

БИОЛОГИЯ

УДК 630*231

***В.А. Усольцев^{1,2}, С.О.Р. Шубаири³, Дж.А. Дар⁴,
В.П. Часовских¹, Е.В. Марковская¹***

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург

² Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург

³ Nanjing Forestry University, Nanjing Shi, Jiangsu Sheng, China

⁴ Biodiversity Conservation Lab., Department of Botany, Sagar, M.P., India

**ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ В АСПЕКТЕ
БИОГЕОГРАФИИ: 1) МЕТА-АНАЛИЗ КАК СПОСОБ ОБОБЩЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ НЕЗАВИСИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**



Ключевые слова: *биосферная роль лесов, фитомасса деревьев и древостоев, аллометрические модели, обобщение независимых исследований, мета-анализ, модели смешанного типа.*

В последние годы мировая лесная экология переживает невиданный по масштабам информационный всплеск в оценке биологической продуктивности лесов в предположении антропогенного изменения климата и поиска возможностей его стабилизации. Исходные фактические данные биологической продуктивности лесов, получаемые на пробных площадях, в периодической научной печати публикуются относительно редко, в ещё меньшей степени доступны для научного сообщества исходные фактические данные о фитомассе деревьев, получаемые исследователями на пробных площадях. Обычно информация о фитомассе деревьев и древостоев публикуется в виде регрессионных уравнений зависимости от одного или нескольких таксационных показателей. Обобщение подобных уравнений на основе количественных методов относится к категории мета-анализа как «анализа анализов», или статистического обобщения результатов независимых исследований с целью нахождения общих закономерностей и выявления факторов, определяющих изменчивость получаемых результатов. Несмотря на обильную критику мета-анализа, характеризующую его как «гигантский шаг назад», «упражнение в мега-глупости» и «статистическую алхимию XXI века», количество публикаций с применением мета-анализа непрерывно нарастает, а область его применения охватывает диапазон от «астрономии до зоологии». В статье дан обзор некоторых положительных результатов применения мета-анализа в разных областях знаний, которые не могли быть получены традиционными способами. Показан ряд правил, соблюдение которых обеспечивает получение корректных выводов. В стремлении обеспечить корректность мета-анализа «искусство импровизации» (или искусство применения математики) в конечном итоге определяет его результат. Показаны перспективы использования мета-анализа при построении моделей смешанного типа.

V.A. Usoltsev, S.O.R. Shobairi, J.A. Dar, V.P. Chasovskikh, E.V. Markovskaya

PROBLEMS OF ESTIMATING FOREST BIOPRODUCTIVITY IN THE ASPECT OF BIOGEOGRAPHY: 1) META-ANALYSIS AS A WAY OF GENERALIZING THE RESULTS OF INDEPENDENT RESEARCHES

Key words: *biosphere role of forests, trees and forest biomass, allometric model, synthesis of independent studies, meta-analysis, mixed-type model.*

In recent years, the world forest ecology is experiencing unprecedented information growth in assessing forest biological productivity in the assumption of anthropogenic climate change and in finding some capacities of its stabilization. The initial actual data on the biological productivity of forests obtained at the sample plots are published relatively infrequently in the periodical scientific press, but in even less extent available for the original actual tree biomass data of scientific community. Usually information on tree and forest biomass is published in the form of regression equations relating biomass to single or multiple taxation indices. Synthesis of such equations based on quantitative techniques falls into the category of meta-analysis as "analysis of analyses", or the statistical synthesis of a large number of independent research results with a view to finding common patterns and identifying the factors that determine the variability of results. Despite abundant criticism of meta-analysis, its characterization as "a giant step backward," "an exercise in mega-stupidity" and as "the statistical alchemy of the twenty-first century", the number of publications using meta-analysis increases continuously, and its scope covered the range from "astronomy to zoology". The article provides an overview of some positive results of a meta-analysis in different areas of knowledge that could not be obtained by traditional methods. A number of regulations, compliance with which ensures the correct conclusions, are shown. In an effort to ensure the correctness of the meta-analysis, "the art of improvisation", the art of applying mathematics ultimately determines its result. The prospects of using meta-analysis when building models of mixed type are shown.

Усольцев Владимир Андреевич - доктор сельскохозяйственных наук, заслуженный лесовод России, профессор кафедры менеджмента и управления качеством Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН (Екатеринбург). Тел.: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Usoltsev Vladimir Andreyevich - Doctor of agricultural sciences, professor of the Department of quality management, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg). Phone: (343)254-61-59; e-mail: Usoltsev50@mail.ru.

Shobairi Seyed Omid Reza - PhD, Nanjing Forestry University, Nanjing Shi, Jiangsu Sheng, China, 210037; e-mail: omidshobeyri214@gmail.com.

Dar Javid Ahmad - PhD, Biodiversity Conservation Lab., Department of Botany, Dr. Hari Singh Gour Central University, Madhya Pradesh, India; e-mail: javiddar29@gmail.com.

Часовских Виктор Петрович - доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, член Российской академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, член Российской академии естественных наук, Full Member of European Academy of Natural History, директор Института экономики и управления Уральского государственного лесотехнического университета (Екатеринбург). Тел. (343)261-46-44; e-mail: u2007u@ya.ru.

Chasovskikh Viktor Petrovich - Doctor of technical sciences, Professor, Full Member of European Academy of Natural History, Director of the Institute of Economics and Management, Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: (343)261-46-44; e-mail: u2007u@ya.ru.

Марковская Екатерина Владимировна - магистр II курса Уральского государственного лесотехнического университета (г. Екатеринбург). Тел. (343)328-06-11; e-mail: sqwid@mail.ru.

Markovskaya Ekaterina Vladimirovna - Magister of the Ural State Forest Engineering University (Yekaterinburg). Phone: (343)328-06-11; e-mail: sqwid@mail.ru.

В последние годы мировая лесная экология переживает невиданный по масштабам информационный всплеск в оценке биологической продуктивности лесов в предположении антропогенного изменения климата и поиска возможностей его стабилизации. Для глобального количественного описания биосферных функций лесного покрова, в частности, его углерододепонирующей способности, необходимы соответствующие базы данных, включающие в себя количественные характеристики мировых лесов. Развивающиеся возможности IT-технологий открывают для этого широкие перспективы. Ещё в 1980 г. Дж. Мартин писал: «Историки будут рассматривать появление банков данных на ЭВМ и возможностей, связанных с ними, как шаг, изменивший природу эволюции общества и имеющий, возможно, большее значение, чем изобретение печатного станка» (цит. по: Борщев, 1982). Сегодня формирование подобных баз данных ведётся довольно интенсивно, в связи с чем научным сообществом констатируется наступление «эры больших массивов данных» (the Big Data Era: <http://www.gfbinitiative.org/symposium2017>), и на сформированных «больших массивах» выводятся глобальные закономерности по биологической продуктивности лесов и составляющих их деревьев (Crowther et al., 2015; Poorter et al., 2015; Liang et al., 2016; Jucker et al., 2017). В нынешних условиях перехода к цифровой экономике – экономике, основанной на данных – термин Big Data становится одним из ключевых (<https://www.osp.ru/iz/bigdata2018/>).

Предпосылки мета-анализа в проблеме биопродуктивности лесов

Исходные фактические данные биологической продуктивности лесов, получаемые на пробных площадях, в периодической научной печати публикуются относительно редко, и в распоряжении исследователя оказываются лишь результаты какой-либо их статистической обработки, например, в виде таблиц возрастной динамики фитомассы древостоев того или иного древесного вида (Усольцев, 2002; Швиденко и др., 2008).

В ещё меньшей степени доступны для научного сообщества исходные фактические данные о фитомассе деревьев, получаемые исследователями на пробных площадях. Обычно информация о фитомассе деревьев публикуется в виде аллометрических уравнений зависимости от одного или нескольких таксационных показателей. Сегодня для основных древесных видов Северной Америки, Европы и Японии имеется соответственно около 2600, 973 и 1000 аллометрических уравнений для подеревной фитомассы (Jenkins et al., 2004; Muukkonen, Mäkipää, 2006; Hosoda, Iehara, 2010; Forrester et al., 2017). По-видимому, уравнения упомянутых сводок таят в себе эмпирические данные многих сотен тысяч деревьев разных древесных видов мира, однако все они недоступны для общего пользования и географического анализа.

Аллометрические уравнения обычно используются для оценки фитомассы лесов на различных уровнях. Значительные усилия были предприняты по разработке обобщенных, всеобщих или универсальных моделей фитомассы деревьев различных древесных видов в разных природных условиях. Однако применение таких моделей с целью прогнозирования фитомассы в крупных масштабах имеет существенные ограничения (Усольцев и др., 2017а,б,в,г). Большинство опубликованных аллометрических моделей фитомассы являются локальными, они рассчитываются по данным деревьев, отобранных в относительно небольших районах или в конкретных лесорастительных условиях, без учета внутри- или межвидовой изменчивости. Они подходят для локаль-

ного применения, но их надежность при использовании в больших пространственных масштабах вызывает сомнение (Jenkins et al., 2003; Henry et al., 2011; De-Miguel et al., 2014; Усольцев и др., 2017 *а,б,в,г*; Forrester et al., 2017).

С целью исправить эту ситуацию формируются сводки ранее опубликованных уравнений для более или менее локальных местообитаний (Tritton, Hornbeck 1982; Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997; Zianis et al., 2005; Henry et al., 2011). Это даёт некоторую возможность выбора уравнения, основанного на фактических данных, тяготеющих к интересующему региону, или возможность оценки фитомассы в некотором диапазоне на основе нескольких уравнений (Ter-Mikaelian, Korzukhin, 1997). Однако такие сводки часто являются неполными с точки зрения охвата различных древесных видов в разных экологических условиях, в них могут отсутствовать уравнения для многих географических районов или в них могут не учитываться различия, касающиеся того или иного фракционного состава фитомассы (De-Miguel et al., 2014; Forrester et al., 2017).

Альтернатива, состоящая в формировании репрезентативной выборки фитомассы модельных деревьев на основе «деструктивного» выборочного учета на пробных площадях по всей обширной территории, предназначенной для крупномасштабного использования уравнений, является слишком трудозатратной. В качестве другой альтернативы можно сформировать соответствующие сводки данных, уже использованных в предыдущих исследованиях, объединить их и повторно рассчитать модели фитомассы деревьев, что представляет собой так называемый вторичный анализ, по Дж. Глассу (Glass, 1976). Хотя использование объединённых данных может повысить доступность информации по аллометрическим уравнениям, однако в большинстве опубликованных работ, как уже отмечалось, либо отсутствуют исходные данные для того или иного региона или лесной экосистемы, либо они недоступны для использования.

Наконец, в некоторых работах пытаются получить обобщённые модели фитомассы, основанные на ранее опубликованных уравнениях и выведенных из них псевдоданных или псевдо-наблюдений. Подобный анализ предыдущих анализов и результатов независимых исследований относят к категории мета-анализа (Glass, 1976; Pastor et al., 1984; Iyengar, 1991; Jenkins et al., 2003; Zianis, Mencuccini, 2003; Muukkonen, 2007; Chojnacky et al., 2008; De-Miguel et al., 2014; Forrester et al., 2017). Соответственно модели, выведенные на основании опубликованных ранее уравнений, можно назвать мета-моделями (Urban et al., 1999). Такой подход позволяет обойтись без получения и сбора оригинальных данных. При этом мета-моделирование может расширить доступность данных из разных регионов, поскольку при отсутствии исходных данных регионально специфичную информацию можно извлечь из опубликованных моделей путем генерирования псевдо-данных. К тому же это недорогой метод, поскольку для разработки модели не требуется получения дополнительных деструктивных выборок в полевых условиях. Наконец, метод позволяет объединить все предыдущие соответствующие исследования для получения более обобщенной информации. В таких случаях для надёжных оценок различных фракций фитомассы деревьев необходимо, чтобы определение фракционного состава фитомассы дерева было согласованным во всех моделях, используемых в мета-анализе (De-Miguel et al., 2014).

Истоки и триумф мета-анализа

Мета-анализ как статистическая процедура, объединяющая результаты нескольких независимых исследований, рассматриваемых в качестве «комбинируемых» (Egger et al., 1997*a*), имеет более чем столетнюю историю, и область его применения чрезвычайно широка. Первый мета-анализ был осуществлен в 1904 году Карлом Пирсоном (Pearson, 1904), который попытался разрешить проблему низкой статистической мощности в исследованиях с небольшим размером выборки. Пирсон анализировал резуль-

таты нескольких исследований с целью получения более точных данных, но сама процедура ещё не была обозначена как *мета-анализ* (Egger, Smith, 1997б; O'Rourke, 2007). Позднее Уильямом Кохраном (Cochran, 1937) разработаны методы комбинирования данных из различных экспериментов в области сельского хозяйства.

В 1954 году А. Бирнбаумом (Birnbaum, 1954) разработан альтернативный метод, и предложение Пирсона отошло на задний план, хотя его идея продолжала воплощаться в самых разных приложениях. Но в 2009 году алгоритм Пирсона был окончательно реабилитирован А. Оуэном, и было показано его преимущество по отношению к стандартному тесту Фишера (Owen, 2009).

Первым статистиком, формализовавшим процедуру и введшим понятие *мета-анализа*, был Джин Гласс (Glass, 1976), который считается современным основателем этого метода. Им была предложена классификация алгоритмов получения научных данных на трёх уровнях. *Первичный анализ* - это первоначальный анализ данных в исследовании. Это то, что обычно представляют на основе применения статистических методов.

Вторичный анализ - это ре-анализ данных с целью ответа на исходный вопрос исследования с применением лучших статистических методов, или с целью ответа на новые вопросы со старыми данными. Вторичный анализ является важной особенностью исследования и оценки той или иной инициативы. Некоторые из лучших методистов проводили вторичный анализ в таком «гранд-стиле», что его значение затмевало результаты первичного анализа (Glass, 1976).

В качестве наиболее продвинутого варианта вторичного анализа Дж. Гласс предложил направление под претенциозным названием «*мета-анализ исследований*» по аналогии и в духе таких понятий, как «мета-математика», «мета-психология» и «мета-оценивание». Мета-анализ представляет собой «анализ анализов». Это статистическое обобщение большого числа результатов отдельных исследований с целью нахождения общих закономерностей и выявления факторов, определяющих изменчивость получаемых результатов (Glass, 1976; Gurevitch, Hedges, 2001; Козлов, Воробейчик, 2012). Он представляет строгую альтернативу случайным, частным исследованиям, а также способ обобщения быстро нарастающего объема научной литературы.

Мы сталкиваемся с обилием информации. Проблема заключается в том, чтобы найти знание в информации. Нужны методы упорядоченного объединения исследований с целью извлечения нового знания из множества отдельных работ. Вполне естественно возникает вопрос, как объединить и интерпретировать результаты, полученные по той или иной проблеме, иногда неопределённые и даже противоречивые? (Glass, 1976).

Хороший аналитический обзор является интеллектуальным эквивалентом оригинальных исследований. Но когда профессиональный рост и взаимное признание преимущественно ориентированы на оригинальный научный результат, а финансирование исследований соответственно ограничивается оригинальными работами, очень трудно мотивировать ученого к написанию научного обзора. Когда же при анализе двадцати, тридцати и более научных работ обнаруживаются противоречия и взаимоисключающие выводы, то для снятия подобных неопределённостей необходимость применения мета-анализа становится очевидной (Glass, 1976).

Мета-анализ получал, пусть не всегда безоговорочно, всё более широкое применение как метод синтеза данных в медицине, эпидемиологии, психологии, метеорологии, орнитологии, образовании и маркетинге (Iyengar, 1991; Chamberlain et al., 2009). Область применения мета-анализа охватывает диапазон от «астрономии до зоологии» (Petticrew, 2001). Только в одной области медицины с 1987 по 1996 годы число публикаций возросло с 20 до 800 (Egger, Smith, 1997б) и продолжает нарастать. В общем случае, количество публикаций, основанных на мета-анализе и связанных со здоровьем

человека, увеличилось к 2000 году до 400 в год (Lee et al., 2001). На рис. 1 показано нарастание количества публикаций на основе мета-анализа за период с 1990 по 2006 гг. как в базе данных медицинских и биологических публикаций PubMed (насчитывающей более 27 миллионов цитирований), так и в журнале «Statistics in Medicine».

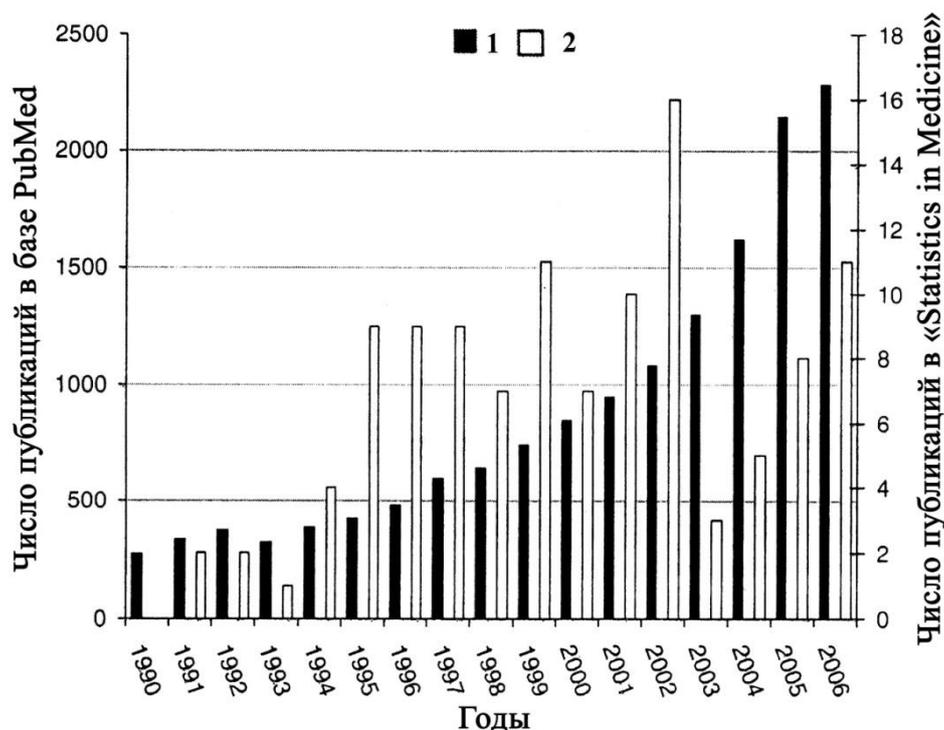


Рис. 1. Количество публикаций по медицинской тематике на основе мета-анализа за период с 1990 по 2006 гг.: 1 – в базе данных PubMed; 2 – в журнале «Statistics in Medicine» (Sutton, Higgins, 2008).

В области экологических дисциплин одна из первых работ с применением мета-анализа была посвящена оценке влияния выборочных рубок на плотность популяций птиц (Fernandez-Duque, Valeggia, 1994). Путем сравнения и объединения «величины эффекта» пяти независимых исследований было установлена отрицательная роль рубок, что не было очевидным при их сравнении традиционным способом. С тех пор наблюдается непрерывный рост числа публикаций с применением мета-анализа по экологической тематике (рис. 2), в том числе – по проблеме лесного биоразнообразия (рис. 3).

В настоящее время проблема поддержания биоразнообразия, в том числе применительно к лесным экосистемам, выходит на глобальный уровень (Liang et al., 2016). Несмотря на существенный прогресс в адаптации мета-аналитических результатов экологических исследований к соответствующим достижениям в медицинских и социальных науках, исследования биологического разнообразия лесов на основе мета-анализа по-прежнему проблематичны. Это связано с длительным протеканием сукцессионных стадий, выходящих за временные пределы экспериментальных проектов, и с большими размерами территорий, на которых необходимо подбирать пробные площади с интересующими вариантами воздействия. Эмпирические исследования по оценке влияния разных воздействий на биоразнообразии сильно различаются по их качеству в отношении количества откликов на воздействия и степени рандомизации их распределения по уровням воздействий при широком распространении проектов, выполняемых на основе псевдо-повторностей (псевдо-выборок) (Spake, Doncaster, 2017). Ребекка Спейк и С. Донкастер полагают, что мета-анализ потенциально может предложить решение по

обширной литературе с применением псевдо-повторностей, поскольку результаты подобных исследований могут быть упорядочены. При этом он должен фокусироваться на определении не столько величины эффекта, сколько его направления (Spake, Doncaster, 2017).

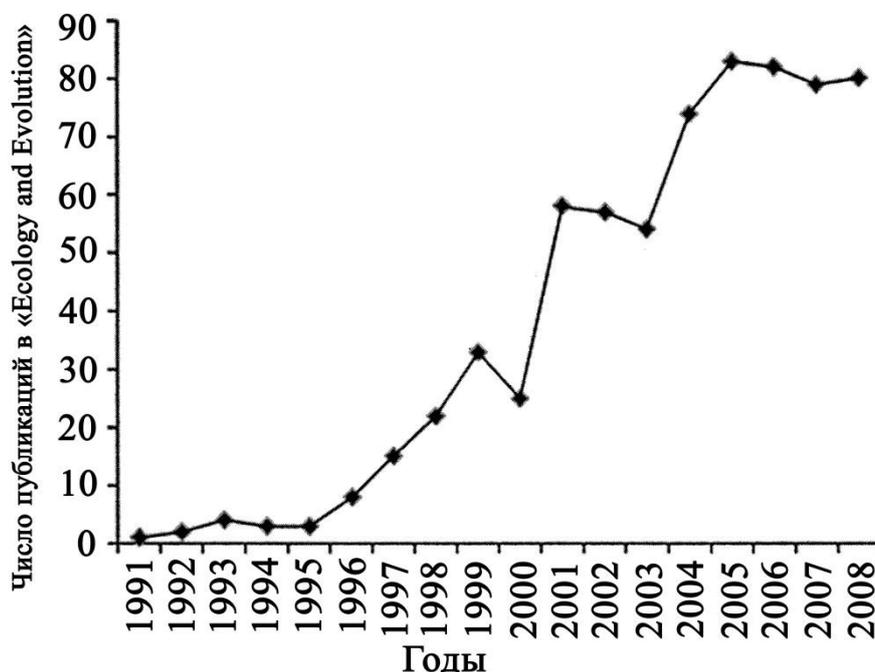


Рис. 2. Количество публикаций по экологической тематике на основе мета-анализа в «Ecology and Evolution» за период с 1991 по 2008 гг. (Stewart, 2010).

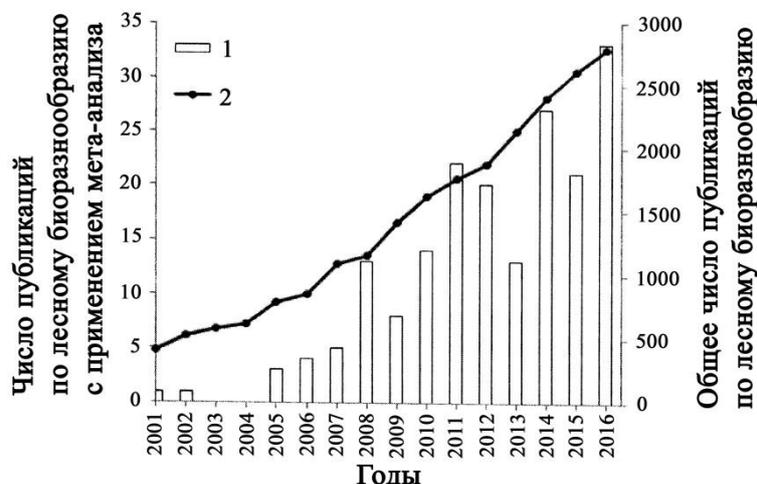


Рис. 3. Количество статей, ежегодно публикуемых в журналах «Web of Science» по теме биоразнообразия лесных экосистем (2), в том числе с применением мета-анализа (1) (Spake, Doncaster, 2017).

Ребекка Спейк и С. Донкастер рассмотрели основные вопросы, которые возникают при включении в мета-анализ разноплановых экспериментов по отклику биоразнообразия на разные хозяйственные или катастрофические воздействия, а также более общие вопросы формулирования и интерпретации комбинированных выводов. Это относится к проблемам практического лесного менеджмента, оценки и взвешивания соответствующей величины эффекта первичных результатов, различающихся по структуре и качеству. При объединении работ, различающихся по экспериментальному дизай-

ну или по таким факторам, как таксономические группы, рекомендовано отказаться от использования величины эффекта, стандартизированной по дисперсии внутри исследования, в пользу альтернативных схем взвешивания при учёте дисперсии между результатами. В заключение статьи авторы рекомендуют проявлять осторожность при интерпретации результатов, особенно когда это касается возможных систематических ошибок при оценке вариантов воздействий на лесные экосистемы (Spake, Doncaster, 2017).

В.К. Шитиков с соавторами (2008) выделяют два основных подхода к выполнению мета-анализа. При первом из них анализ выполняется по первичным данным для каждого объекта наблюдения. Базы данных каждого исследования объединяются, и выполняется их статистическая обработка. Как было отмечено выше, это далеко не всегда выполнимо, поскольку исходные экспериментальные данные или утеряны, или технически недоступны. Кроме того, С. Де-Мигуэль с соавторами (De-Miguel et al., 2014) первичный и вторичный анализы исходных данных полевых измерений (Wirth et al., 2004; Repola, 2008, 2009; Moore, 2010; Pearce et al., 2010; Liu et al., 2016) не относят к категории формального мета-анализа, ссылаясь на выше упомянутую работу Дж. Гласса (Glass, 1976). Расхождение, видимо, связано с разным толкованием понятия научного результата: рассматривать ли формирование баз исходных данных как некий научный результат или же научный результат может быть представлен лишь в итоге их статистической обработки.

При втором подходе обобщаются опубликованные результаты исследований по некой общей проблеме (Шитиков и др., 2008), и именно эта процедура обозначена Дж. Глассом как «анализ анализов».

Критика мета-анализа и некоторые положительные примеры

В общем случае мы имеем два способа обобщения научных результатов. Один из традиционных подходов состоит в том, что некий авторитетный эксперт пишет обзорную статью, анализируя текущее состояние знаний и предлагая направления будущих исследований. Мета-анализ преследует ту же цель, но его методология имеет количественную основу (Iyengar, 1991; Nakagawa, Poulin, 2012).

При наличии таких разумных предпосылок эти подходы, казалось бы, должны быть свободны от полемики, но оказывается, что это далеко не так. С одной стороны, некоторые авторитетные обзоры были раскритикованы за чрезмерную субъективность, за выраженную предвзятость авторов и их нежелание опираться на весомые доказательства. С другой стороны, некоторые результаты мета-анализа подверглись критике за показ их мнимой точности и за слишком упрощенный подход, связанный с объединёнными измерениями и с упором на цифровую формализацию, а не на здравый смысл (Iyengar, 1991). Т. Марков и Г. Кларк (Markow, Clarke, 1997) мета-анализ работ по наследуемости в биологии развития оценивают как «гигантский шаг назад», поскольку в его процессе обобщаются гетерогенные данные. М.В. Козлов и Е.Л. Воробейчик (2012) одну из основных проблем мета-анализа видят в сложности учёта иерархии и анализа взаимодействия исследуемых факторов.

Мета-анализ экологических исследований может завышать величину эффекта вследствие систематической ошибки, обусловленной отсутствием или игнорированием публикаций с отрицательным результатом, или же он может быть предвзятым вследствие засилья господствующей парадигмы (Kotiaho, Tomkins, 2002; Koricheva, 2003; Stewart et al., 2009; Stewart, 2010).

Концептуальную несостоятельность мета-анализа как научного метода попытался обосновать Алван Фейнштейн (Feinstein, 1995): «Основным недостатком мета-анализа является отказ от научных требований, которые так тщательно разрабатывались и создавались в течение XIX и XX веков. В общностях, сформированных для

большинства статистических мета-анализов, теряются или устраняются элементарные научные требования к воспроизводимости и точности результатов, их приемлемых экстраполяций и сопоставлений. Идея получить что-то неизвестно для чего, одновременно игнорируя установившиеся научные принципы, представляет аналогию с алхимией, предшествующей современной научной химии. В алхимии господствовал принцип, который можно назвать “бесплатным обедом”: алхимики надеялись преобразовать существующие вещи в нечто лучшее, например, превращать неблагородные металлы в золото. Недостаток алхимии с точки зрения науки состоял в ее принципе “салатной смеси”. Задолго до современной химии с её воспроизводимой точностью результата алхимики работали с неоднородными веществами, плохо идентифицируемыми смесями. В определённое время эти вещества определялись как земля, воздух, огонь и вода; позже они стали называться минералами и металлами. Вещества алхимиков не способствовали обеспечению научной точности и воспроизводимости результатов до тех пор, пока кислород Лавуазье не разрушил флогистон, а Менделеев не построил точную таксономию - периодическую таблицу элементов. Следование принципам “бесплатного обеда” и “салатной смеси” позволяет утверждать, что мета-анализ представляет статистическую алхимию XXI века» (с. 71).

Хулители мета-анализа обличают его как «доктринерское (догматическое, кабинетное) исследование» и даже как «упражнение в мега-глупости» (Eysenck, 1978). С другой стороны, сторонники мета-анализа называют его «волной в будущее». Но правда о мета-анализе, по-видимому, состоит в том, что он является одним из множества элементов в инструментарии ученого. При вдумчивом и внимательном подходе к тому или иному пулу данных метод может обеспечить ценную информацию. В противном случае он просто усугубляет путаницу, которую был призван прояснить. Что такое мета-анализ? Это использование статистических процедур для объединения результатов отдельных исследований с целью дальнейшего продвижения в ту или иную область научных поисков (Iyengar, 1991).

Наиболее важной и обнадёживающей составляющей мета-анализа является возможность поиска причин, обуславливающих различия между результатами индивидуальных (предыдущих) исследований, а также возможность выявления новых направлений исследования (Fernandez-Duque, Vallenggia, 1994; Козлов, Воробейчик, 2012). При этом часто удается получить принципиально новую информацию, которая не содержалась ни в одной из первичных публикаций.

Экология не основана на простом накоплении данных. Новые данные должны вводиться в контексте существующих знаний и эмпирических исследований. Этот контекст варьирует в связи с различиями видового состава, условий местообитания, с их изменениями в пространстве и времени. Прикладные экологи имеют убедительные и фундаментальные причины для расширения использования мета-анализа, но текущие экологические приложения не всегда могут воспользоваться мета-аналитическими достижениями из других научных дисциплин и передовыми статистическими моделями для описания экологических данных вследствие уникальной структуры последних (Stewart, 2010).

Рассмотрим некоторые примеры положительных результатов мета-анализа.

Известно, что в экологии сообществ меру величины эффекта часто представляют как меру напряжённости взаимодействий между таксонами, однако её обозначения чрезвычайно изменчивы как в теоретических, так и в эмпирических работах, и связь между гипотезами о напряженности взаимодействий, а также метрики, используемые для тестирования этих гипотез, часто не являются явными. Дебора Гольдберг с соавторами (Goldberg et al., 1999) провели мета-анализ базы данных из 296 примеров, взятых из 14 публикаций, в которых были показаны взаимосвязи между интенсивностью конкуренции/взаимопомощи и продуктивностью растений. Результаты были неожиданными-

ми и во многом несогласующимися с существующей теорией: интенсивность конкуренции часто значительно снижалась (вместо увеличения) по мере роста продуктивности, а эффект взаимопомощи (сосуществования) ограничивался скорее более продуктивными, нежели менее продуктивными, местообитаниями. Однако имелись значительные различия в структуре переменных отклика и в мере величины эффекта. Например, влияние конкуренции на финальную биомассу и выживаемость в среднем снизилось при увеличении общего запаса, но на скорости роста не отразилось. С другой стороны, эффект взаимопомощи (сосуществования) преобладал для финальной биомассы и скорости роста при низких запасах, но для выживаемости, напротив, при высоких запасах. Установлено, что ни один из мета-анализов не показал значимой положительной взаимосвязи между конкуренцией и запасом, но часто отмечаемая негативная взаимосвязь является важным феноменом, который не был очевидным при описательном анализе отдельных результатов исследования, и это показывает перспективность применения мета-анализа в экологии (Goldberg et al., 1999).

Путём мета-анализа экологических исследований по теме биоразнообразия растительных сообществ был сделан вывод о влиянии климата на величину эффектов: оказалось, что отрицательные эффекты менее выражены в высоких широтах. В другом случае оказалось, что обилие нескольких групп биоты уменьшалось с увеличением длительности воздействия, тогда как влияние загрязнения на параметры организменного уровня этих же групп с течением времени ослабевало (Zvereva et al., 2008; Kozlov, Zvereva, 2011; Козлов, Воробейчик, 2012). При выполнении и интерпретации результатов мета-анализа существует много нерешенных проблем. Однако расширение исследований в этом направлении определяется объективной необходимостью перехода от «лоскутной экологии» к концепции широкого обобщения данных локальных экспериментов для обоснования ведущих тенденций экологического развития на основе комплекса частных гипотез (Шитиков и др., 2008).

В экспериментах с искусственным повышением температуры воздуха и почвы на 32 местообитаниях Северной Америки и Западной Европы, включающих высокогорную и приполярную тундру, травяные сообщества и лесные экосистемы, были получены исключительно разнообразные отклики таких показателей, как дыхание почвы, минерализация азота и надземная продуктивность растительности. Результаты мета-анализа полученных откликов показали, что в течение 2-9-летнего потепления в диапазоне 0,3–6,0°C дыхание почв увеличилось на 20 %, скорость минерализации азота – на 46% и продуктивность растительности – на 19%, причём величина отклика не зависела от климатических, географических и экологических особенностей местообитаний (Rustad et al., 2001).

Как известно, в тропической зоне вторичные леса и монокультуры являются двумя наиболее распространенными способами лесовосстановления. М. Боннер с соавторами (Bonner et al., 2013) с помощью мета-анализа сравнили их по скорости роста и углерододепонирующей способности (накоплению фитомассы) в зависимости от климатических и экологических показателей. Установлено, что общая тенденция накопления надземной фитомассы в культурах существенно выше, чем во вторичных лесах. Скорость роста культур отрицательно коррелирует с сезонностью осадков, в то время как скорость роста вторичных лесов положительно коррелирует с проективным покрытием и негативно – с продолжительностью предшествующего землепользования. В целом, различие вторичных тропических лесов и монокультур по накоплению фитомассы оказалось выраженным в меньшей степени, чем ранее предполагалось (Bonner et al., 2013).

С. Золкос с соавторами (Zolkos et al., 2013) провели мета-анализ имеющихся оценок точности определений растительной биомассы в более 70 рецензируемых статьях, выполненных с использованием различных платформ дистанционного зондирова-

ния (бортовых и космических) и разных типов сенсоров (оптический, радар и лидар), с преимущественным упором на работы, выполненные с применением лидара (лазерного устройства), поскольку они показали наименьшие ошибки при использовании в комбинации с другими мульти-сенсорными измерениями. Были показаны систематические различия точности между типами лидарных систем на различных платформах, но что более важно - различия между типами леса (биомами) и размерами пробных площадей, использованных для полевой калибровки и оценки точности.

Д. Чойнаки с соавторами (Chojnasky et al., 2008) отобрали 318 уравнений связи общей биомассы дерева с диаметром ствола из имеющихся в литературе 2626 уравнений, рассчитанных для всех древесных видов Северной Америки (Jenkins et al. 2003), и применили модифицированный мета-анализ для разработки новых уравнений. Это было выполнено с помощью регрессионного анализа псевдо-данных, полученных табулированием 318 уравнений по диаметру ствола в диапазоне его варьирования в исходных данных. Все псевдо-данные были стратифицированы по 10 группам древесных видов для разработки новых финальных уравнений.

И наконец, в противовес доводам Алвана Фейнштейна, корректное применение мета-анализа обеспечивает воспроизводимость научного результата, которая, как уже отмечалось, является важной особенностью научных исследований. В этой связи М.В. Козлов и Е.Л. Воробейчик (2012) пишут: «Теоретически выводы мета-анализа воспроизводимы: любой профессионал, используя описанные критерии отбора публикаций и методы поиска информации, соберет тот же самый набор первичных исследований, извлечет из них те же данные и придет к тем же заключениям, что и его предшественники» (с. 244).

Практическая же воспроизводимость результата и высокий статус мета-анализа как научного метода могут быть обеспечены лишь при высоком качественном уровне собственно мета-аналитического процесса, достижение которого и представляет основную сложность (Nakagawa et al., 2017): контроль качества процесса не поддается формализации и является «искусством импровизации». Видимо, поэтому мета-анализ определяется А. Саттоном и Дж. Хиггинсом (Sutton, Higgins, 2008) как наука и искусство одновременно в соответствии с общим принципом: математическое моделирование представляет сферу науки, но создание «хорошей» модели является искусством применения математики (Мак-Лоун, 1979).

Этапы мета-анализа

Важнейшими этапами мета-анализа согласно второму подходу, по В.К. Шитикову с соавторами (2008), являются:

- 1 - выработка критериев включения оригинальных исследований в мета-анализ;
 - 2 - оценка статистической неоднородности результатов оригинальных исследований;
 - 3 - проведение собственно мета-анализа (получение обобщенной оценки величины эффекта воздействия);
 - 4 - анализ чувствительности выводов (Шитиков и др., 2008. С. 223).
- Рассмотрим их отдельно в названной последовательности.

1. Выработка критериев включения оригинальных исследований в мета-анализ

До начала детального исследования необходимо написать протокол, который четко обозначает цели, выдвигаемые гипотезы, возможные направления, предлагаемые методы и критерии, необходимые для идентификации и отбора предыдущих исследований, а также для извлечения и анализа информации. Необходимо определиться со

стратегией отбора предыдущих независимых исследований. В частности, нужно решить, включать ли в анализ неопубликованные результаты исследований, поскольку они могут систематически отличаться от опубликованных результатов. С другой стороны, при ограничении анализа лишь опубликованными результатами можно получить искаженные выводы вследствие неполной информации (Egger et al., 1997a).

В.К. Шитиков с соавторами (2008) так комментируют этот этап мета-анализа: «Необходимо отметить, что этап определения круга исследований, включаемых в обобщение, является ключевым как в аспекте полноты выявления выполненных работ, так и в отношении формальных критериев оценки их методологического качества. Обоснованность мета-анализа существенно зависит от корректности включенных в него исходных материалов, а также возможных различий исследований по критериям включения и исключения, структуре и составу проведенных манипуляций, контролю качества и т. д., что часто становится источником систематических ошибок обобщенного вывода. Существует также смещение, связанное с преимущественным опубликованием положительных результатов эксперимента... Формулируя задачу синтеза исследований, необходимо установить две основных отправных точки для применения статистических методов: способ установления эффекта воздействия, о котором должны свидетельствовать обобщаемые показатели, и общий подход к объединению совокупности разнородных данных (используется фиксированная или случайная модель эффектов)» (с. 224).

2. Оценка статистической неоднородности результатов оригинальных исследований

Для корректного сравнения имеющихся результатов исследований они должны быть выражены в стандартном формате. Величина различия может быть обусловлена, например, объемом выборки. Поэтому различия часто, особенно на первых порах, выражали в единицах стандартного отклонения. Дж. Глассом (Glass, 1976) в обширной медицинской литературе было найдено около 400 контролируемых оценок воздействия психотерапии. Каждое исследование было описано в количественных или квази-количественных терминах несколькими способами. Наиболее важным показателем оказалась «величина эффекта» терапии, т. е. средняя разность результирующей переменной между пролеченными и контрольными субъектами, деленная на стандартное отклонение в пределах их группы. Таким образом, эффект терапии может быть охарактеризован количественно в размере 0,5; 0,75 или 0,25 от стандартного отклонения. Поскольку в некоторых исследованиях измерялись результаты более чем одной переменной или более одного раза, количество измерений величины эффекта (800) превышает число исследований (375). Результат терапии в самом общем случае показан на рис. 4. Средняя величина 800 измерений величины эффекта составила 0,68 от стандартного отклонения, т.е. средняя величина результирующей переменной в пролеченной группе

субъектов превышает таковую в контрольной группе на $2/3$ стандартного отклонения.

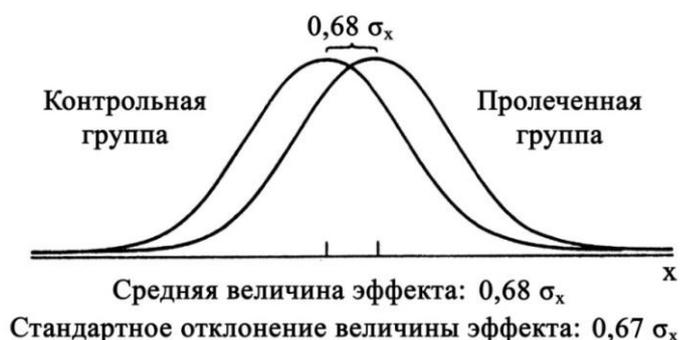
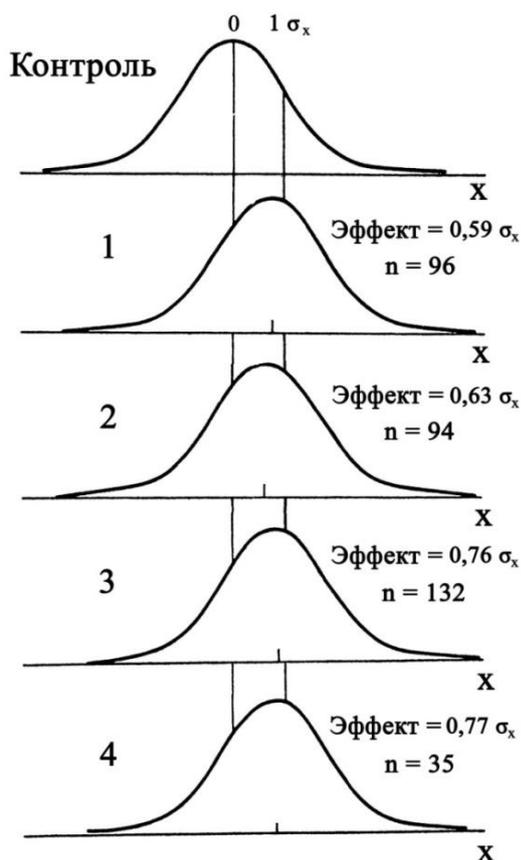


Рис. 4. Кривые нормального распределения, иллюстрирующие совокупный эффект психотерапии по отношению к контрольной группе субъектов (Glass, 1976).



Величина эффекта четырёх способов терапии показана на рис. 5. Пять кривых нормального распределения представляют собой результаты типичных четырех способов лечения по отношению к контрольной группе субъектов. Очевидно, что между четырьмя способами терапии различия по величине их эффекта в среднем незначительные.

Рис. 5. Нормальные кривые, иллюстрирующие воздействие четырех способов (обозначены арабскими цифрами) психотерапии по сравнению контрольными группами (Glass, 1976).

Для непрерывных данных целью мета-анализа обычно является получение обобщенного эффекта воздействия в виде точечных значений и оценок доверительных интервалов. В качестве примера графической интерпретации результата выполненного мета-анализа В.К. Шитиков с соавторами (2008) дают точечные и интервальные оценки величин эффектов для каждого из включенных в мета-анализ исследований (рис. 6).

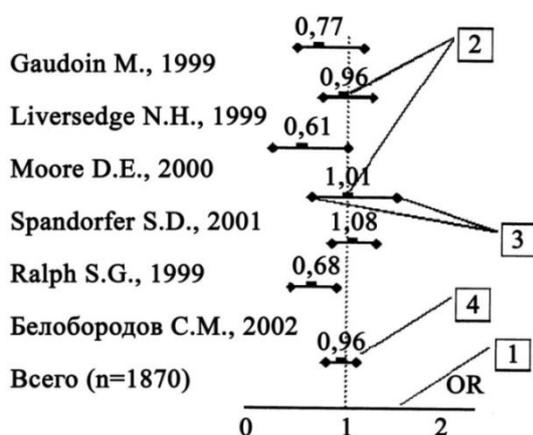


Рис 6. Типичное представление данных мета-анализа в диаграмме. 1 – шкала относительного риска (OR) воздействия (если OR правее "линии нулевого эффекта" при $OR = 1$ – эффект воздействия выше, чем в группе контроля, если левее – ниже); 2 и 3 – средние и доверительный интервал OR в исследованиях, рассматриваемых в мета-анализе; 4 – результат мета-анализа (выборочная оценка математического ожидания OR и его доверительный интервал по объединенным данным) (Шитиков и др., 2008).

Если результаты исследований сильно отличаются (т.е. гетерогенны, или статистически неоднородны), то их объединение может быть нецелесообразным. Гетерогенность результатов разных исследований при мета-анализе может быть обусловлена: (а) дисперсией внутри исследований вследствие случайных отклонений результатов разных исследований от истинной фиксированной оценки эффекта воздействия и (б) дисперсией между исследованиями, вызываемой случайными эффектами, т.е. различиями между изучаемыми выборками по характеристикам экспериментальных единиц, специфике воздействия, наличию неконтролируемых вмешательств, приводящими к смещению значений отклика (Шитиков и др., 2008).

Один из подходов в тестировании гетерогенности различных исследований заключается в статистической проверке степени схожести их результатов. В таких процедурах проверяется, отражают ли результаты исследования один основной эффект, а не

распределение эффектов. Если тест показывает однородность результатов, то различия между исследованиями являются следствием варьирования выборки, и подходит модель с фиксированными эффектами (fixed effects). Если же тест показывает, что между результатами исследования существует значительная неоднородность, применяется модель случайных эффектов (random effects).

Недостатком этого подхода является то, что статистические тесты недостаточно мощны, они часто не отвергают нулевую гипотезу однородности результатов, даже если существуют существенные различия между исследованиями. Хотя не существует статистического решения этого вопроса, неоднородность результатов исследования не следует рассматривать как проблему исключительно мета-анализа. Гетерогенность не должна просто игнорироваться после прохождения статистического теста; скорее, она должна тщательно изучаться с возможной попыткой её объяснения (Bailey, 1987; Egger et al., 1997a).

3. Получение обобщенной оценки величины эффекта воздействия

Один из важных этапов мета-анализа состоит в расчете общего эффекта путем объединения данных. Простое среднее арифметическое всех предыдущих результатов может дать неопределённую или искажённую картину. Результаты небольших локальных исследований имеют меньшее влияние и меньший вес по сравнению с более серьёзными и методически выдержанными исследованиями. Методы мета-анализа используют средневзвешенные результаты, в которых исследования, основанные на большем количестве независимых повторностей, имеют больший вес, чем исследования, основанные на небольшой выборке (Egger et al., 1997a; Козлов, Воробейчик, 2012).

Существуют три основных вида мета-аналитических моделей, которые отличаются предполагаемым характером (спецификой) исходных данных, но общей и первичной целью всех трех является оценка общего эффекта (Nakagawa et al., 2017). Это: (1) модели с фиксированными эффектами, известные также как модели общего эффекта (common-effect models), (2) модели случайных эффектов и (3) многоуровневые (иерархические) модели (Cheung, 2014). В первых двух видах моделей предполагается, что все величины эффектов являются независимыми (т.е. один эффект на одно исследование при отсутствии других источников их взаимной зависимости). Важной предпосылкой **моделей с фиксированными эффектами** является также то, что все величины эффектов составляют общее среднее, и таким образом дисперсия данных объясняется исключительно ошибкой выборки (то есть, дисперсией выборки v_i , которая связана с размером выборки для каждой величины эффекта) (рис. 4-7).

Модель с фиксированными эффектами

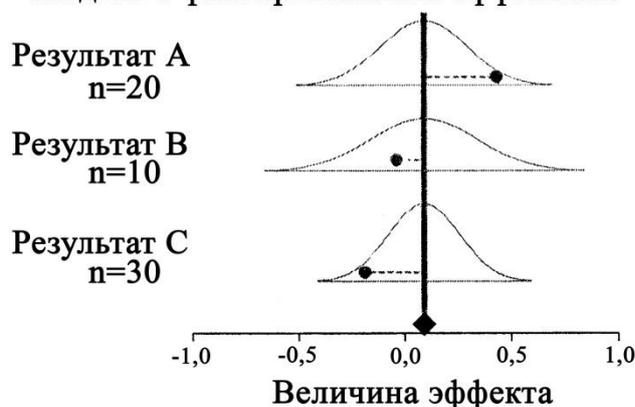
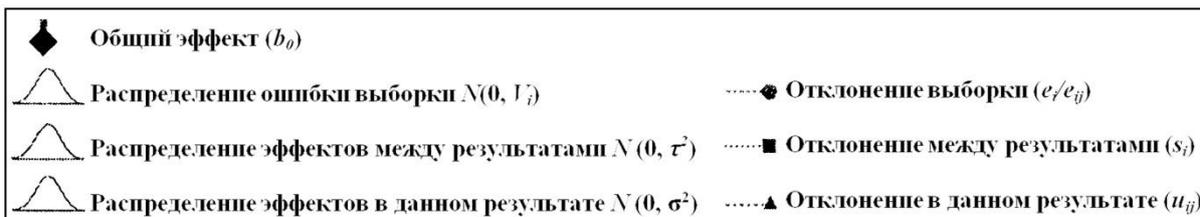


Рис. 7. Визуализация модели с фиксированными эффектами, которая может быть записана как $y_i = b_0 + e_i$, где y_i – наблюдаемый эффект в i -м результате (исследовании) ($i = 1 \dots k$); b_0 – общий эффект (общее среднее) от k результатов; e_i – отклонение от b_0 в i -м результате, распределённое с дисперсией выборки v_i (Nakagawa et al., 2017).

Пояснения к рис. 7-9 (Nakagawa et al., 2017):



Модель с фиксированными эффектами предполагает, часто необоснованно, что исследуемая изменчивость обусловлена исключительно случайными вариациями (Yusuf et al., 1985). Вследствие этого при бесконечно большом числе наблюдений все исследования давали бы идентичные результаты. Иными словами, модель с фиксированными эффектами предполагает, что выявляемые различия результатов исследований обусловлены только дисперсией внутри исследований, а дисперсия между исследованиями равна нулю; «модель исходит из предположения, что все наблюдения основаны на влиянии одной и той же комбинации идентичных факторов, изучаемое вмешательство во всех исследованиях имеет одну и ту же эффективность, а отличие в данных определяется лишь специфическими особенностями первичных единиц, использованных в исследованиях» (Шитиков и др., 2008. С. 228).

Это предположение, однако, является нереальным для большинства биологических мета-анализов, особенно с участием нескольких популяций, видов и экосистем. Использование модели с фиксированными эффектами может быть оправдано, когда величина эффекта оценивается для одного и того же вида или популяции (в предположении наличия одного эффекта в данном результате исследования, а также независимости величин эффекта друг от друга).

Модель случайных эффектов предполагает, что в каждом исследовании имеется специфичный эффект, и принимает это во внимание в качестве дополнительного источника варьирования. Предполагается, что эффективность изучаемого вмешательства в разных исследованиях может быть разной, и учитывается дисперсия не только в пределах одного исследования, но и между разными исследованиями. В этом случае суммируются дисперсии внутри исследований и дисперсия между ними, что в итоге даёт более широкий доверительный интервал по сравнению с моделью фиксированного эффекта (DerSimonian, Laird, 1986; Шитиков и др., 2008). Предполагается, что эффекты распределены случайным образом, и центральная точка этого распределения находится в фокусе оценки совокупного эффекта.

Модели случайных эффектов основаны на предположении, что все исследования основаны на выборках из одной генеральной совокупности, а это означает, что эти модели могут применяться в случаях, когда разные исследования способны дать количественную оценку различных базовых средних эффектов, что и наблюдается в случае биологических мета-анализов (рис. 8). В моделях случайных эффектов нужно квантифицировать дисперсию между исследованиями τ^2 , и чтобы правильно оценить эту вариативность, требуется размер выборки не менее десяти величин эффекта. Таким образом, модели случайных эффектов могут быть непригодны для мета-анализа с незначительными величинами эффекта, и в таких ситуациях могут быть уместны модели с фиксированными эффектами (принимая во внимание вышеупомянутые предположения).

Хотя ни одну из двух упомянутых моделей нельзя назвать «корректной», существенная разница в совокупном эффекте, рассчитанном по моделям фиксированного и случайного эффектов, может быть получена только в случае гетерогенных результатов исследований (Berlin et al., 1989; Egger et al., 1997a).

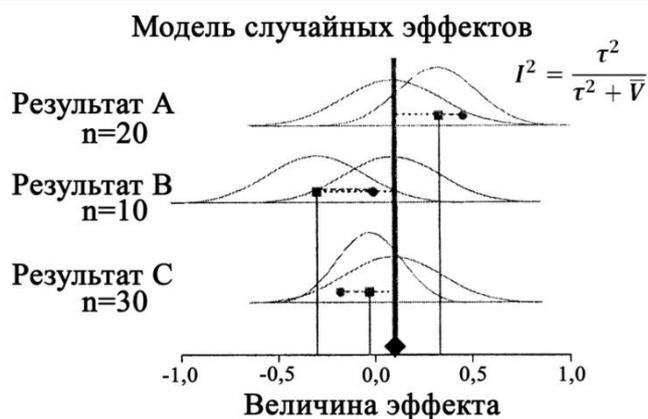


Рис. 8. Визуализация модели случайных эффектов, которая может быть записана как $y_i = b_0 + s_i + e_i$, где b_0 - общее среднее для различных результатов, каждый из которых имеет различные средние, отклоняющиеся от b_0 на величину s_i , которая распределена с дисперсией τ^2 между результатами (аналог σ^2). В правом верхнем углу показана формула статистики гетерогенности I^2 для модели случайных эффектов, где \bar{v} — типичная дисперсия выборки (возможно, наиболее просто определяемая как среднее значение

выборочных дисперсий v_i) (Nakagawa et al., 2017).

Многоуровневые модели основываются на предположении о независимости результатов моделей фиксированных и случайных эффектов. Например, эти модели предполагают несколько величин эффекта в одном и том же исследовании, что возможно в случае, если одно исследование содержит несколько различных экспериментальных воздействий, или же одно и то же экспериментальное воздействие применяется для различных видов в рамках одного исследования. Простейшая многоуровневая модель, показанная на рис. 9, включает в себя исследование нескольких эффектов, но нетрудно его представить с включением большего числа уровней, например, с эффектом биологического вида. При введении способов взаимозависимости эффектов требуется моделирование корреляционных и ковариационных матриц (Nakagawa et al., 2017).

Важно правильно выбрать тут или иную модель или набор моделей, поскольку применение несоответствующей модели может привести к ошибочным выводам. Например, применение модели с фиксированными эффектами в случае, когда более приемлема модель случайных эффектов, может привести к ошибкам в оценке как величины общего эффекта, так и его неопределенности (Borenstein et al., 2010). Как видно из рис. 7-9, каждая из трех основных мета-аналитических моделей предполагает, что величины эффекта распределены вокруг одного общего эффекта (b_0).

В качестве других подходов к выполнению мета-анализа можно отметить байесовский, кумулятивный и регрессионный мета-анализы.

Байесовский мета-анализ - назван в честь автора соответствующей теоремы Томаса Байеса (1702—1761) — английского математика и священника, который первым предложил использование теоремы для корректировки убеждений, основываясь на обновлённых данных. Теорема (формула) Байеса — одна из основных теорем элементарной теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие. Другими словами, по формуле Байеса можно более точно пересчитать вероятность, взяв в расчет как ранее известную информацию, так и данные новых наблюдений.

Байесовские модели доступны в предположении наличия как фиксированных, так и случайных эффектов (Eddy et al., 1992). Доверительный интервал при этом более широкий, чем при использовании традиционных моделей, поскольку вводится ещё один компонент изменчивости - от предварительного (априорного) распределения. Байесовский мета-анализ позволяет рассчитать априорные вероятности эффективности воздействия с учетом косвенных данных. Такой подход особенно эффективен при малом числе анализируемых исследований. Он обеспечивает более точную оценку эффективности воздействия в модели случайных эффектов за счет объяснения дисперсии между разными исследованиями (Шитиков и др., 2008). Байесовские подходы, тем не менее, являются спорными, потому что определения априорной вероятности часто основываются на субъективных оценках и мнениях (Egger et al., 1997a).

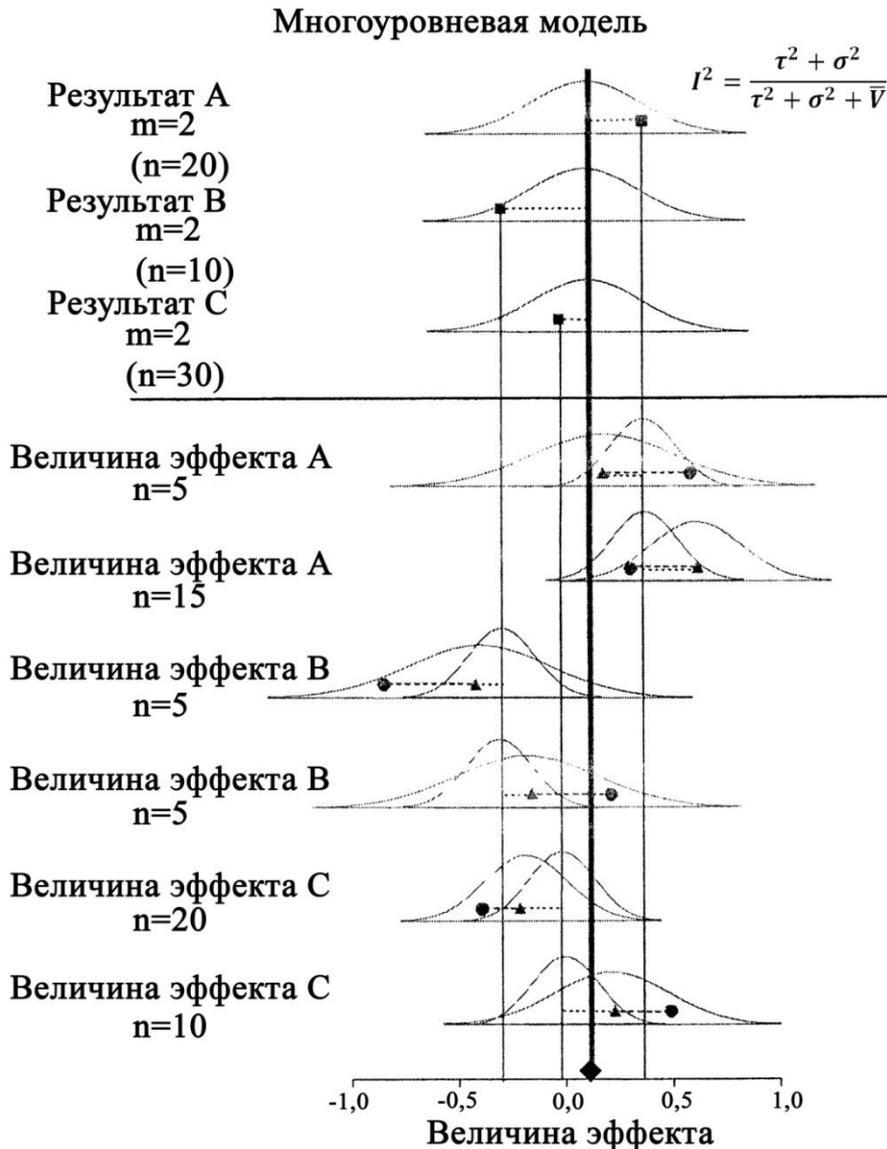


Рис. 9. Визуализация многоуровневой модели, которая может быть записана как $y_{ij} = b_0 + s_i + u_{ij} + e_{ij}$, где u_{ij} – отклонение от s_i для j -й величины эффекта, распределённой с дисперсией σ^2 , e_{ij} – отклонение от u_{ij} . Каждый из k результатов имеет m величин эффекта ($j=1 \dots m$). В правом верхнем углу показана формула многоуровневого мета-анализа для статистики гетерогенности I^2 , где в числитель и знаменатель включена дисперсия между результатами σ^2 , что отличает её от формулы I^2 для модели случайных эффектов (Nakagawa et al., 2017).

Кумулятивный мета-анализ – частный случай байесовского мета-анализа – пошаговая процедура включения результатов исследований в мета-анализ по одному в соответствии с каким-либо принципом (в хронологической последовательности, по мере убывания методологического качества исследования и т.д.). Он позволяет рассчитывать предтестовые (априорные) и послетестовые (апостериорные) вероятности в итерационном режиме по мере включения исследований в анализ (Шитиков и др., 2008). Кумулятивный мета-анализ определяется как анализ, повторяемый всякий раз, когда становится доступным ещё один, очередной эксперимент. Кумулятивный мета-анализ ретроспективно устанавливает тот момент времени, когда эффект воздействия достигает обычного уровня значимости (Egger et al., 1997б).

Регрессионный мета-анализ (логистическая регрессия, регрессия взвешенных наименьших квадратов, модель Кокса и др.) определим в редакции В.К. Шитикова с соавторами (2008): «Используется при существенной гетерогенности результатов исследований. Он позволяет учесть влияние нескольких характеристик исследования (например, размера выборки, мощности воздействующего фактора, способа его проявления, характеристик экспериментальных единиц и др.) на результаты испытаний воз-

действия. Результаты такого мета-анализа обычно представляют в виде коэффициента наклона с указанием доверительных интервалов» (с. 229).

При использовании многопараметрического синтеза и соответствующего сопоставления эффектов многих воздействий можно содействовать приоритету природоохраняющих стратегий, но экологам еще предстоит преодолеть разрыв между статистическим анализом и реальным принятием решений и в полной мере реализовать выгоду от доканной парадигмы (Ades, 2006; Stewart, 2010).

4. Анализ чувствительности выводов

В отношении корректности метода выполнения того или иного мета-анализа мнения часто расходятся. Поэтому после получения обобщенной оценки величины эффекта надежность (робастность, устойчивость) результатов при разных вариантах всегда должна проверяться путём тщательного анализа чувствительности. Одним из способов его проведения является сопоставление результатов, получаемых в двух моделях – фиксированных и случайных эффектов. Во второй модели результаты обычно бывают статистически менее значимыми. Другой способ анализа чувствительности – исключение того или иного исследования из анализа и пересчет результатов с последующей оценкой гетерогенности результатов по критерию «хи-квадрат». Анализ чувствительности должен показать, что результаты данного мета-анализа устойчивы как в отношении применяемого статистического метода, так и при исключении из рассмотрения исследований низкого качества (Egger et al., 1997a; Шитиков и др., 2008).

Для выполнения мета-анализа используются пакеты прикладных программ, в частности, ReviewManager (<http://www.cc-ims.net/RevMan>), в который включены необходимые сервисные модули для оформления обзора и статистические процедуры для выполнения самого мета-анализа (Шитиков и др., 2008). Имеются и специализированные программные обеспечения для выполнения мета-анализа, например, MetaWin (Rosenberg et al., 2000).

В серии статей по медицинской тематике (Egger et al., 1997b, 1998; Egger, Smith, 1997a,b; 1998; Smith et al., 1997; 1998) коллективом авторов дан последовательный анализ достоинств и «методических ловушек», сопровождающих мета-анализ как научный метод: показаны возможности и возлагаемые на него надежды, проанализированы основные положения и особенности алгоритма, приведены варианты тестирования смещений, показаны опасности получения «псевдо-точного» результата, а также нерешённые проблемы и открывающиеся новые перспективы. В частности, предложена процедура выявления систематической ошибки публикации, которая состоит в расчёте простой линейной регрессионной зависимости величины эффекта в исследовании, деленной на его стандартную ошибку, от обратной величины стандартной ошибки, с последующей проверкой того, является ли величина свободного члена регрессии статистически значимой на уровне $p < 0,1$ (Egger et al., 1997b). В глоссарии по мета-анализу эта процедура обозначена как «метод Эггера» (Delgado-Rodríguez, 2001).

Наиболее полное исследование результатов применения мета-анализа в биологических науках с соответствующими выводами выполнено Ш. Накагавой с соавторами (Nakagawa et al., 2017). Их своеобразная дорожная карта для начинающего мета-аналитика (рис. 10) с соответствующими комментариями по десяти позициям подводит итог мета-аналитическим исследованиям в биологии по состоянию на сегодняшний день. При этом чрезвычайно полезным является терминологический глоссарий по мета-анализу (Delgado-Rodríguez, 2001).

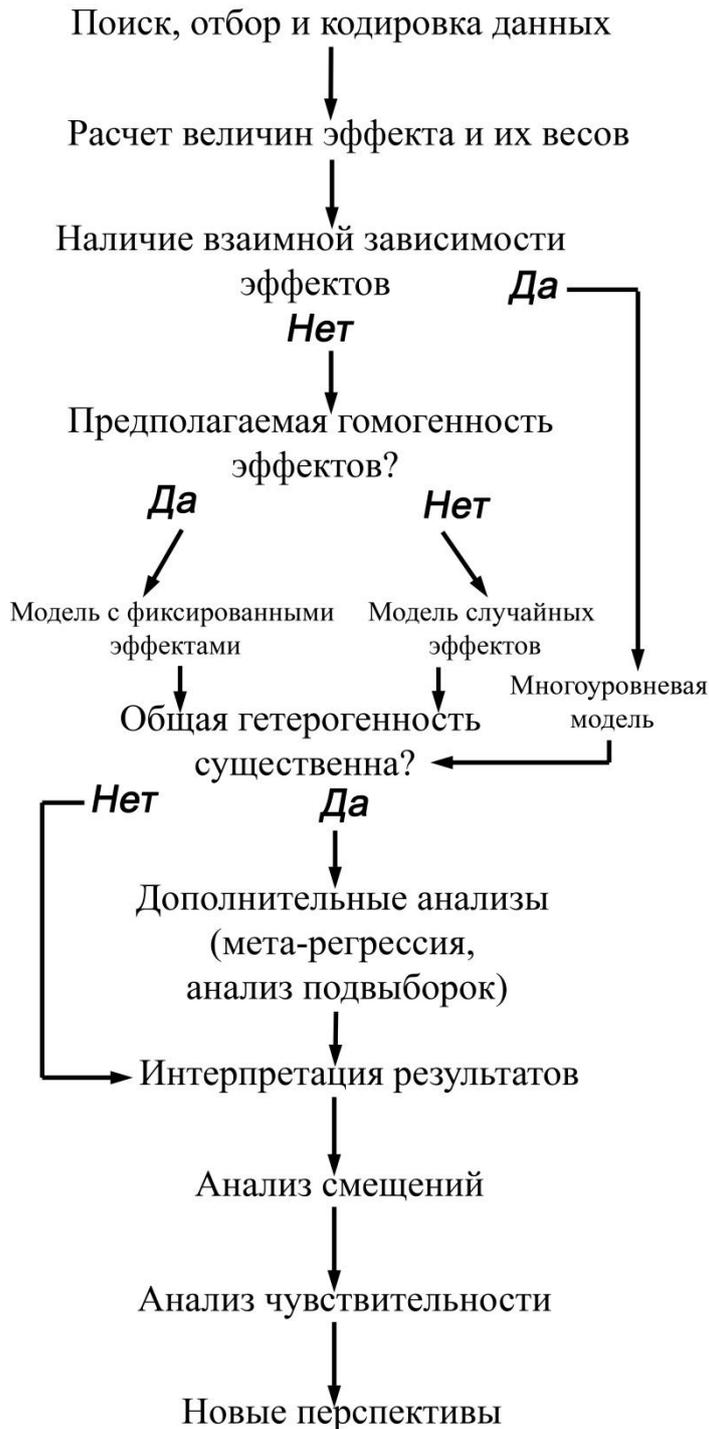


Рис. 10. Дорожная карта для начинающего мета-аналитика (Nakagawa et al., 2017).

Заключение. Новые идеи мета-анализа представляют собой «генерируемые обзором доказательства», потому что только интегрирование результатов исследований стимулирует генерирование новых идей. Для биологов это равносильно пониманию того, что невозможно получить новые данные об экологии вида, изучая его в изоляции от окружающей среды. Поскольку мета-анализ приводит доступные (опубликованные) исследования в совокупный систематический и обобщающий порядок, исследователи, наряду с основными результатами мета-анализа, могут получить дополнительные количественные сведения. Например, выяснить, какие именно первичные результаты пока отсутствуют, показать, какие направления перспективных исследований выявлены и какие дополнительные эксперименты необходимы для этого. Но это возможно лишь с оговоркой, что ценность этих новых идей, выявленных пробелов в знаниях и возможных пер-

спективных направлений исследований зависит от ответов на всю совокупность основополагающих десяти вопросов, сформулированных для биологов Ш. Накагавой с соавторами в виде комментария к дорожной карте (см. рис. 10), и в зависимости от качества ответов на поставленные вопросы можно оценить мета-анализ либо как «мега-озарение», либо как «мега-ошибку», либо как нечто среднее между ними (Nakagawa et al., 2017). В стремлении обеспечить корректность мета-анализа «искусство импровизации» в конечном итоге определяет его результат.

В последнее время наметился новый подход к мета-анализу существующих аллометрических уравнений фитомассы на основе моделирования смешанных эффектов (mixed-effects modelling) с использованием имитированных данных. При этом полученные обобщенные мета-модели могут быть откалиброваны для местных условий. Этот

мета-аналитический подход позволяет на основе использования предыдущих исследований свести к минимуму сбор исходных данных и определённым образом учитывать неизвестные ранее различия между разными регионами в пределах крупных областей. Фиксированная часть мета-модели позволяет сделать прогноз надземной фитомассы в пределах практически всего естественного ареала вида. Значительное улучшение прогностической способности модели достигается путём использования небольших локальных наборов данных с целью её калибровки. Процедура калибровки для оценки фитомассы в локальных условиях основана на применении лучшего линейного несмещённого предиктора случайных эффектов. Прогностическая способность мета-моделей при различных стратегиях выборочного учёта проверяется на независимом наборе данных.

В итоге мета-модели смешанных эффектов могут дать точные и надежные оценки фитомассы на больших территориях. Их калибровка для конкретных локальных условий, основанная на минимальном объёме исходных данных, даёт возможность получить уравнения, лучшие по отношению к таким же уравнениям, полученным на больших по объёму выборках. Преимущества мета-моделей смешанных эффектов представляют интерес не только для дальнейших исследований в отношении лесной фитомассы, но в целом для исследований в рамках лесной экологии (De-Miguel et al., 2014). Анализ состояния и открывающихся новых перспектив мета-анализа на основе моделей смешанных эффектов составит предмет нашего специального обзора.

В развитие обозначенного в заглавии статьи направления оценки фитомассы лесных насаждений в аспекте биогеографии с применением мета-анализа предстоит обобщение 600 таблиц возрастной динамики структуры фитомассы древостоев, совмещённых с традиционными ТХР (Усольцев, 2002), выявление трансконтинентальных зависимостей лесной фитомассы от температуры воздуха и осадков и валидация результатов на основе сформированной базы фактических данных о фитомассе лесов Евразии (Усольцев, 2010; Usoltsev, 2013). На уровне модельных деревьев предстоит сформировать базу данных по опубликованным аллометрическим уравнениям лесообразующих древесных видов Евразии, выполнить их обобщение на основе мета-анализа, выявить трансконтинентальные зависимости приведённой фитомассы деревьев от температуры и осадков и сопоставить (калибровать) полученные результаты с материалами базы данных о фактической фитомассе модельных деревьев лесообразующих древесных видов Евразии (Усольцев, 2016а,б).

Список использованной литературы

- Борщев В.Б.* Банки и базы данных // Природа. 1982. № 3. С. 64-75.
- Козлов М.В., Воробейчик Е.Л.* Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: представление результатов в публикациях // Экология. 2012. № 4. С. 243-251.
- Мак-Лоун Р.Р.* Математическое моделирование – искусство применения математики // Математическое моделирование. М.: Мир, 1979. С. 9-20.
- Усольцев В.А.* Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. 762 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>).
- Усольцев В.А.* Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с. (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/2606>).
- Усольцев В.А.* Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016а. 336 с. ISBN 978-5-94984-568-4 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>).

Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных на рус. и англ. яз. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016б. ISBN 978-5-94984-600-1 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6102>).

Усольцев В.А., Колчин К.В., Воронов М.П. Фиктивные переменные и смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев (на примере *Picea L.*) // Эко-потенциал. 2017а. № 1 (17). С. 22-39 (<http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6502/1/eko-17-02.pdf>).

Усольцев В.А., Колчин К.В., Маленко А.А. Смещения всеобщих аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев лиственницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017б. № 4 (150). С. 85-90 (<http://www.asau.ru/vestnik/2017/4/085-090.pdf>).

Усольцев В.А., Колчин К.В., Норицина Ю.В., Азарёнок М.В., Богословская О.А. Смещения всеобщих видоспецифичных аллометрических моделей при локальной оценке фитомассы деревьев сосны, кедра и пихты // Эко-потенциал. 2017в. № 2 (18). С. 47-58 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6552>).

Усольцев В.А., Колчин К.В., Азарёнок В.А. О возможностях применения всеобщих и региональных аллометрических моделей при оценке фитомассы деревьев ели // Аграрный вестник Урала. 2017г. № 06 (160). С. 33-37

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). 2-е изд. Москва: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Крамаренко С.С., Якимов В.Н. Современные подходы к статистическому анализу экспериментальных данных // Проблемы экологического эксперимента (планирование и анализ наблюдений) / Под ред. Г.С. Розенберга и Д.Б. Гелашвили. Тольятти: Ин-т экологии Волжского бассейна, 2008. С. 212-250.

Ades T. Multiparameter evidence synthesis in epidemiology and medical decision making: current approaches // Journal of the Royal Statistical Society. Series A. 2006. Vol. 169 (1). P. 5–35.

Bailey K.R. Inter-study differences: how should they influence the interpretation and analysis of results? // Statistics in Medicine. 1987. Vol. 6. P. 351-358.

Berlin J.A., Laird N.M., Sacks H.S., Chalmers T.C. A comparison of statistical methods for combining event rates from clinical trials // Statistics in Medicine. 1989. Vol. 8. P. 141-151.

Birnbaum A. Combining independent tests of significance // Journal of the American Statistical Association. 1954. Vol. 49. P. 559–574.

Bonner M.T.L., Schmidt S., Shoo L.P. A meta-analytical global comparison of above-ground biomass accumulation between tropical secondary forests and monoculture plantations // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 291. P. 73-86.

Borenstein M., Hedges L.V., Higgins J.P.T., Rothstein H. A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis // Research Synthesis Methods. 2010. Vol. 1. P. 97–111.

Chamberlain D.E., Cannon A.R., Toms M.P., Leech D.I., Hatchwello B.J., Gaston K.J. Avian productivity in urban landscapes: a review and meta-analysis // Ibis. 2009. Vol. 151. P. 1–18.

Cheung M.W.L. Modeling dependent effect sizes with three-level meta-analyses: a structural equation modeling approach // Psychological Methods. 2014. Vol. 19. P. 211–229.

Chojnacky D.C., Jenkins J.C., Holland A.K. Improving North American Forest Biomass Estimates from Literature Synthesis and Meta-Analysis of Existing Biomass Equations // Forest Inventory and Analysis Symposium; October 21-23, 2008: Park City, UT. Proc.

RMRS-P-56CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. P. 38-42.

Cochran W.G. Problems arising in the analysis of a series of similar experiments // *Journal of the Royal Statistical Society.* 1937. Vol. 4 (1). P. 102–118 (DOI:10.2307/29841231937).

Crowther T.W., Glick H.B., Covey K.R., Bettigole C., Maynard D.S., Thomas S.M., Smith J.R., Hintler G., Duguid M.C., Amatulli G., Tuanmu M.-N., Jetz W., Salas C., Stam C., Piotto D., Tavani R., Green S., Bruce G., Williams S.J., Wiser S.K., Huber M.O., Hengeveld G.M., Nabuurs G.-J., Tikhonova E., Borchardt P., Li C.-F., Powrie L.W., Fischer M., Hemp A., Homeier J., Cho P., Vibrans A.C., Umunay P.M., Piao S.L., Rowe C.W., Ashton M.S., Crane P.R., Bradford M.A. Mapping tree density at a global scale // *Nature.* 2015. Vol. 525. P. 201–205 (DOI: 10.1038/nature14967).

Delgado-Rodriguez M. Glossary on meta-analysis // *Journal of Epidemiology and Community Health.* 2001. Vol. 55. P. 534–536 (DOI:10.1136/jech.55.8.534); (<http://dx.doi.org/10.1136/jech.55.8.534>); (<http://jech.bmj.com/content/55/8/534>).

De-Miguel S., Mehtätalo L., Durkaya A. Developing generalized, calibratable, mixed-effects meta-models for large-scale biomass prediction // *Canadian Journal of Forest Research.* 2014. Vol. 44. P. 648-656.

DerSimonian R., Laird N. Meta-analysis in clinical trials // *Controlled Clinical Trials.* 1986. Vol. 7. P. 177-188.

Eddy D.M., Hasselblad V., Shachter R. Meta-analysis by the confidence profile method: The statistical synthesis of evidence. Boston: Academic Press, 1992. 428 p.

Egger M., Schneider M., Smith G.D. Meta-analysis. Spurious precision? Meta-analysis of observational studies // *British Medical Journal.* 1998. Vol. 316. P. 140-144.

Egger M., Smith G.D. Meta-analysis. Bias in location and selection of studies // *British Medical Journal.* 1998. Vol. 316. P. 61-66.

Egger M., Smith G.D. Meta-analysis. Potentials and promise // *British Medical Journal.* 1997b. Vol. 315. P. 1371–1374.

Egger M., Smith G.D., Phillips A.N. Meta-analysis. Principles and procedures // *British Medical Journal.* 1997a. Vol. 315. P. 1533-1537.

Egger M., Smith G.D., Schneider M., Minder C.E. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test // *British Medical Journal.* 1997c. Vol. 315. P. 629-634.

Eysenck H.J. An exercise in mega-silliness // *American Psychologist.* 1978. Vol. 33. No 5. P. 517 (<http://dx.doi.org/10.1037/0003-066X.33.5.517.a>).

Feinstein A.R. Meta-analysis: Statistical alchemy for the 21st century // *Journal of Clinical Epidemiology.* 1995. Vol. 48. Issue 1. P. 71-79 ([https://doi.org/10.1016/0895-4356\(94\)00110-C](https://doi.org/10.1016/0895-4356(94)00110-C)).

Fernandez-Duque E., Valeggia C. Meta-analysis: a valuable tool in conservation research // *Conservation Biology.* 1994. Vol. 8. No 2. P. 555–561.

Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P., Barbeito I., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G. W. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // *Forest Ecology and Management.* 2017. Vol. 396. P. 160–175.

Glass G.V. Primary, Secondary and Meta-Analysis of Research // *Educational Researcher.* 1976. Vol. 5. No. 10. P. 3-8 (<http://www.jstor.org/stable/1174772>).

Goldberg D.E., Rajaniemi T., Gurevitch J., Stewart-Oaten A. Empirical approaches to quantifying interaction intensity: Competition and facilitation along productivity gradients // *Ecology.* 1999. Vol. 80 (4). P. 1118–1131.

Gurevitch J., Hedges L.V. Meta-analysis: Combining the results of independent experiments / Scheiner S.M., Gurevitch J. (eds.) // Design and Analysis of Ecological Experiments. Oxford: Oxford University Press, 2001. P. 347–369.

Henry M., Picard N., Trotta C., Manlay R.J., Valentini R., Bernoux M., Saint-André L. Estimating tree biomass of Sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations // Silva Fennica. 2011. Vol. 45 (3B). P. 477–569 (DOI:10.14214/sf.38).

Hosoda K., Iehara T. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan // Journal of Forest Research. 2010. Vol. 15. No. 5. P. 299–306 (DOI: 10.1007/s10310-010-0192-y).

Iyengar S. Much Ado About Meta-Analysis // Chance: New Directions for Statistics and Computers. 1991. Vol. 4. P. 33–40.

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. Comprehensive database of diameter-based regressions for North American tree species // USDA Forest Service. Northeastern Research Station. General Technical Report NE-319. 2004. 45 p.

Jenkins J.C., Chojnacky D.C., Heath L.S., Birdsey R.A. National-scale biomass estimators for United States tree species // Forest Science. 2003. Vol. 49. P. 12–35.

Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F., Dalponte M., van Ewijk K.Y., Forrester D.I., Heani M., Higgins S.I., Holdaway R.J., Iida Y., Lorimer C., Marshall P.M., Momo S., Moncrieff G.R., Ploton P., Poorter L., Rahman K.A., Schlund M., Sonké B., Sterck F.J., Trugman A.T., Usoltsev V.A., Vanderwel M.C., Waldner P., Wedeux B., Wirth C., Wöll H., Woods M., Xiang W., Zimmermann N., Coomes D.A. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes // Global Change Biology. 2017. Vol. 23. P. 177–190 (DOI: 10.1111/gcb.13388).

Koricheva J. Non-significant results in ecology: a burden or a blessing in disguise? // Oikos. 2003. Vol. 102. P. 397–401 (DOI:10.1034/j.1600-0579.2003.12353.x).

Kotiaho J.S., Tomkins J.L. Meta-analysis can it ever fail? // Oikos. 2002. Vol. 96. P. 551–553 (DOI:10.1034/j.1600-0706.2002.960316.x).

Kozlov M.V., Zvereva E.L. A second life for old data: Global patterns in pollution ecology revealed from published observational studies // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159. No. 5. P. 1067–1075.

Lee W.L., Bausell R.B., Berman B.M. The growth of health-related meta-analyses published from 1980 to 2000 // Evaluation & the Health Professions. 2001. Vol. 24. P. 327–335.

Liang J., Crowther T.W., Picard N., Wiser S., Zhou M., Alberti G., Schulze E.-D., McGuire A.D., Bozzato F., Pretzsch H., de-Miguel S., Paquette A., Hérault B., Scherer-Lorenzen M., Barrett C.B., Glick H.B., Hengeveld G.M., Nabuurs G.-J., Pfautsch S., Viana H., Vibrans A.C., Ammer C., Schall P., Verbyla D., Tchebakova N.M., Fischer M., Watson J.V., Chen H.Y.H., Lei X., Schelhaas M.-J., Lu H., Gianelle D., Parfenova E.I., Salas C., Lee E., Lee B., Kim H.S., Bruelheide H., Coomes D.A., Piotta D., Sunderland T., Schmid B., Gourlet-Fleury S., Sonké B., Tavani R., Zhu J., Brandl S., Vayreda J., Kitahara F., Searle E.B., Neldner V.J., Ngugi M.R., Baraloto C., Frizzera L., Balazy R., Oleksyn J., Zawila-Niedzwiecki T., Bouriaud O., Bussotti F., Finér L., Jaroszewicz B., Jucker T., Valladares F., Jagodzinski A.M., Peri P.L., Gonmadje C., Marthy W., O'Brien T., Martin E.H., Marshall A.R., Rovero F., Bitariho R., Niklaus P.A., Alvarez-Loayza P., Chamuya N., Valencia R., Mortier F., Wortel V., Engone-Obiang N.L., Ferreira L.V., Odeke D.E., Vasquez R.M., Lewis S.L., Reich P.B. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests // Science. 2016. Vol. 354. Issue 6309. P. 196–208 (DOI: 10.1126/science.aaf8957).

Liu L.B., Yang H.M., Xu Y., Guo Y.M., Ni J. Forest Biomass and Net Primary Productivity in Southwestern China: A Meta-Analysis Focusing on Environmental Driving Factors // Forests. 2016. Vol. 7 (8) 173 (DOI:10.3390/f7080173).

Markow T.A., Clarke G.M. Meta-analysis of the heritability of developmental stability: a giant step backward // Journal of Evolutionary Biology. 1997. Vol. 10. P. 31–37.

Moore J.R. Allometric equations to predict the total above-ground biomass of radiata pine trees // *Annals of Forest Science*. 2010. Vol. 67. P. 806 (DOI:10.1051/forest/2010042).

Muukkonen P. Generalized allometric volumen and biomass equations for some tree species in Europe // *European Journal of Forest Research*. 2007. Vol. 126. P. 157–166.

Muukkonen P., Mäkipää R. Biomass equations for European trees: Addendum // *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40. No. 4. P. 763–773.

Nakagawa S., Noble D.W.A., Senior A.M., Lagisz M. Meta-evaluation of meta-analysis: ten appraisal questions for biologists // *BMC Biology*. 2017. Vol. 15. No 1. 18 pp. (<https://doi.org/10.1186/s12915-017-0357-7>).

Nakagawa S., Poulin R. Meta-analytic insights into evolutionary ecology: An introduction and synthesis // *Evolutionary Ecology*. 2012. Vol. 26. P. 1085–1099.

O'Rourke K. An historical perspective on meta-analysis: dealing quantitatively with varying study results // *Journal of the Royal Society of Medicine*. 2007. Vol. 100 (12). P. 579–582.

Owen A.B. Karl Pearson's meta-analysis revisited // *The Annals of Statistics*. 2009. Vol. 37. No. 6B. P. 3867–3892 (DOI: 10.1214/09-AOS697).

Pastor J., Aber J.D., Melillo J.M. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some northeast tree species // *Forest Ecology and Management*. 1984. Vol. 7. P. 265–274 (DOI:10.1016/0378-1127(84)90003-3).

Pearce H.G., Anderson W.R., Fogarty L.G., Todoroki C.L., Anderson S.A.J. Linear mixed-effects models for estimating biomass and fuel loads in shrub lands // *Canadian Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 4. No 10. P. 2015–2026 (DOI:10.1139/X10-139).

Pearson K. Report on certain enteric fever inoculation statistics // *British Medical Journal*. 1904. Vol. 3. P. 1243–1246.

Petticrew M. Systematic reviews from astronomy to zoology: myths and misconceptions // *British Medical Journal*. 2001. Vol. 322. P. 98–101.

Poorter H., Jagodzinski A.M., Ruiz-Peinado R., Kuyah S., Luo Y., Oleksyn J., Usoltsev V.A., Buckley T.N., Reich P.B., Sack L. How does biomass allocation change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents // *New Phytologist*. 2015. Vol. 208. Issue 3. P. 736–749 (DOI: 10.1111/nph.13571).

Repola J. Biomass equations for birch in Finland // *Silva Fennica*. 2008. Vol. 42. No 4. P. 605–624.

Repola J. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // *Silva Fennica*. 2009. Vol. 43. No 4. P. 625–647.

Rosenberg M.S., Adams D.C., Gurevitch J. *MetaWin: Statistical Software for Meta-Analysis. Version 2 (Manual)*. Sinauer Associates: Sunderland, MA, 2000. 128 p.

Rustad L.E., Campbell J.L., Marion G.M., Norby R.J., Mitchell M.J., Hartley A.E., Cornelissen J.H.C., Gurevitch J. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming // *Oecologia*. 2001. Vol. 126. P. 543–562 (DOI: 10.1007/s004420000544).

Schmitt M.D.C., Grigal D.F. Generalized biomass estimation equations for *Betula papyrifera* Marsh // *Canadian Journal of Forest Research*. 1981. Vol. 11. No 4. P. 837–840.

Smith G.D., Egger M. Meta-analysis. Unresolved issues and future developments // *British Medical Journal*. 1998. Vol. 316. P. 221–225.

Smith G.D., Egger M., Phillips A.N. Meta-analysis. Beyond the grand mean? // *British Medical Journal*. 1997. Vol. 315. P. 1610–1614.

Spake Rebecca, Doncaster C.P. Use of meta-analysis in forest biodiversity research: Key challenges and considerations // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 400. P. 429–437.

Stewart G. Meta-analysis in applied ecology // *Biology Letters*. 2010. Vol. 6. No 1. P. 78–81.

Stewart G.B., Bayliss H.R., Showler D.A., Sutherland W.J., Pullin A.S. Effectiveness of engineered in-stream structure mitigation measures for increasing salmonid abundance: A systematic review // *Ecological Applications*. 2009. Vol. 19. P. 931–941 (DOI:10.1890/07-1311.1).

Sutton A.J., Higgins J.P.T. Recent developments in meta-analysis // *Statistics in Medicine*. 2008. Vol. 27. P. 625–650 (DOI:10.1002/sim.2934).

Ter-Mikaelian M.T., Korzukhin M.D. Biomass equations for sixty-five North American tree species // *Forest Ecology and Management*. 1997. Vol. 97. P. 1–24.

Tritton L.M., Hornbeck J.W. Biomass equations for major tree species of the Northeast / General Technical Report GTR-NE-69. Broomall, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1982. 46 p.

Urban D.L., Acevedo M.F., Garman S.L. Scaling fine-scale processes to large-scale patterns using models derived from models: meta-models // *Spatial modeling of forest landscape change: Approaches and applications*. D.J. Mladenoff and W.L. Baker (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999. P. 70–98.

Usoltsev V.A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. CD-version. The second edition, enlarged and re-harmonized. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2013 (<http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3059>).

Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe — a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation // *Tree Physiology*. 2004. Vol. 24. P. 121–139.

Yusuf S., Peto R., Lewis J., Collins R., Sleight P. Beta blockade during and after myocardial infarction: An overview of the randomized trials // *Progress in Cardiovascular Diseases*. 1985. Vol.17. P. 335-371.

Zianis D., Mencuccini M. Aboveground biomass relationships for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, Northern Greece, and generalized equations for *Fagus* sp. // *Annals of Forest Science*. 2003. Vol. 60. P. 439–448 (DOI:10.1051/forest:2003036).

Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe // *Silva Fennica Monographs*. 2005. Vol. 4. 63 p.

Zolkos S.G., Goetz S.J., Dubayah R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 128. P. 289–298 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017>).

Zvereva E.L., Toivonen E., Kozlov M.V. Changes in species richness of vascular plants under the impact of air pollution: A global perspective // *Global Ecology @ Biogeography*. 2008. Vol. 17. № 3. P. 305–319.

Рецензент статьи: доктор сельскохозяйственных наук, профессор, проректор по научной работе Уральского государственного лесотехнического университета С.В. Залесов.