: там есть «зародышевая плазма», «детерминанты», «биофоры» и совсем уж непонятные «иды» и «иданты» (последние – это, по существу, просто хромосомы). Однако с помощью таких понятий ему удалось нарисовать картину, объясняющую, как работает дарвиновский отбор. В частности, он придал реальный смысл гипотезе Дарвина, согласно которой материалом для отбора служат «маленькие наследуемые изменения». Слово «мутация» в те поры среди биологов уже бытовало, однако его автор, голландский ботаник Хуго де Фриз (1848–1935), придавал ему несколько другой смысл. Тем не менее рассуждения Вейсмана об «изменениях в зародышевой плазме» легли в основу представления о мутациях в самом что ни на есть современном смысле слова. Термин «мутации» уже использовался в нашем повествовании, потому что в XXI веке странно было бы притворяться, будто читателям оно незнакомо. Однако с этого места и далее мы будем пользоваться им на законных основаниях.

Картина мира, которую рисует Вейсман с помощью своего архаичного словаря, на первый взгляд банальна, а на второй бросает серьезный вызов воображению. Дело в том, что многие привыкли думать о своих предках как о череде существ, в свое время ходивших по Земле, радовавшихся солнцу и овеваемых приятным ветерком. На самом деле те клетки, из череды поколений которых в конце концов возникли наши тела, никакого солнышка и ветерка никогда не ощущали. Каждый из нас происходит из яйцеклетки и сперматозоида, созревавших во влажной тьме репродуктивной системы. Но и они, в свою очередь, произошли от яйцеклеток и сперматозоидов, причем от одной оплодотворенной яйцеклетки до другой проходит не так уж много клеточных делений, и все они происходят там же – в мокрой темноте утробы. Наверное, ваш ближайший прямой клеточный предок, которому посчастливилось, как и вам, согреться солнечными лучами, – это икра какого-то земноводного, повисшая нитями на неведомом растении в палеозойском пруду. Другими словами, история жизни клеток зародышевой линии, из которых мы произошли, вообще ничем не напоминает нашу собственную жизнь, к которой мы, по милости естественного отбора, оказались так хорошо приспособлены. Как это получилось, и взялся объяснить теряющий зрение профессор Август Вейсман.

Дело, по его мнению, обстоит так: в зародышевой плазме случайным образом происходят изменения (то есть мутации). Зародышевая плазма дает начало соматическим клеткам организма, и от того, насколько удачными были мутации, зависит, насколько успешен будет организм в жизни и дальнейшем размножении. Организм (или «сома»), согласно Вейсману, может влиять на зародышевую плазму единственным образом: умереть, не оставив потомства, и тем самым обречь ее на исчезновение, если случившиеся в ней мутации оказались нехороши. В историю науки эта концепция вошла как «барьер Вейсмана». Барьер здесь поставлен между клетками зародышевой линии, несущими геном, то есть зародышевую плазму, и соматическими клетками тела, которые, по мнению Вейсмана, сохраняли лишь малую часть этой самой плазмы, причем в каждой клетке свою (это оказалось не так, но на правильность выводов не повлияло). Первые ничего не знают об окружающем мире, а вторые знают всё, но не способны связно доносить и отстаивать свое мнение, кроме как назло бабушке отморозив уши. Только на этом этапе естественный отбор может отбраковать те варианты зародышевой плазмы, которые ему не понравятся. Дарвин об этом еще не догадывался: он-то считал, что соматические клетки как-то умудряются передавать зародышевой плазме информацию о своем жизненном опыте. Однако я почему-то уверен, что идея Вейсмана вызвала бы у него восторг.

Сложные и, как сейчас выражаются, «токсичные» отношения сомы и зародышевой плазмы уже давно стали азбукой биологии. Однако до сих пор некоторым ученым удается увидеть эту картину жизни под неожиданным углом и удивиться как в первый раз. Вот, напри-

мер, китайский ботаник Бай Шунун, изучающий цветы, то есть органы размножения растений, предлагает взглянуть на многоклеточные организмы как на некую добавку к длинной череде гамет и зигот (составляющей, по его терминологии, «цикл полового размножения»). Добавка важная, поскольку она помогает каждому поколению зигот превращаться в гаметы, а гаметам – сливаться и вновь становиться зиготой. Однако, по мнению китайского ботаника, многоклеточному организму не следует зазнаваться – его роль тут явно вторична, он лишь служебная надстройка над «циклом полового размножения».

Чтобы полнее проникнуться этой идеей, доктор Бай предлагает посмотреть на один примитивный организм – слизевик диктиостелиум. По существу, это одноклеточная амeba. Однако на определенном этапе своей жизни амебы начинают собираться вместе, чтобы сформировать плодовое тело. Оно существует лишь для того, чтобы образовать споры, так что никто не назовет плодовое тело смыслом всей жизни диктиостелиума. Наши многоклеточные тела значительно сложнее и долговечнее, но они так же временны и смертны, как и забавные мокрые «грибки» слизевика. А вот зародышевая плазма вечна. Картина мира, нарисованная доктором Баем, поражает своей парадоксальностью, но потом читатель вспоминает, что он уже где-то об этом слышал. Ах да: это ровно то, о чем больше ста лет назад рассуждал Август Вейсман.

Но зачем же, согласно Вейсману, нужен этот самый секс, если весь многоклеточный организм не более чем приспособление для того, чтобы зародышевая плазма могла время от времени им заняться? А вот зачем: в процессе полового размножения клетки зародышевой линии перетасовывают «иды» и «детерминанты» (как мы бы сейчас сказали, «гены») отца и матери, чтобы предложить естественному отбору как можно более широкий выбор разных комбинаций. Кто знает, какая из них лучше сработает? Вот формулировка Вейсмана: *«Цель этого процесса – создать индивидуальные различия, формирующие материал, из которого естественный отбор произведет новые виды».*

Изречения классиков всегда слегка завораживают, но надо признать, что в наше время такая сентенция немедленно огребла бы от критиков, придирающихся к словам и не склонных вникать в их смысл. Ну скажите, кому и зачем понадобилось «поставлять материал для естественного отбора»?! Как будто смысл жизни в том, чтобы угождать этому самому отбору, который неспроста занял место Бога в общем порядке вещей. Более того: живым существам (скажу по личному опыту), вообще-то, совсем не хочется никуда эволюционировать, а, напротив, желательно благоденствовать прямо как есть. Какая выгода семейной паре в том, чтобы ее дети, вместо того чтобы просто быть счастливыми и рожать внуков, *«поставляли материал для естественного отбора»*?! Комбинации генов, существовавшие у Льва Николаевича и Софьи Андреевны Толстых, уже были достаточно хороши, чтобы обеспечить своим носителям выживание и благополучное вхождение в репродуктивный период: восемь выживших и выросших детей – по тем временам хоть и не рекордный, но вполне достойный результат. Зачем же было все портить и перемешивать такие удачные наборы генов?

В этой истории мы еще много раз повторим, что эволюция не способна заглядывать в будущее и никакое сложное приспособление, призванное решить какие-то проблемы в отдаленной перспективе, но не приносящее немедленной пользы, укорениться не может. Предположим, у соседа дети умеют щипать траву гораздо лучше, чем ваши, а ваши дети зато несут гены, позволяющие отлично программировать на языке Паскаль. Увы, вашим детям не повезло: соседские съедят всю траву, ваши умрут с голоду, и погибшим вместе с ними генам программирования ничего не останется, кроме как возникнуть заново через сотню миллионов лет у потомков этих прожорливых травоедов. Способность «перетасовывать свои гены для получения новых комбинаций» в этом смысле ничем не лучше склонности к программированию на еще не придуманных языках: преимущество приобретают только те, кто дает больше потомства здесь и сейчас. А здесь и сейчас преимущества перетасованной колоды не очевидны.

Во времена Вейсмана о таких вещах еще не задумывались – да что там говорить, если они и о генах-то толком не знали. Однако последователи Вейсмана нашли в его идее здоровое зерно. А именно: в зародышевой плазме возникают маленькие наследуемые изменения, а секс составляет из них разные комбинации. Другими словами, секс, возможно, как-то связан с мутациями. Именно они определяют различия между разными генами в популяции, а только благодаря различиям эти гены и имеет смысл перемешивать. А значит, надо просто разобраться, как половое размножение может изменить судьбу мутации, которая однажды возникла у воображаемого организма. Именно так и рассуждали в 1930-х гг. англичанин Рональд Фишер (1890–1962) и американец Герман Мёллер (1890–1967), основоположники популяционной генетики, чьи имена мы тут вспомним еще не раз.

Вот их рассуждения. Предположим, что организму для пущей гармонии со средой (то есть дарвиновской приспособленности) не хватает всего двух мутаций, А и В. Допустим еще, что эти мутации очень хороши вместе, а по отдельности не дают особых преимуществ. Если организм размножается клонированием, то у него, скажем, сперва возникнет мутация А, а до появления В придется ждать еще много поколений. Тем временем у другого такого же организма возникнет мутация В, от которой ему тоже не будет пользы. Надо подождать, пока вторая мутация появится у потомков того, кто уже имеет первую: тогда счастливая комбинация быстро распространится. А пока очень жалко этих двух существ, опередивших свое время.

Однако добавим в картину половое размножение, и проблема мутантов-новаторов будет решена. Двум нашим первопроходцам просто надо найти друг друга и заняться сексом. Тогда у целой четверти их потомков будут присутствовать обе мутации – и А, и В, – дающие им заметное преимущество перед современниками. Через несколько поколений от современников и вовсе ничего не останется. Так секс, по мнению Мёллера и Фишера, может завоевать мир. Несколько десятилетий спустя, уже в 1960-х, американец Джеймс Кроу (1916–2012) и японец Мотоо Кимура (1924–1994) показали уже не на пальцах, а с помощью математической модели, что такое возможно. Надо только, чтобы преимущества двойного мутанта перед одинарными были достаточно велики, скорость мутирования – высокой, а популяции – большими.

Но часто ли случаются такие ситуации в реальном мире? Заметьте: если мы хотим, чтобы секс давал немедленное преимущество перед клонированием, требуется, чтобы такая пара мутаций уже существовала в популяции, причем А + В должно быть в данных условиях среды гораздо лучше, чем А и В по отдельности, только тогда потомки пары завоюют мир вопреки «двойной цене». Но в реальной жизни мы что-то не наблюдаем триумфального распространения каких-то полезных адаптаций в каждом поколении грибов-сыроежек или птиц-носорогов, даже притом что они-то давно уже занимаются половым размножением. Вероятно, описанные выше пары взаимно полезных мутаций А и В возникают у них не так уж часто, так что, если бы пресловутая «мутация к сексу» случилась прямо сейчас, а не миллиард лет назад, ей, возможно, вообще не с чем было бы работать. На самом деле до сих пор не очень понятно, насколько часто появляются полезные – то есть поддерживаемые отбором – мутации, и уж точно об этом ничего не знали в 1930-х годах.

Зато совершенно точно известно, что вполне обычны мутации вредные – те самые маленькие ошибки копирования, которые вечно вносят хаос в гармонию жизни и портят хорошие гены. Герман Мёллер рассмотрел именно такой случай и, кажется, открыл что-то очень важное.

Легкомысленной публике этого ученого уместнее всего, наверное, представить как кузена Урсулы ле Гуин, хотя вклад самого Мёллера в сокровищницу человеческой цивилизации по любым меркам никак не меньше «Волшебника Земноморья». Это притом, что в силу некоторых черт своего характера, а также исторических особенностей мирового ландшафта в первой половине XX века Герману Мёллеру было нелегко найти в мире место для себя и своей коллекции мутантных линий плодовой мушки-дрозофилы. Свою родную Америку он

недолюбливал за капитализм, и она отвечала ему тем же. После участия в издании левой студенческой газеты *Spark* («Искра») Герману пришлось сменить страну пребывания. В 1932 году он переехал в Германию, в лабораторию русского генетика Н. В. Тимофеева-Ресовского, лишь для того, чтобы очень быстро понять, что Адольф Гитлер и его нацизм намного мерзее, чем покинутая им Америка.

Вскоре Мёллер по приглашению Николая Вавилова переехал в СССР. Вот такой небогатый выбор возможностей эмиграции был в то время у последовательного нонконформиста. Лишь после начала Второй мировой войны, захав ненадолго в Париж, Мадрид и Эдинбург, генетик преодолел гражданскую обиду и вернулся в США.

Мёллер первым всерьез занялся мутациями, теми самыми изменениями зародышевой плазмы, о которых мы вели речь. Он придумал, что мутации можно вызывать искусственно с помощью радиоактивного излучения. Так и составила его коллекция мутантов плодовой мушки, большинство линий которой до сих пор используются генетиками всего мира. Возможно, наблюдая за этими мутантами (большинство из них выглядят довольно жалкими и ничемными в сравнении со здоровой дикой мухой), он пришел к своему обоснованию роли секса в жизни живых существ.

Попробуем понять его рассуждения. Вообразим популяцию организмов – хотя бы тех же мух, – размножающихся бесполом способом. Пусть в начале нашей истории эти удивительные мухи, в отличие от гипотетических организмов из гипотезы Мёллера – Фишера, будут идеально приспособлены к среде своего обитания. У их потомков иногда будут возникать мутации. Некоторые мутации окажутся ужасно вредными, и такая муха погибнет, не оставив потомства. Некоторые – совершенно безобидными. А раз так, всегда можно вообразить весь спектр промежуточных случаев: например, когда муха несет слабовредную мутацию, слегка снижающую ее приспособленность, но тем не менее тоже оставляет потомство.

Кроме дарвиновского отбора, наших мух подстерегает множество испытаний, исход которых никак не зависит от генов. Мухи могут, например, погибнуть при извержении вулкана. Вполне может оказаться так, что жертвой катастрофы падет самая лучшая муха, с наименьшим числом вредных мутаций в геноме. Эта утрата невосполнима: снова получить такую хорошую муху уже не получится. В следующем поколении все мушки станут в среднем немного хуже. Вернуться обратно, к состоянию, свободному от мутаций, теоретически можно: каждая мутация должна отыграть в обратном направлении, или, как выражаются генетики, «ревертировать», но это крайне маловероятно. Итак, наши мухи вступают в новое поколение уже чуть-чуть подпорченными, а в следующем поколении все это повторится еще раз.

Расчеты показывают, что в популяции бесконечного размера можно хотя бы теоретически так подобрать параметры, чтобы отбор успевал удалять все нежелательные мутации. Но при любом конечном числе мух, как бы медленно они ни мутировали, фокус не пройдет: всегда найдутся мутации настолько маловредные, что отбор их пропустит и позволит им остаться навсегда. Обратного пути к совершенству природа не предусмотрела. Это похоже на работу механизма, известного как храповик и изображенного художником на странице 60: защелка позволяет зубчатому колесу поворачиваться только в одном направлении. Колесо может сколь угодно долго находиться в покое, но если уж оно повернется хотя бы на один зубчик, то обратного пути у него нет. Собственно, описанный нами механизм порчи всего живого в результате накопления мутаций так и называют – «храповик Мёллера».

И результат работы этого механизма таков: любая популяция организмов, размножающихся бесполом способом, обречена на деградацию и вымирание.

Противостоять неумолимому процессу можно единственным способом: надо каким-то образом в каждом поколении производить хоть немного мух, свободных от мутаций. Для этого достаточно просто перемешать все мутации, содержащиеся в разных геномах, и позволить им соединиться между собой по-другому. В результате у кого-то из потомков мутационный груз

станет неподъемным – отбор ему судья. Зато с некоторой вероятностью в каждом поколении рождаются мушата-вундеркинды, не несущие ни единой вредной мутации. Таким принадлежит будущее. И нет лучшего способа добиться такого перемешивания генов в каждом поколении, чем секс. А если условия жизни популяции, к которым наши мухи якобы идеально приспособлены, вдруг изменятся, тот же самый секс будет способствовать закреплению новых полезных адаптаций.

О том, как работает этот ужасный храповик и насколько половое размножение может от него спасти, генетики спорят со времен Мёллера. Беда в том, что, когда описываешь этот процесс расплывчатыми словами, как это делаем мы, все вроде бы выглядит складно, однако едва дело доходит до деталей, то возникает масса сложностей.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Bai S.-N. The Concept of the Sexual Reproduction Cycle and Its Evolutionary Significance. *Frontiers in Plant Science*. 2015. 6: 6–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00011>
- Carlson E. A. *Genes, Radiation, and Society: The Life and Work of H. J. Muller*. NCROL, 1981.
- Chipkin L., Olofsson P., Daileda R. C., Azevedo R. B. R. Muller's Ratchet in Asexual Populations Doomed to Extinction. *bioRxiv*. 2018. 448563.
- Crow J. F., Kimura M. Evolution in Sexual and Asexual Populations. *The American Naturalist*. 1965. 99(909): 439–450.
- Lane N. *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution*. New York: W. W. Norton & Company, 2009. (Лейн Н. Лестница жизни / Пер. П. Петрова. – М.: АСТ: Corpus, 2013. С. 186–225.)
- Wither R. G. August Weismann on Germ-Plasm Variation. *Journal of the History of Biology*. 2001. 34(3): 517–555.
- Zou Y. August Friedrich Leopold Weismann (1834–1914). The Embryo Project Encyclopedia. 23.05.2014.

Глава пятая, в которой от угрозы генетического вырождения можно отбиться топором

Мутационная катастрофа

Гипотеза храповика Мёллера и то, что половое размножение, возможно, позволяет этот храповик остановить, – очень красивая идея в том смысле, что она связывает секс с самым важным в биологии – мутационным процессом, отбором и эволюцией. Как раз таких объяснений мы и хотели. Раз уж секс замечен практически у всех высших (эукариотических) организмов, то и причины его существования должны быть универсальными. Остается убедиться, что эта гипотеза верна.

Действительно ли половое размножение способно замедлить накопление зловредных мутаций? Это можно выяснить экспериментально, что ученые неоднократно проделывали. К примеру, биологи из Лозанны разбирались с палочниками (это такие нелепые, похожие на сухую щепку насекомые) рода *Timeta*. Среди этих палочников одни виды отказались от секса, подобно существам, которых мы обсуждали в предыдущей части, а другие его с успехом практикуют. Взяли по пять видов тех и этих, сравнили их транскриптомы. Что такое транскриптом? Это слово не случайно рифмуется с геномом: транскриптом включает последовательности всех генов, которые у данного организма работают, то есть с них считывается РНК. В геноме, видимо, есть много ДНК, которая ни на что не влияет, и, даже если там случилась мутация, ваши оппоненты сперва потребуют доказать, что от этой мутации хоть что-то зависит. А вот если мутация замечена в транскриптоме, шансов, что она останется совсем уж без последствий, значительно меньше.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.