

Практики диверсификации по уменьшению разрыва в урожайности органического и обычного сельского хозяйства

Lauren C. Ponisio¹, Leithen K. M'Gonigle^{1,2}, Kevi C. Mace¹,
Jenny Palomino¹, Perry de Valpine¹ and Claire Kremen¹



¹ Факультет наук об окружающей среде, Политика и управление, Университет штата Калифорния, Беркли, 130 Мулфорд Холл, Беркли, CA 94720, США

² Факультет биологических наук, Университет штата Флорида, Таллахасси, FL 32306, USA

Получено: 6 июня 2014 г.
Принято: 12 ноября 2014 г.

Современное сельское хозяйство оказывает большую нагрузку на биоразнообразие, состояние почвы, воды, и атмосферы. Положение будет усугубляться, если сохранятся текущие тенденции роста численности населения, потребления мяса и энергии, и увеличения пищевых отходов, поэтому существует настоятельная необходимость в высокопродуктивных сельскохозяйственных системах, которые, однако, будут оказывать минимальное вредное воздействие на окружающую среду. Последнее десятилетие идет оживленная дискуссия о том, какой вклад может внести органическое сельское хозяйство в мировое производство продуктов питания. В данной статье мы вновь поднимаем вопрос сравнения урожайности при органическом и обычном подходе, используя новый набор мета-данных, который в три раза больше предыдущего (115 исследований, содержащих более 1000 наблюдений), а также новую иерархическую аналитическую структуру, которая лучше учитывает неоднородность и структурность данных. Мы выяснили, что органическая урожайность только на 19,2% (+ 3,7%) ниже, чем в обычном сельском хозяйстве, что говорит о меньшем разрыве в урожайности по сравнению с предыдущими оценками. Более важно, что мы выяснили совершенно другое влияние типов сельхоз культур и практик управления на разрыв в урожайности по сравнению с предыдущими исследованиями. Например, мы не обнаружили никаких существенных различий в урожайности бобовых культур в сравнении с небобовыми, многолетними растениями в сравнении с однолетними, или развитыми странами в сравнении с развивающимися. Вместо этого мы получили новые данные, подтверждающие что две сельскохозяйственные практики диверсификации, техники мультикультур и севооборота, существенно уменьшили разрыв в урожайности (9 + 4% и 8 + 5%, соответственно), когда методы применялись только в органических системах. Полученные многообещающие результаты в ходе тщательного анализа более крупного набора мета-данных, дают основание полагать, что инвестиции в агроэкологические исследования с целью совершенствования органических систем управления могут значительно уменьшить или устранить разрыв в урожайности для некоторых культур или регионов.

1. Введение

Являясь чрезвычайно продуктивной, наша существующая система сельского хозяйства и производства продуктов питания, является, тем не менее, причиной многих экологических проблем, часто поступаясь поддержанием долгосрочных экосистемных услуг в угоду краткосрочному сельскохозяйственному производству [1,2]. Следствием такого подхода являются следующие проблемы: потеря биоразнообразия, массивная эрозия и деградации почвы, эвтрофикация и возникновение океанических мертвых зон, вредное воздействие пестицидов на организм человека и животных, выбросы парниковых газов и изменение режима гидрологических циклов [3-12]. Более того, не смотря на то, что сельское хозяйство производит излишек продуктов питания в глобальном масштабе, более 1 млрд человек страдают от постоянного голода. Проблемы голода, отсутствия продовольственной безопасности и ухудшения экологии будут только обостряться, если продолжатся существующие тенденции роста численности населения, питания, потребления энергии, а также увеличения пищевых отходов [13-15]. Для поддержания способности Земли к производству продуктов питания человечеству крайне важно как можно скорее внедрить устойчивые методы ведения сельского хозяйства [16,17]. Тем не менее, есть распространенное мнение, что в результате такой практики сократится урожайность [17-19], что приводит к сложноразрешимой проблеме как сохранить или увеличить объем производства продуктов питания без уменьшения экологической устойчивости? В ходе предыдущих исследований был сделан вывод, что улучшение распределения продуктов питания с одновременным уменьшением количества пищевых отходов и потребления мяса будет в значительной степени способствовать удовлетворению будущих глобальных потребностей экологически устойчивым образом, хотя, пока не ясно, как эти цели должны быть достигнуты.

Электронный дополнительный материал
доступен по ссылкам:
<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>
<http://rspb.royalsocietypublishing.org>.

Сторонники «устойчивой интенсификации» стремятся повысить эффективность производства при минимизации экономических и экологических издержек. Акцент на эффективности, однако, не обязательно приведет к развитию устойчивых производственных систем, которые смогут смягчить неожиданные изменения, возникающие в результате сложных социально-экологических взаимодействий, влияющих на сельское хозяйство.

Для достижения экологической устойчивости, мы должны выращивать пищу так, чтобы защищать, использовать и регенерировать экосистемные услуги (например, способствовать применению методов естественной борьбы с вредителями, без использования синтетических пестицидов), а не заменять их. Замена экосистемных услуг часто имеет непреднамеренные негативные последствия (например, смертельное или близкое к смертельному влияние пестицидов на организм человека, полезных насекомых и ресурсы дикой природы). Однако, широкое внедрение устойчивых сельскохозяйственных методов маловероятно, если они не будут обеспечивать сходный уровень продуктивности и/или экономической эффективности, и таким образом, улучшение условий жизни. Следовательно, очень важно определить существует ли разрыв в урожайности между "обычным" сельским хозяйством (т.е. химически интенсивным и биологически упрощенным) и альтернативными, более устойчивыми формами сельского хозяйства, и если да, то каким образом она может быть уменьшена или устранена.

В таких системах (таких как, агроэкологическая, экологически интенсивная, биологически диверсифицированная или регенеративная системы земледелия) применяют методы культивирования, которые через диверсификацию на участке земли и на непроизводственных территориях, стимулируют экологическое взаимодействие, обеспечивающее плодородие почвы, круговорот и удержание питательных веществ, хранение воды, борьбу с вредителями/болезнями, опыление, и другие существенные сельскохозяйственные средства/экосистемные услуги. Наиболее широко практикуемая и изученная альтернатива обычному сельскому хозяйству – органическое сельское хозяйство, применяемое в настоящее время на 0,9% сельскохозяйственных земель. В определение органического сельского хозяйства входит отказ от использования синтетических средств, но органические фермы могут практиковать полный или неполный набор методов культивирования, характеризующих устойчивое сельское хозяйство. Хотя термины «органическое» и «устойчивое» сельское хозяйство неэквивалентны, исследования в области органического сельского хозяйства показали лучшую производительность, чем обычные системы по некоторым (но не по всем) показателям устойчивости, в том числе по видовому богатству и изобилию, плодородию почвы, поглощению азота сельскохозяйственными культурами, просачиванию воды и водоудерживающей способности и энергоэффективности. В данной статье, мы представляем наиболее полную оценку разрыва в урожайности органического и обычного сельского хозяйства, основываясь на работах предшественников.

Ранние обзоры, сравнивающие обычное сельское хозяйство с органическим, обнаружили разницу в урожайности в 8-9% в развитых странах и повышение урожайности вплоть до 180% в развивающихся странах. Два последних мета-анализа, однако, выявили, что урожайность в органическом сельском хозяйстве на 20-25% ниже, чем урожайность в обычном сельском хозяйстве. Такая большая разница в выводах этих двух исследований, вероятно, связана с двумя факторами. Во-первых, каждое исследование использует различные критерии отбора данных для включения в обзор или мета-анализ. Например, для развитых стран, авторы Бадгли и др. [34] сосредоточили внимание, главным образом, на сравнении участков, где использовались методы устойчивого ведения сельского хозяйства, с участками «бедными ресурсами», а не на строгом сравнении органических практик с обычными, при расчете прироста урожайности вследствие «органического управления» в развивающихся странах [18,21,37]. Во-вторых, каждое из указанных выше исследований использует различные аналитические методы при комбинировании данных из различных компонентов исследований. Например, обзоры de Ponti и др. [35], Stanhill [33] и Badgley и др. [34] не учитывали дисперсию выборки в исследованиях, что рекомендуется делать для решения проблемы зависимости дисперсии от другой случайной величины в выборке исследований [38].

В мета-анализе Seufert и соавторов [36] хотя и учитывается дисперсия выборки, происходит объединение сгруппированных данных (например, несколько экспериментов в рамках одного исследования) без учета иерархии (электронный дополнительный материал, §S1). В результате возникает псевдо-репликация, на порядок занижающая коэффициент ошибки 1го типа в анализе авторов (электронный дополнительный материал, рисунок S1), и искаженная оценка разрыва в урожайности и ее статистической неопределенности (электронные дополнительные материалы, рисунок S2). Учитывая критические замечания по вопросам методологии и данных, необходимо провести новое исследование для получения достоверной оценки разрыва между органической и обычной урожайностью.

В своей работе мы разработали иерархическую мета-аналитическую структуру, с помощью которой преодолели методологические недостатки предыдущих исследований путем учета, как многоуровневой природы данных, так и изменений урожайности. Более того, сделав обзор литературы, мы сформировали более обширный и актуальный набор мета данных, включающий 1071 сравнение органической урожайности с обычной из 115 исследований, что более чем в три раза превышает число наблюдений любого предыдущего анализа. Наш набор мета данных включает в себя исследования из 38 стран и 52 вида культур на протяжении 35 лет.

2. Материалы и методы

(a) Детали поиска

В нашем поиске мы использовали аналогичные термины, используемые в работах Seufert и др. [36] и de Ponti и др. [35]. Мы использовали сложный логический поисковый запрос, содержащий (I) термин «органический» или «экологический» и (II) термин «сельское хозяйство», «земледелие», «производство» или «выращивание» в сочетании с (III) терминами, равными или аналогичными терминам «урожайность» и «сравнить». Мы использовали поисковые системы Academic Complete Search, Google Scholar и Web of Science. Последний поиск был проведен в январе 2013 года. Полный список всех исследований и данные по урожайности представлены в электронном дополнительном материале, таблица S5.

(b) Критерии включения

Мы использовали строгие критерии Seufert и соавторов [36], но исключили (i) сравнение натуральной урожайности (неусовершенствованное сельское хозяйство) с усовершенствованными сельскохозяйственными методами (например, [34,39]) и (ii) сравнение урожайности разных лет. Дополнительно, в случаях, когда были даны средние значения органической и обычной урожайности, но не дана их дисперсия (что является необходимым элементом для включения в мета-анализ), мы получали расчеты дисперсии или данные непосредственно от авторов работы, по мере возможности. Из 99 исследований, в которых не хватало расчетов дисперсии, мы получили расчеты дисперсии или исходные данные от авторов 28 исследований. В тех случаях, когда авторы не ответили, но у нас имелись данные за несколько лет, мы брали среднее арифметическое и дисперсию за эти годы (59 исследований, 232 сравнения органического и обычного сельского хозяйства), как это было сделано в работе Seufert и др. [36]. Так как расчет дисперсии за несколько лет не является идеальным расчетом дисперсии в течение одного года, мы также провели анализ без учета этих исследований (электронный дополнительный материал, §S2.5 и рисунок S2). В целом, в результате поиска и запроса данных мы получили 115 исследований, из которых выявили 1071 сравнение органической урожайности с обычной.

(c) Мета-аналитическая модель

Мы построили иерархическую мета-аналитическую модель для расчета разницы в урожайности (см. электронный дополнительный материал, §S2). Следуя стандартной практике, мы сравнили натуральный логарифм из соотношений между органическими и обычными урожаями (далее

«коэффициент реагирования») в различных исследованиях [36,40]. Коэффициент реагирования больше распределен нормально, чем коэффициент необработанных соотношений и не зависит от единиц измерения, используемых в исследовании, и, таким образом, является сопоставимым во всех исследованиях [40].

Для анализа данных по урожайности, в котором содержится несколько уровней иерархии, мы использовали два метода. Во-первых, для исследований, которые сравнивают несколько процедур (обычно органических) с одной контрольной (как правило, обычной), и, таким образом, не являются независимыми [41,42], мы рассчитали комбинированный коэффициент реагирования и соответствующую стандартную ошибку для всего исследования с использованием метода, представленного в уравнении 3 и 8 в [41], а затем использовали эти объединенные коэффициенты реагирования в сгруппированном анализе.

Далее, мы построили иерархическую модель регрессии в байесовской рамке для учета зависимостей в данных по урожайности. Мы расширили традиционную модель случайных эффектов [43], рассматривая три дополнительных источника случайных изменений (т.е. случайных эффектов): (1) между исследованиями, (2) во время исследования между годами и (3) в течение года между коэффициентами реагирования (например, за несколько повторных испытаний культуры, посаженной в разное время в течение одного сезона). Мы также учитывали, являлась ли дисперсия распределений случайных эффектов для (2) и (3) общей для всех исследований или только для отдельного исследования.

Традиционная мета-аналитическая модель случайных эффектов включает в себя случайный эффект исследования (электронный дополнительный материал, уравнение S1), но индивидуальные коэффициенты реагирования должны быть сгруппированы в рамках исследования, чтобы исследования, а не отдельные сравнения органической и обычной урожайности рассматривались как повторы. Это позволяет избежать псевдо-репликации и возникающую, как следствие этого, существенную ошибку 1го типа, характерную для предыдущих исследований (электронный дополнительный материал, рисунок S1). Мы также последовательно добавили дополнительные случайные эффекты и определили является ли апостериорное распределение добавленного параметра явно отличным от нуля (электронный дополнительный материал, раздел S2). Если это было так, мы пришли к выводу, что данные поддерживаются, добавив слой иерархии. Мы подтвердили наш выбор модели используя критерий информационной девиантности, который может быть проблематичным, но был соблюден в данном случае [44,45]. Полная возможная модель, до выбора модели, со всеми источниками случайных вариаций следующая:

$$\begin{aligned} y_{ijk} &= m + a_i + b_{ij} + h_{ijk} + e_{ijk} \\ a_i &\sim N(0, \sigma_a^2) \\ b_{ij} &\sim N(0, \sigma_{b[i]}^2) \\ h_{ijk} &\sim N(0, \sigma_{h[i]}^2) \\ e_{ijk} &\sim N(0, S_{ijk}) \\ \sigma_{b[i]}^2 &\sim G(CV_b, scale_b) \\ \sigma_{h[i]}^2 &\sim G(CV_h, scale_h) \end{aligned} \quad (2:1)$$

где y_{ijk} - наблюдаемая величина коэффициента реагирования k года j исследования i , m - средний коэффициент реагирования по исследованиям, a_i - эффект исследования i , b_{ij} - эффект года j исследования i , h_{ijk} - влияние коэффициента реагирования год j исследования i и e_{ijk} - остаточное. σ_a^2 - дисперсия между исследованиями, $\sigma_{b[i]}^2$ - дисперсия между годами исследования i , $\sigma_{h[i]}^2$ - дисперсия в течение года, между коэффициентами реагирования исследования i и S_{ijk} - дисперсия коэффициента реагирования y_{ijk} как указано в его исследовании. CV_b и CV_h и $scale_b$ и $scale_h$ являются коэффициентом вариации параметров масштаба гамма-распределений дисперсии отдельного исследования между годами и в течение года. Когда коэффициенты реагирования, имеющий общий контроль, объединены, y_{ijk} соответствует совокупному коэффициенту реагирования по исследованию (уравнение 3 в [41]), а также S_{ijk} - это его объединенная дисперсия (уравнение 8 в [41]).

Мы также расширили эту модель для того, чтобы охватить анализ характеристик исследований, таких как тип культур и практики управления. Мы анализируем эти дополнительные переменные отдельно каждую, так как не все исследования содержат объясняющие переменные. В данном анализе, за исключением случаев, когда несколько органических методов представляли различные категории отдельной пояснительной переменной,

их нельзя было объединить с помощью метода Лаженесса [41]. Вероятность искажения из-за не-независимости коэффициентов реагирования в таких случаях, однако, была сведена к минимуму, потому что они не были собраны вместе в анализе [41].

h индексирует категории для отдельной объяснительной переменной (например переменная культуры):

$$y_{hijk} = m + g_h + a_i + b_{ij} + h_{ijk} + e_{ijk} \quad (2:2)$$

Где g_h - эффект категории h , а остальная часть модели повторяет уравнение (2.1).

Для облегчения сопоставления наших результатов с результатами из предыдущих исследований, мы использовали те же категории, что и в работе Seufert и др. [36]. Мы также исследовали чувствительность наших результатов к пояснительным переменным, относящимся к качеству исследования, снова используя категории качества исследования, определенные в работе Seufert и соавт. [36]. Коэффициенты объясняющих переменных считаются различными друг от друга, если апостериорная вероятность разницы между 95% доверительных интервалов вокруг групповых средних значений не совпадает с нулем.

Мы использовали JAGS через R пакетный интерфейс rjags [46,47] для формирования выборки по алгоритму Монте-Карло с использованием цепи Маркова (MCMC). Вывод был сделан из трех цепей, в каждой образцы 10^3 апостериорного распределения, после отбраковки 10^4 с небольшим уровнем 10^3 . Мы использовали Гауссовское распределение с большой дисперсией для определения предыдущих значений, за исключением дисперсионных членов, где мы использовали однородное значение (0, 100) до стандартного отклонения. Начальные значения были выбраны случайным образом. Конвергентность была достигнута путем визуальной оценки цепей MCMC с использованием статистики Гельмана-Рубина ('Rhat' в R пакете R2JAGS со значениями меньше 1.1, указывающими на конвергентность [48]). Достоверные интервалы вокруг параметров оценок были рассчитаны как 2,5% и 97,5% квантилей апостериорного распределения. Мы также сделали проверку на смещение в нашем наборе мета-данных, используя воронкообразный график и QQ-график (электронный дополнительный материал, SS3 [49]).

3. Результаты

Используя выбранную иерархическую модель, мы обнаружили, меньший разрыв в урожайности между обычными и органическими системами земледелия, чем это было заявлено в недавних работах по мета-анализу [35,36]. Мы обнаружили, что органические урожаи были на 19,2% ниже по сравнению с обычными урожаями, с 95% доверительным интервалом в пределах от 15,5% до 22,9% (рисунок 1). Обычные урожаи были значительно выше, чем органические для всех видов культур и соотношения урожайности большинства видов культур незначительно отличаются друг от друга (рисунок 1). Однако, при мелкомасштабном рассмотрении видов сельскохозяйственных культур показатели урожайности значительно отличались между некоторыми парами видов (электронный дополнительный материал, рисунок S3).

Наиболее резкое различие между нашими результатами и более ранними работами - это почти полное отсутствие значительных различий между группами для всех исследованных пояснительных переменных. В отличие от Seufert и др. [36], мы не нашли существенных различий в урожайности бобовых и небобовых культур, ни для многолетних, ни для однолетних растений (рисунок 1). Мы также не нашли различий в урожайности по исследованиям, проведенным в развитых и развивающихся странах (электронный дополнительный материал, таблица S2; смотри также [34]). Наши результаты были тщательно проработаны и включали случайный эффект между годами (хотя включение данного параметра не поддерживалось данными; электронный дополнительный материал, таблица S1 и рисунок S6).

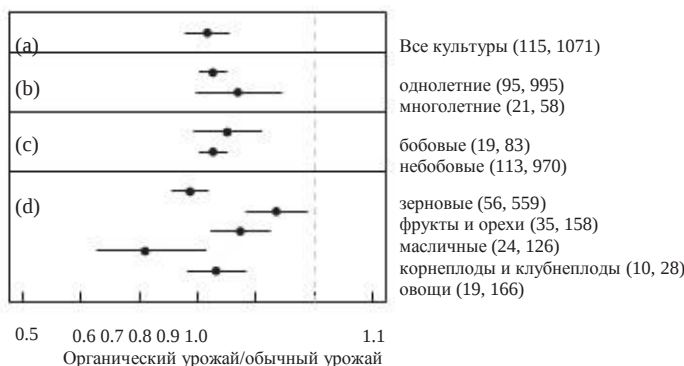


Рисунок 1. Соотношение уровней урожайности органического и обычного сельского хозяйства (а) всех сельскохозяйственных культур, (b,c) типы растений и (d) различные типы культур. Значения - средние размеры эффектов с 95% доверительными интервалами (т.е. 95% от апостериорного распределения). Количество исследований и наблюдений в каждой категории указано в скобках. Показаны только категории с минимум 10 сравнениями урожайности в более пяти исследованиях. Полагалось, что органические и обычные урожаи значительно отличаются друг от друга, если 95% доверительный интервал соотношения урожайности не совпадает с единицей. Различные уровни пояснительных переменных рассматривались как существенно различные, если апостериорная часть разницы между средними значениями группы не совпадала с нулем.

Вероятное объяснение совершенно разных результатов для большинства пояснительных переменных в нашем исследовании и в исследовании Seufert и др. [36] (см электронный дополнительный материал, таблицы S2-S4 по обзору различий) в том, что Seufert и др. [36] не учли все источники общих вариаций в своем анализе, что привело к завышенной ошибке Типа 1 (электронный дополнительный материал, рисунок S1), что увеличило вероятность принятия незначительных отношений в качестве значительных.

Наш анализ также отличается от Seufert и соавт. [36] в том, что они пришли к выводу, что ряд управленческих практик может свести к минимуму различия между органической и обычной урожайностью. Например, Seufert и др. [36] выявили существенные различия в урожайности, связанные с практиками орошения, временем, прошедшим с момента перехода от обычного к органическому сельскому хозяйству, фактором использования лучших практик управления в органической системе. Мы, наоборот, не обнаружили, никаких таких различий между процедурами в рамках любой из этих категорий (электронный дополнительный материал, таблица S3). Мы также включили новую пояснительную переменную, применение фосфора, но опять-таки не нашли существенных различий в урожайности при большем или меньшем использовании фосфора в органических практиках, чем в обычных практиках (электронный дополнительный материал, рисунок S4).

Seufert и др. [36] также обнаружили значительно более существенную разрыв в урожайности, когда уровни внесения азота были одинаковыми в органическом и обычном подходах или были выше в обычном подходе, по сравнению со случаями, когда внесение азота было выше в органическом подходе (электронный дополнительный материал, таблица S3). Наши результаты отличаются: мы нашли значительно меньший разрыв в урожайности, когда внесение N было сходным в обоих подходах (9 + 4%), по сравнению с тем, когда внесение N было больше в обычном подходе (30 + 4%). Когда внесение N было выше в органическом подходе, разрыв в урожайности был средним и более изменчивым (17 + 6%), и существенно отличался от соотношения урожайности с аналогичным внесением N (рисунок 2). Похожим образом, малозатратные обычные системы имеют меньший разрыв в урожайности чем высокзатратные (электронный дополнительный материал, рисунок S4), Seufert и др. [36] пришли к такому же результату.

Мы обнаружили, что две управленческие практики, диверсифицирующие культуры в пространстве или во времени, техники мульткультуры и севооборота, т.е. чередования культур

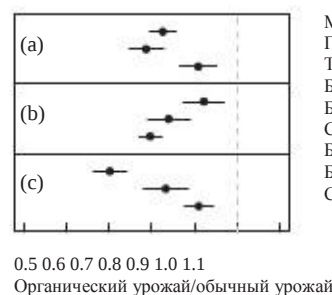


Рисунок 2. Влияние (а) системы выращивания сельскохозяйственных культур, (b) севооборота (чередование) и (c) внесения азота на соотношение органической и обычной урожайности. Значения – это эффекты средних размеров с 95% доверительными интервалами. Количество исследований и наблюдений в каждой категории приведено в скобках.

может повысить урожайность в органических системах. Разрыв в урожайности между органическими поликультурами и обычными монокультурами (9 + 4%) был значительно меньше, чем когда в обеих системах были монокультуры (17 + 3%) или в обеих были поликультуры (21 + 6%). Мы нашли аналогичный результат с севооборотом. Разрыв в урожайности был меньше, когда в органической системе было больше севооборота (8 + 5%) по сравнению с тем, когда в обеих системах был одинаковый севооборот (количество чередований) (20 + 2%), либо когда не было севооборота совсем (16 + 5%). Данные результаты также показывают, что поликультуры и севооборот повышают урожайность как в органической, так и в обычной системе земледелия (рисунок 2). Seufert и др. [36] не обнаружили таких различий между системами выращивания или севооборота. Существует некоторое дублирование в исследованиях, содержащих данные об урожайности органических поликультур с большим севооборотом, поэтому эти практики могут работать синергетически по устранению разрыва в урожайности, или одна из практик может производить большую часть эффекта.

Мы нашли доказательства смещения мета данных в сторону исследований, указывающих на более высокую урожайность при обычном подходе по сравнению с органическим подходом (электронный дополнительный материал, раздел S3). Мы также обнаружили тенденцию указывать на больший разрыв в урожайности в более поздних исследованиях, хотя трудно определить причинно-следственную связь данной тенденции (электронный дополнительный материал, раздел S3). Таким образом, наши результаты должны быть интерпретированы как оценка разрыва в урожайности, сделанная из доступной литературы, в которой, скорее всего, отдавалось предпочтение исследованиям, указывающим на более высокую урожайность при обычном подходе, чем при органическом.

4. Обсуждение

Наш обширный набор данных включает в три раза больше сравнений урожайности, чем предыдущие исследования [35,36] и применение иерархической аналитической структуры позволило получить наиболее актуальную оценку разрыва в урожайности между органическим и обычным сельским хозяйством, а также определить, что влияет или не влияет на разрыв в урожайности в разрезе по управленческим практикам и типам культур. Нижняя граница нашего доверительного интервала вокруг соотношения урожайности совпадает с верхней границей в двух предыдущих работах мета-анализа [35,36], но, так как в предыдущих работах не учитывалась иерархия данных и/или дисперсия выборки в исследованиях, эти предыдущие оценки подвержены высокому уровню ошибки 1-го типа (недооцененная неопределенность), что, вероятно, привело к неточности в оценке разрыва урожайности и ее статистической неопределенности.

Кроме того, мы обнаружили совершенно разное влияние от использования типов культур и управленческих практик на разрыв в урожайности, чем в предыдущих исследованиях [36].

Результаты нашего анализа ограничены параметрами моделирования и наличием исследований, доступных для включения.

Мы смоделировали максимально возможное количество слоев не-независимости в нашем наборе мета данных, насколько это поддерживалось данными, но могут существовать другие слои. Кроме того, в литературе мы нашли смещение в сторону исследований, указывающих на более высокую урожайность в обычном сельском хозяйстве, чем в органическом; поэтому, несмотря на то, что наша оценка более достоверна и указывает на меньший разрыв в урожайности, чем в предыдущих исследованиях, она по-прежнему может быть завышена.

Оценка соотношения урожайности органического в сравнении с обычным сельским хозяйством является средним значением по множеству несхожих систем и типов культур, поэтому чрезмерная представленность определенных практик или культур в наборе данных может чрезмерно влиять на оценку разрыва в урожайности. Например, зерновые культуры, которые проявляют наибольший разрыв в урожайности типов культур между органическими и традиционными системами, были представлены значительно больше других (53% от сравнений). Вывод о том, что продуктивность зерновых (включая пшеницу, ячмень, рис и кукурузу) ниже, в органической системе представляет интерес из-за их важнейшего значения для рациона человека и преобладания на культивируемых площадях. Такая большая разница, тем не менее, не удивительна, учитывая активные усилия, предпринятые после Зеленой революции для увеличения урожайности зерновых путем выведения высокоурожайных сортов зерновых, хорошо адаптированных к выращиванию с применением средств и материалов обычного сельского хозяйства [50,51].

Учитывая, что существует такое разнообразие практик управления как в органическом, так и в обычном сельском хозяйстве, широкомасштабное сравнение органического и обычного производства не может дать ценные идеи по улучшению управления органическими системами. Вместо этого, будет более продуктивным провести систематическое исследование того, как определенные управленческие практики (например, комбинации междурядий, последовательности севооборота, компостирование, биологический контроль и т.д.) могут быть изменены в различных системах выращивания сельскохозяйственных культур для уменьшения разрыва в урожайности между органическим и обычным производством. Исторически сложилось так, что научные исследования и разработки в области органического сельского хозяйства значительно недофинансировались по сравнению с обычными системами [16,52,53]; Таким образом, приоритеты научных исследований должны быть изменены, чтобы обеспечить необходимые исследования. Наш мета-анализ выявил относительно небольшой, и потенциально завышенный, разрыв в урожайности между органическим и обычным сельским хозяйством (т.е. между 15,5 и 22,9%), несмотря на исторически низкие темпы роста инвестиций в органические системы земледелия. Эти различия в урожайности снизились до 9 + 4% и 8 + 5%, когда использовалась диверсификация (техники мультикультур и севооборота, соответственно), поэтому мы полагаем, что дальнейшие инвестиции в агроэкологические исследования дадут возможность повышения продуктивности устойчивых сельскохозяйственных методов, чтобы сравнять или превзойти урожайность в обычном сельском хозяйстве, как и было продемонстрировано долгосрочными исследованиями (например, [54,55])

Кроме того, многие сравнения между органическим и обычным сельским хозяйством использовали современные сорта сельскохозяйственных культур, отобранных из-за их продуктивности в высокочастотных (обычных) системах. Такие сорта, как известно, не обладают важными чертами, необходимыми для эффективной производительности, что потенциально ведет к искажению выводов о более низкой урожайности в органическом сельском хозяйстве по сравнению с обычным.

В противоположность этому, очень мало современных сортов было разработаны для получения высоких урожаев в условиях органического сельского хозяйства [50,56]; создание таких сортов было бы важным первым шагом на пути сокращения разрыва в урожайности. И, наконец, сокращение разрыва в урожайности между органическим и обычным сельским хозяйством (или, точнее, между биологически диверсифицированными и химически интенсивными системами ведения сельского хозяйства) имеет потенциальную пользу сокращения потерь биоразнообразия и экосистемных услуг, которые часто ассоциируются с обычным сельским хозяйством [1,2], и тем самым будет содействовать развитию высокоурожайного сельского хозяйства, которое будет относительно экологически безопасным и благоприятным для живой природы и людей по сравнению с обычным сельским хозяйством [21,28,57,58]. Существует ряд доказательств, что биологическое разнообразие уменьшается с увеличением урожайности на органических фермах [59], но это может не относиться к увеличению урожайности на биологически диверсифицированных системах земледелия.

Как уже отмечалось, повышение урожайности, само по себе, не решит проблему двух кризисов голода и ожирения, каждый из которых ассоциируется с бедностью. Текущий объем мирового производства калорий значительно превышает необходимый для питания мирового населения, однако существующие социальные, политические и экономические факторы препятствуют получению доступа многих людей к достаточному количеству пищи для здорового образа жизни [15,16,60,61].

Концентрация внимания исключительно на повышении урожайности не решит проблему мирового голода. Увеличение производства, тем не менее, критически важно для удовлетворения экономических потребностей бедных фермеров, которые составляют большую часть страдающих от хронического голода людей [21,39,60], а агроэкологический подход обеспечит низкозатратные методы выполнения этой задачи (например, [54]). Кроме того, экологически устойчивые системы производства будут становиться все более и более насущной необходимостью в мире, где границы многих планетарных ресурсов уже были достигнуты или превышены [19,62,63]. Мы считаем, что настало время инвестировать в проведение серьезного агроэкологического и социально-экономического аналитического исследования, ориентированного на устранение разрывов в урожайности между устойчивым и обычным сельским хозяйством (при их возникновении) и выявление барьеров на пути внедрения устойчивых методов и улучшения условий существования сельской бедноты.

Доступ к данным. Полный набор мета-данных доступен в базе данных на Dryad data, doi:10.5061/dryad.hf305.

Заявление о финансировании. Финансирование L.C.P. было предоставлено NSF Graduate Research Fellowship, для L.K.M. финансирование предоставлено NSERC Postdoctoral Fellowship