

ХАРАКТЕРИСТИКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ОЦЕНКАХ МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

С.М. Семенов^{1,2)}, Г.Э. Инсаров^{1,2)}, К.Л. Мендес³⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Российская Федерация, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 206; *SergeySemenov1@yandex.ru*

²⁾ Институт географии РАН, Российская Федерация, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29; *insarovg@gmail.com*

³⁾ Венесуэльский институт научных исследований, Венесуэла, 21827, Каракас 1020-А, *carlos.menvall@gmail.com*

Реферат. Для корректного использования результатов научных оценок в процессе принятия решений необходимо иметь информацию об их неопределенностях. Рассмотрена эволюция подходов к оценке неопределенности утверждений (выводов и заключений) докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Изложены основные рекомендации, представленные в руководствах МГЭИК по учету неопределенностей 2000 и 2010 годов. Предложено дальнейшее развитие подходов в двух направлениях. Во-первых, в отношении анализа независимости количественных данных, используемых при оценке неопределенности результатов их обобщения. Во-вторых, в отношении объективной оценки степени достоверности качественных заключений.

Ключевые слова. Изменение климата, последствия, неопределенности, количественные оценки, качественные оценки, МГЭИК.

Введение

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), в англоязычном оригинале Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), была организована в 1987-1988 гг. совместно Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Это решение было впоследствии одобрено Генеральной Ассамблеей ООН. Задача этой группы – периодически проводить оценку научных знаний о произошедших и ожидаемых изменениях климата Земли, их последствиях для природных и социально-экономических систем, возможностях смягчения антропогенного воздействия на климат, а также методах учета антропогенных эмиссий парниковых газов. Результаты таких оценок используются при разработке национальной и международной политики в области ограничения антропогенного воздействия на климатическую систему, а также органами управления различного уровня, представителями бизнеса и

*Автор, ведущий переписку

гражданами. Группа не ведет собственных научных исследований, а лишь обобщает информацию, представленную в научной литературе. Основной принцип – предоставлять обобщающие заключения, которые востребованы в процессе принятия решений, влияющих на климат или связанных с адаптациями к его изменениям, но делать это в политически нейтральной манере, не предписывая какие-либо определенные решения.

Формулируя подобные заключения, эксперты МГЭИК используют научные публикации в качестве источников данных и информации. Каждое такое обобщение на деле есть небольшое специальное исследование, которое выполняется авторами докладов МГЭИК. Поскольку эти заключения предназначены для использования при принятии важных решений, требуется охарактеризовать степень их достоверности (*confidence*). Существенная часть этого – дать читателю/пользователю возможность отследить, на основании каких данных и информации базируется утверждение (заключение, вывод), а также как оно формулировалось и как определялась степень его достоверности. Это способствует прозрачности (*transparency*) и «отслеживаемости» (*traceability*).

Доклады МГЭИК по своей природе являются продуктом совместного труда международного коллектива экспертов. На последнем этапе работы наиболее важные утверждения (заключения, выводы), входящие в «Резюме для политиков», принимаются на основе консенсуса делегациями стран, входящих в МГЭИК. Поэтому необходимы достаточно унифицированные подходы к оценке научных знаний, формулировкам ключевых выводов и определению степени их достоверности, построению важнейших заключений докладов и определению степени их достоверности. Такие подходы представляются в специальных руководствах МГЭИК и методических публикациях ее ведущих экспертов. В отношении обращения с неопределенностями история вопроса подробно изложена в работе (Mastrandrea, Mach, 2011).

Цель настоящей статьи – кратко представить основные моменты этих подходов и определить потребности и возможности их дальнейшего совершенствования.

Проблема неопределенности: истоки

Оценки параметров земной системы, ее текущего состояния, наблюдаемых и будущих изменений всегда обладают некоторой степенью неопределенности. Источники этой неопределенности многочисленны: изменчивость измеряемых переменных в пространстве и во времени, ошибки выборки при полевых наблюдениях, пропуски в рядах наблюдений, ошибки измерительных приборов, выбор структуры моделей, выбор параметризации в моделях, ошибки в коэффициентах моделей, недостаточность фундаментальных знаний о природных процессах и др. Все это в еще большей мере присуще оценкам воздействий изменения климата на природные и социально-экономические системы, возможностей смягчения антропогенных воздействий на климат и адаптации к его изменениям. Степень неопределенности оценок отражает текущий уровень соответствующих отраслей знаний.

Уже в начале работы МГЭИК вопросу неопределенности оценок уделялось заметное внимание. Однако, существует концептуальное различие между подходами, принятыми Рабочей группы I (Climate Change 1995, 1996a) и Рабочей группы II (Climate Change 1995, 1996b).

Рабочая группа I использовала способ характеризовать неопределенность полученных количественных оценок, традиционно применяемый в физических науках. А именно, оценку сопровождала характеристика статистической изменчивости – фактический или возможный разброс, среднеквадратическое отклонение и т.д. Такой подход предполагает наличие ансамбля количественных результатов измерений или расчетов какой-то переменной (например, концентрации CO₂, температуры воздуха, уровня моря), на основании которого и оцениваются параметры статистической изменчивости.

Материал, с которым имеет дело Рабочая группа II, очень часто не позволяет использовать такой же подход по двум основным причинам. Во-первых, ансамбль результатов данных измерений или же расчетов может в научной литературе отсутствовать, а в наличии могут быть лишь косвенные исторические данные о последствиях изменения климата. Так было, например, до недавнего времени в отношении влияния потепления на состояние ледникового покрова Гренландии (Alley et al., 2009). Во-вторых, информация в специальной литературе иногда представлена не в количественной, а в качественной форме. Или же количественные данные очень разнородны, и их можно обобщить только в качественной форме из-за недостаточной разработанности модельных средств анализа. Для случая влияния изменения климата на достижение целей устойчивого развития на это указывается, например, в работе (Sanchez-Rodriguez, Ürge-Vorsatz, Barau, 2018).

Хотя в цикле Второго оценочного доклада МГЭИК (вышел в свет в 1996 г.) в «Резюме для политиков» основные заключения еще не характеризовались степенью их достоверности, в основном тексте и в резюме глав такие характеристики уже появляются. Более того, в предисловии ко вкладу Рабочей группы II (Climate Change 1995, 1996b) есть специальный раздел «Уровни достоверности» (Levels of Confidence). Ведущими авторами глав доклада использовались три градации для характеристики степени достоверности утверждений (заключений, выводов): высокая, средняя и низкая. При этом для ее определения рекомендованы следующие критерии¹⁾:

-
- 1) • *H i g h Confidence* – This category denotes wide agreement, based on multiple findings through multiple lines of investigation. In other words, there was a high degree of consensus among the authors based on the existence of substantial evidence in support of the conclusion.
- *M e d i u m Confidence* – This category indicates that there is a consensus, but not a strong one, in support of the conclusion. This ranking could be applied to a situation in which an hypothesis or conclusion is supported by a fair amount of information, but not a sufficient amount to convince all participating authors, or where other less plausible hypotheses cannot yet be completely ruled out.
- *L o w Confidence* – This category is reserved for cases when lead authors were highly uncertain about a particular conclusion. This uncertainty could be a reflection of a lack of consensus or the existence of serious competing hypotheses, each with adherents and evidence to support their positions. Alternatively, this ranking could result from the existence of extremely limited information to support an initial plausible idea or hypothesis.
-

«• *Высокая достоверность* означает широкое согласие, основанное на многочисленных выводах, полученных по многим направлениям исследований. Другими словами, это означает высокую степень согласия среди авторов, основанную на имеющихся существенных свидетельствах в поддержку заключения;

• *Средняя достоверность* указывает на то, что согласие относительно данного заключения имеется, но не сильно выраженное. Это может быть применимо к ситуациям, когда гипотеза или же заключение поддерживается значительным объемом информации, но все же недостаточным для того, чтобы убедить всех участвующих авторов, или же иная менее правдоподобная гипотеза все же не может быть полностью отвергнута;

• *Низкая достоверность* означает, что ведущие авторы имеют крайне неопределенное мнение относительно данного заключения. Такая неопределенность может быть следствием слабо выраженного согласия авторов или же наличия серьезных конкурирующих гипотез, имеющих приверженцев и доказательства. Эта категория может также возникать в случаях, когда первоначально правдоподобная гипотеза или идея поддерживается слишком малым объемом информации.»

Это была первая попытка формализации процесса определения степени достоверности утверждения. При этом авторы этого подхода во «Втором оценочном докладе МГЭИК» четко заявили, что такая система уровней, а также процедура их определения (назначения, assignment) является инструментом донести до лиц, принимающих решения, информацию о достоверности основных утверждений (заключений, выводов) доклада, но этот инструмент несовершенен. Вся процедура в значительной мере субъективна, доля экспертных суждений в оценке степени неопределенности очень велика, и другая группа экспертов может, исходя из того же объема исходной информации, прийти к другой оценке степени неопределенности.

В течение последующих лет МГЭИК неоднократно возвращалась к этой проблеме, пытаясь уменьшить степень субъективности и долю экспертных суждений в процедуре оценки неопределенности, сблизить подходы, применяемые Рабочими группами I и II.

Первый руководящий документ МГЭИК об оценке неопределенностей

В цикле Третьего оценочного доклада МГЭИК (ОДЗ, вышел в 2001 г.) был подготовлен ряд руководящих документов для ведущих авторов доклада. Среди них – «Неопределенности в ОДЗ: рекомендации ведущим авторам по более согласованной оценке и представлению» (Moss, Schneider, 2000), содержание которого кратко изложено в этом разделе. В этой публикации четко сформулировано, что задача авторов оценочных докладов – не только представлять обобщенные заключения по тематике докладов, но и сопровождать их оценкой степени доверия, достоверности (по возможности в количественной форме), которая определяется исходной информацией. При этом

указывается, что читатели, пользователи докладов, всегда имеют склонность определять степень доверия к результатам оценок – фактических или прогнозных. В связи с этим целесообразно, чтобы это делали сами эксперты, обладающие специальными знаниями, даже если такие оценки даются на качественном уровне, а не количественно.

В качестве теоретической базы такого подхода Р. Мосс и С. Шнайдер предложили использовать байесовскую (или же субъективную) концепцию вероятности. В соответствие с ней вероятность события понимается как степень уверенности (исследователей) в наступлении события²⁾. В этом контексте при оценке распределения вероятностей для системы альтернативных событий вначале назначаются *априорные вероятности*, исходя из имеющихся свидетельств. Полученные в ходе оценки дополнительные свидетельства позволяют пересмотреть ранее назначенные вероятности и назначить новые, уточненные, *апостериорные вероятности*.

Как декларировано в цитируемой работе, наука должна стремиться к тому, чтобы теоретические представления обосновывались, проверялись эмпирическими данными. Однако прикладная наука, «наука для принятия решений» часто не может ожидать завершения детальных научных исследований, поскольку принимать решения надо в определенных временных рамках и в условиях неполноты информации. Для обоснования таких решений необходимы научные оценки и заключения, степень достоверности которых охарактеризована, оценена.

Разумеется, в столь объемном документе, как оценочный доклад (типичный доклад содержит 500-1000 страниц) невозможно каждую цифру и каждое утверждение сопроводить оценкой неопределенности. Это практикуется в отношении основных утверждений (заключений, выводов) в резюме глав доклада, а также в «Резюме для политиков» и «Техническом резюме». При этом авторам рекомендуется избегать нечетких или же слишком широких заключений, например, «при потеплении возможно изменение биоразнообразия». Это несомненно, но тривиально, не несет новой информации, пока не будут указаны уровень потепления и соответствующий уровень изменения биоразнообразия.

В руководящем документе (Moss, Schneider, 2000) приведены последовательные шаги, рекомендуемые для процесса оценки уровня достоверности какого-либо утверждения. Приведем их кратко: – установить основные факторы и неопределенности, влияющие на утверждение; – документировать диапазоны, их характеризующие, в соответствии с данными научных публикаций; – исходя из природы неопределенностей и состояния знаний, определить тип оценки степени достоверности – количественная или качественная; – количественно или качественно охарактеризовать вероятностное распределение значений

²⁾ Такое понимание вероятности отличается от традиционного как частоты данного события при многократном повторении однотипного эксперимента («розыгрыша»). Частотный подход иногда не осуществим, например, для уникальных или очень редких событий, например, для коллапса термохалинной циркуляции.

параметра, переменной или результата; – подготовить описание получения вероятностного распределения, позволяющее читателю отследить процесс. В работе (Moss, Schneider, 2000) введены категории основных источников неопределенности. При этом использовалась следующая типология: проблемы с данными, проблемы с моделями, иные источники неопределенности. Подробности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Источники неопределенности (Moss, Schneider, 2000)

Источники неопределенности		
Проблемы с данными	Проблемы с моделями	Другие источники неопределенности
<p><i>Утраченные компоненты или ошибки в данных;</i></p> <p><i>‘Шум’ в данных, связанный со смещенными или неполными результатами наблюдений;</i></p> <p><i>Случайные ошибки отбора проб или смещение (непредставительность) отображенных образцов.</i></p>	<p><i>Известны процессы, но не известны функциональные зависимости в моделях; ошибки в структуре моделей;</i></p> <p><i>Известна структура модели, но не известны или ошибочны значения некоторых важных параметров модели;</i></p> <p><i>Известны исторические данные и структура модели, но доверие к оценкам параметров или структуре модели изменяется со временем;</i></p> <p><i>Неопределенность в отношении предсказуемости (например, стохастическое или хаотическое поведение) системного эффекта;</i></p> <p><i>Неопределенности, привнесенные техникой аппроксимации, используемой для решения системы уравнений, которая описывает модель.</i></p>	<p><i>Неясно определенные концепции и термины;</i></p> <p><i>Неподходящие пространственные/временные единицы;</i></p> <p><i>Непригодность или недостаточная надежность исходных предположений;</i></p> <p><i>Неопределенность в предсказаниях, связанная с поведением людей (например, с будущим типом потребления или с технологическими изменениями), что отличается от неопределенности, обусловленной естественными причинами (например, чувствительностью климата, хаосом).</i></p>

Поскольку МГЭИК в целом выполняет полный цикл оценок, связанных с антропогенным воздействием на климатическую систему Земли, то важно учитывать, что, по мере продвижения по цепочке от антропогенных эмиссий парниковых газов до их воздействий на природные и социально-экономические системы, неопределенность будет накапливаться и нарастать. Р. Мосс и С. Шнайдер называли это «каскадом неопределенности» или «взрывом неопределенности» – см. рис. 1.

Для характеристики степени достоверности, уверенности в утверждении (заклучении, выводе), исследователи часто используют самые разные «бытовые» выражения: «почти определенно», «вероятно», «похоже», «возможно», «непохоже», «невероятно», «сомнительно» и т.п. Конечно, различные экс-

перты вкладывают в эти термины разный смысл даже в одинаковых оценочных задачах. Для унификации понимания таких суждений в руководящем документе Р. Моссом и С. Шнайдером (Moss, Schneider, 2000) предложена универсальная дискретная количественная шкала: для оценки степени достоверности: от 0.95 до 1.00 – очень высокая достоверность; от 0.67 до 0.95 – высокая достоверность; от 0.33 до 0.67 – средняя достоверность; от 0.05 до 0.33 – низкая достоверность; от 0.00 до 0.05 – очень низкая достоверность.

Для оценки суммы знаний в отношении какого-либо утверждения (заключения, вывода) была предложена система качественных терминов, использующая две исходных характеристики – свидетельства (evidence) и согласие (agreement). Она представлена в табл. 2. Цель такой системы – кратко характеризовать в качественных терминах сумму знаний, на основе которой определяется степень достоверности заключения.

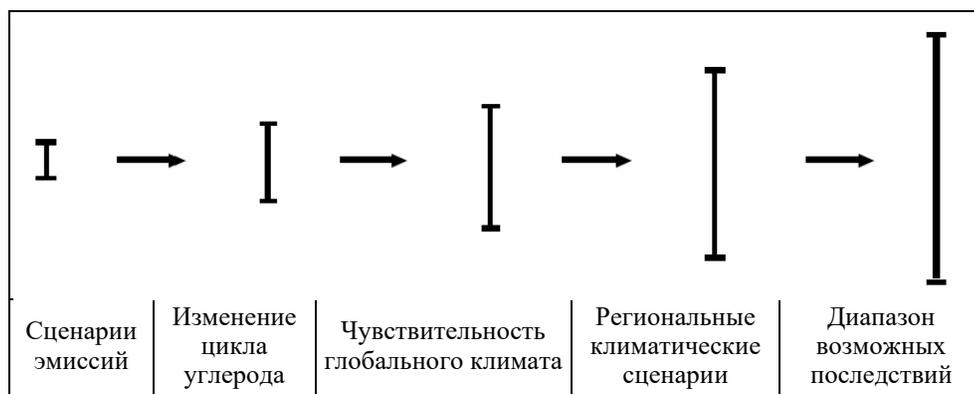


Рисунок 1. Рост диапазона неопределенности в цепи оценок от антропогенных эмиссий парниковых газов до возможных последствий физической, экономической, социальной и политической природы, включая ответные стратегии (Moss, Schneider, 2000)

Руководящий документ (Moss, Schneider, 2000) использовался при подготовке Третьего и Четвертого оценочных докладов МГЭИК, которые вышли соответственно в 2001 и 2007 годах. Их использование во вкладах Рабочих групп I, II и III МГЭИК было неравномерным и неполным (Mach et al. 2017). Однако, используя предложенный подход даже эпизодически, со значительной субъективной составляющей, эксперты МГЭИК овладевали культурой вероятностных характеристик достоверности утверждений (заключений, выводов).

Таблица 2. Характеристика суммы знаний в качественных терминах (Moss, Schneider, 2000)

Уровень согласия	<i>Высокий</i>	Обосновано, но недостаточно	Хорошо обосновано
	<i>Низкий</i>	Предположительно	Есть конкурирующие объяснения ³⁾
		<i>Малое</i>	<i>Большое</i>
		Число свидетельств	

³⁾ Например, при характеристике какого-либо явления примерно половина свидетельств в пользу его антропогенной природы, а остальные – в пользу естественной.

Второй руководящий документ МГЭИК об оценке неопределенностей

В цикле Пятого оценочного доклада МГЭИК методологическая работа по оценке неопределенностей получила дальнейшее развитие. 6 – 7 июля 2010 г. в Джаспер-Ридж, Калифорния, США было проведено совещание экспертов МГЭИК, результатом которого стала краткая обновленная версия руководящего документа об учете неопределенностей (Mastrandrea et al., 2010). Годом позже вышла полная журнальная публикация (Mastrandrea et al., 2011). Эта версия унаследовала философию предыдущей (Moss, Schneider, 2000), но была написана более простым научным языком и больше сфокусирована на собственно процедуре определения степени достоверности заключений. В этом разделе приводятся некоторые основные рекомендации этого руководства, подготовленного для авторов Пятого оценочного доклада МГЭИК.

Неопределенность (или определенность) оценивается для какого-либо утверждения (заклучения, вывода) доклада. Ее возможно оценивать в качественных или же количественных терминах, в зависимости от базовой информации, которая при этом обобщается. Три метрики были предложены для этой цели: «свидетельства» (evidence) и «согласие» (agreement), которые впоследствии объединялись в «достоверность» (confidence), и «правдоподобие» (likelihood) (Mastrandrea et al., 2010; Mastrandrea, Mach 2011).

Если возможен обычный статистический анализ данных наблюдений, экспериментов, результатов моделирования или экспертных суждений, то используются количественные вероятностные термины (правдоподобие, вероятность), что предпочтительно.

В ином случае оценка делается в качественных терминах. А именно, достоверность (степень уверенности, confidence) утверждения (заклучения, вывода) понимается как его обоснованность, определяемая типом, числом, качеством и однородностью свидетельств, а также степенью их согласия. «Свидетельства» – вся совокупность фактов, данных, информации или знаний, взятых из документов (статей, книг и т.д.) или полученных в результате экспертных суждений. «Свидетельства» (pieces of evidence) – общий термин для них. «Согласие» основано на согласованности свидетельств, представляющих множество конкурирующих (или нет) объяснений или же моделей явления. На рис. 2 приведена схема общей процедуры (Mastrandrea et al., 2011).

Для того, чтобы охарактеризовать совокупность свидетельств, в руководящем документе предлагаются три градации: «ограниченная» (limited), «средняя» (medium) и «надежная» (robust). Для того, чтобы охарактеризовать их «согласие», также рекомендованы три градации: «низкое» (low), «среднее» (medium) и «высокое» (high). Эти обобщенные характеристики утверждения делаются авторами докладов МГЭИК на основе их экспертных суждений.



Рисунок 2. Общая процедура оценки неопределенности (определенности) какого-либо утверждения (заклучения, вывода), исходя из совокупности имеющихся свидетельств (Mastrandrea et al., 2011)

«Достоверность»⁴⁾ (confidence) синтезирует «свидетельства» и «согласие». Соотношение «достоверности» со «свидетельствами» и «согласием» иллюстрировано на рис. 3. «Достоверность» рекомендуется оценивать с помощью пяти градаций: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая» и «очень высокая».

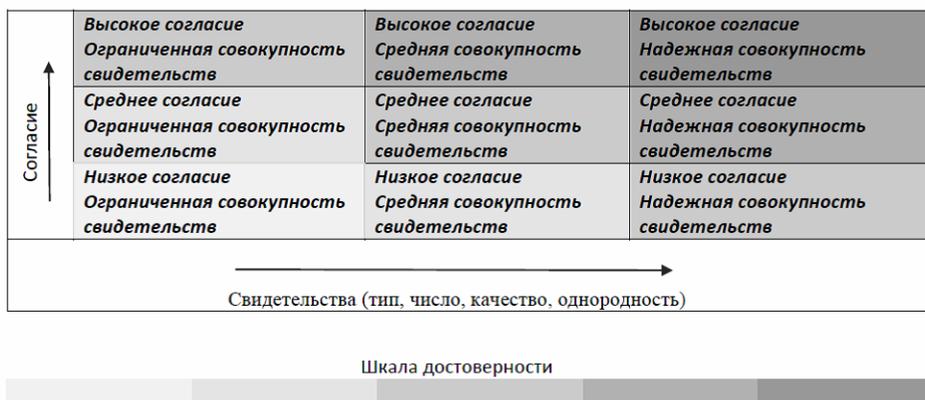


Рисунок 3. Зависимость достоверности от свидетельств и их согласия: увеличение густоты серого цвета соответствует увеличению достоверности; внизу приведена результирующая шкала достоверности (Mastrandrea et al., 2010)

⁴⁾ В этом контексте значение термина «достоверность» отличается от традиционного, статистического. Этот качественный термин более соответствует понятию «уверенность».

В некоторых случаях, когда невозможно отнести «достоверность» к одной из пяти градаций, рекомендуется представлять неопределенность утверждений, используя лишь «свидетельства» и «согласие».

Использование в этой процедуре количественных терминов – правдоподобия, вероятности – не требует комментариев, поскольку происходит в рамках обычной статистики. Однако в отношении использования качественных терминов в руководстве приводятся специальные пояснения.

Во-первых, надо следить за тем, чтобы к рассмотрению принимались результаты исследований (свидетельства), опубликованные в специализированных научных изданиях, что говорит в пользу их научного качества.

Во-вторых, независимость рассматриваемых свидетельств должна быть исследована. Рассмотрим пример, когда оцениваются результаты лабораторных экспериментов по влиянию температуры на рост растений, представленные в двух публикациях, в одной – с одним видом растений, а в другой – с десятью. Не следует автоматически, без соответствующего анализа, объединять эти свидетельства в совокупность из 11. Ведь если используемые для экспериментов лабораторные установки были различны, то во втором случае результаты могут быть зависимыми, иметь некоторое общее смещение. В таком случае, строго говоря, есть только два независимых свидетельства, а не 11.

В-третьих, существенно, чтобы рассматриваемые свидетельства были достаточно однородны в отношении своего типа, т.е. рассматривался ряд результатов полевых наблюдений, или лабораторных экспериментов, или модельных расчетов, или экспертных суждений. Объединять разнотипные свидетельства в одной совокупности можно лишь с большой осмотрительностью. Тип свидетельств должен быть четко указан.

Авторам докладов МГЭИК рекомендуется так представлять материал, чтобы читатель мог следить за процессом оценки совокупности свидетельств и их согласия. Это обеспечивает «отслеживаемую оценку» (traceable account).

В том случае, когда возможна количественная характеристика неопределенности (определенности), руководство рекомендует использовать обычные статистические характеристики – вероятность (probability) или правдоподобие (likelihood). При этом они употребляются практически как синонимы.

Это касается тех случаев, когда появление единичного события описывается статистическим распределением. Например, когда речь идет о принадлежности климатического параметра, наблюдаемого тренда или ожидаемого изменения некоторому диапазону значений. В табл. 3 приведена соответствующая дискретная шкала для вероятности (правдоподобия).

Присвоение конкретному утверждению одной из категорий, приведенных в табл. 3, осуществляется путем обычного статистического (частотного) анализа ансамбля количественных данных. При этом источниками таких данных могут быть и наблюдения, и расчеты, и экспертные суждения.

В руководствах МГЭИК 2010 года по обращению с неопределенностями (Mastrandrea et al., 2010) и последующих публикациях (Mastrandrea, Mach, 2011; Mastrandrea et al., 2011; Mach et al., 2017) были разъяснены соотношения между различными метриками, используемыми для оценок неопределенно-

сти, и их различия, что способствовало более согласованному их применению во всех Рабочих группах МГЭИК, чем это было в предыдущих оценочных циклах. Руководство (Mastrandrea et al., 2010) было весьма востребовано авторами Пятого оценочного доклада МГЭИК и иных докладов МГЭИК, подготовленных в этом цикле. Оно используется и в цикле Шестого оценочного доклада. Оно способствовало более четкой характеристике неопределенности заключений и выводов, которые представлялись для использования в международном переговорном процессе по климату под эгидой Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а также международной научной общественности и профильным международным организациям. Например, этот подход был также принят Межправительственной научно-политической платформой по биоразнообразию и экосистемным услугам в ее собственном руководстве по оценкам (IPRES, 2018).

Таблица 3. Вероятностная шкала для количественной оценки неопределенности (определенности) утверждения⁵⁾ (Mastrandrea et al., 2010)

Категория	Вероятность события, %
Практически определено	99 - 100
Весьма вероятно	90 - 100
Вероятно	66 - 100
Столь же вероятно, сколь нет	33 - 66
Маловероятно	0 - 33
Весьма маловероятно	0 - 10
Исключительно маловероятно	0 - 1

Однако потребность в дальнейшей отработке более сравнимых подходов к обращению с неопределенностями в различных Рабочих группах МГЭИК все еще существует. Это, в том числе, относится к объективности качественной характеристики неопределенностей и к независимости данных, подлежащих оценке. Последнее особенно важно для сложных систем (Gerlach, Altmann 2019), таких, как земная система.

Дальнейшее развитие

В 2016 г. начался цикл Шестого оценочного доклада, который выйдет в 2021-2022 гг. В этом цикле также готовятся три специальных доклада и один методологический доклад:

– Специальный доклад МГЭИК о воздействиях глобального потепления на 1.5°C по отношению к доиндустриальным уровням и соответствующим траекториям эмиссий парниковых газов в контексте усиления глобального ответа

⁵⁾ Из верхней части таблицы рекомендуется выбирать категорию с наибольшей возможной нижней границей. Например, если вероятность (правдоподобие) события составляет 95%, следует выбрать категорию «весьма вероятно», а не «вероятно».

на угрозу изменения климата, устойчивого развития и усилий по искоренению бедности (вышел в конце 2018 г.);

– Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении землями, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах (выход намечен на 2019 г.);

– Специальный доклад МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата (выход намечен на 2019 г.);

– Методологический доклад «Усовершенствование 2019 г. Руководства МГЭИК 2006 г. по национальным кадастрам парниковых газов» (доклад подготовлен и принят МГЭИК; выход намечен на 2019 г.).

Руководство (Mastrandrea et al., 2010) используется и сейчас при подготовке Шестого оценочного доклада МГЭИК и остальных докладов этого цикла для характеристики неопределенностей. Конечно, доклады, выходящие в 2019 г., будут использовать это руководство именно в исходном виде, поскольку в связи с намеченным графиком их подготовки и выхода в свет, их авторы не могут ожидать каких-либо пересмотренных вариантов руководства. Однако до выхода основного, Шестого оценочного доклада есть еще достаточно времени для усовершенствований процедуры оценки неопределенностей, имея в виду указанные выше направления. Хотя в действующем руководящем документе МГЭИК (Mastrandrea et al., 2010) подчеркивается необходимость исследовать независимость свидетельств, никаких указаний о том, как это делать, там не дано. Также указывается на важность таких характеристик, как тип, количество, качество и однородность свидетельств. Но никаких указаний о том, как оценивать и интегрировать эти характеристики там не представлено. В частности, что означает «достаточное число доказательств» остается неясным. Это оставляет значительное место для субъективности в процессе оценки. Ниже в этом разделе мы коснемся двух проблем, требующих разрешения: независимости свидетельств и объективности определения достоверности в аспекте необходимого числа свидетельств.

Независимость свидетельств

Исходные единицы информации, используемые для построения обобщенной оценки, не всегда независимы. Например, при оценке будущей средней глобальной температуры в приповерхностном слое, обычно используются выдачи нескольких моделей (M – их общее число). С помощью m -й модели расчет выполняется несколько раз (n_m) с учетом случайных процессов, заложенных в модели. Таким образом, имеется $N = (n_1 + n_2 + \dots + n_M)$ результатов расчета. Можно ли их всегда считать независимыми свидетельствами?

В общей ситуации ответ на этот вопрос отрицательный. Ведь в каждой модели есть какие-то свои параметры (например, чувствительность климата). Их значения влияют на результаты расчета. Одна модель несколько завышает все результаты расчета (скажем, какой-либо переменной состояния земной системы на конец XXI века), другая – занижает. Строго говоря, действительно независимых свидетельств в этом примере M , а не N . Корректное обобщение

результатов таких расчетов требует предварительного проведения дисперсионного анализа, в том числе выявления внутримодельной и межмодельной частей изменчивости – см. рис. 4.

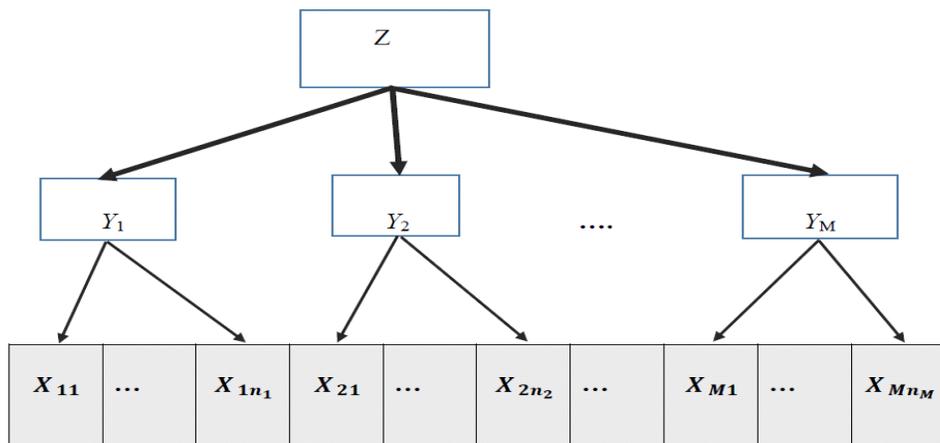


Рисунок 4. Иллюстрация процесса генерации результатов модельных расчетов, подлежащих обобщению

На этом рисунке Z – предмет оценки путем обобщения результатов расчетов $\{X_{ij}\}$. Результаты расчета имеют следующее происхождение:

$$X_{ij} = Z + \xi_i + \eta_{ij}, \quad i=1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, n_i.$$

Здесь ξ_i и η_{ij} – реализации центрированных случайных величин ξ и η с дисперсиями D и V соответственно; $Y_i = Z + \xi_i$, $i = 1, \dots, M$.

Оценивать значения межмодельной дисперсии D и внутримодельной дисперсии V можно разными способами. Например, в предположении о нормальности распределения случайных величин ξ и η , оценки могут быть получены методом максимального правдоподобия (т.е. исходя из максимальности функции правдоподобия – вероятности получения именно такой совокупности результатов расчетов $\{X_{ij}\}$).

Зная дисперсии D и V , можно корректно оценить значение Z и дать характеристику неопределенности оценки следующим образом. Оценки внутримодельных математических ожиданий⁶⁾ Y_i , $i = 1, \dots, M$, получаются с помощью простого осреднения:

$$\hat{Y}_i = \left(\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \right) / n_i.$$

⁶⁾ Внутримодельное математическое ожидание есть условное математическое ожидание, т.е. в предположении, что параметры моделируемых процессов в точности таковы, как в данной модели.

Они являются приближениями Z , но, вообще говоря, разноточными. Дисперсии отклонений этих оценок от Z соответственно равны $V_i = D + V/n_i$, $i = 1, \dots, M$. Далее, эффективную оценку Z можно получить, суммируя частные оценки с весами:

$$\hat{Z} = \left(\sum_{i=1}^M \hat{Y}_i / V_i \right) / \left(\sum_{i=1}^M 1 / V_i \right).$$

Среднеквадратическое отклонение \hat{Z} от Z есть $\sigma = \left(\sum_{i=1}^M 1 / V_i \right)^{-0.5}$.

При представлении результатов оценок Рабочая группа I МГЭИК иногда по отдельности приводит данные о внутримодельной и межмодельной изменчивости результатов расчетов, что позволяет читателю более четко понимать степень неопределенности.

Это менее выражено в работе остальных коллективов МГЭИК, хотя и не менее важно для них. Например, Рабочая группа II часто оценивает изменение прироста растений при увеличении уровня содержания CO_2 в атмосфере. Даже если данные достаточно однородны (consistency, однородность соблюдена, например, это все – результаты лабораторных экспериментов), результаты, опубликованные в разных статьях, могут быть получены с помощью различных методик и оборудования. В этом случае, также как в рассмотренном выше, их нельзя автоматически, без специального анализа, считать независимыми. В действующем руководстве МГЭИК (Mastrandrea et al., 2010) говорится о том, что необходимо следить за независимостью свидетельств, но каких-либо указаний на то, как это делать, не приведено.

Степень достоверности качественных утверждений

Как уже отмечалось выше, в соответствие с действующим руководством (Mastrandrea et al., 2010), при обобщении совокупности свидетельств в отношении некоторого утверждения (заключения, вывода), выраженных в качественной форме, авторские коллективы МГЭИК должны сами выносить суждение о его достоверности. При этом следует учитывать число свидетельств (а также их тип, качество и однородность) и их согласие (между собой). При этом указывается (см. рис. 3), что большее число свидетельств и большее их согласие обеспечивают большую достоверность. Однако никаких указаний о том, как это делать, не приведено. Это оставлено на усмотрение авторских коллективов, на их коллективное экспертное суждение.

Такой подход часто порождает вопросы: – какое число свидетельств необходимо рассмотреть коллективу авторов; – какой минимальный процент должен быть в пользу заключения для вынесения суждения о его достоверности; – зависят ли ответы на эти вопросы от «важности»/типа объекта, на который воздействует изменение климата, или они универсальны? Наличие рекомендаций по этим вопросам могло бы снизить степень субъективности таких оценок неопределенности. Ниже мы предлагаем один из возможных подходов к этому.

Рассмотрим следующую (несколько идеализированную) ситуацию. Сформулировано утверждение (заключение, вывод), в отношении которого есть N свидетельств, для простоты – публикаций. Авторы публикаций проводили свои исследования одинаково квалифицированно и совершенно независимо друг от друга. Группа экспертов, которая производит оценку всей совокупности свидетельств, считает, что результаты k публикаций из их общего числа N поддерживают рассматриваемое утверждение, остальные – нет.

В этом процессе оценивания действуют случайные факторы. Даже если утверждение совершенно верное, конкретные исследования, опирающиеся на современный уровень знаний, экспериментальное оборудование, модельные средства и т.д. могут его и не подтвердить. При анализе свидетельства группа экспертов может по-разному его трактовать. Поэтому будем считать, что результат оценки свидетельства описывается вероятностно биномиальным распределением: с вероятностью p считается, что свидетельство поддерживает рассматриваемое утверждение, а с вероятностью $(1 - p)$, что не поддерживает.

Если бы в отношении данного утверждения было в наличии очень много (так сказать, бесконечно много) свидетельств, то значение p можно было бы установить точно. Это – доля свидетельств, которые группа экспертов квалифицировала как поддерживающие утверждение. Далее следовало бы установить пороговое значение p_0 для принятия утверждения: если p превышает порог, то утверждение принимается. Например, $p_0 = 1/2$ («простое большинство») или $p_0 = 2/3$ («квалифицированное большинство»).

В действительности число свидетельств не бывает очень большим, и надо принимать решение, исходя из пары чисел (N, k) . Для этого можно использовать процедуру оценки параметра p биномиального распределения при заданной доверительной вероятности ε . Эта процедура приведена во многих учебниках и справочниках по статистике, например, в (Мюллер и др., 1982) для случая независимых реализаций бинарной случайной величины, когда при каждой реализации с вероятностью p выпадает ИСТИНА и с вероятностью $(1 - p)$ ЛОЖЬ. Для оценки нижней доверительной границы параметра p можно использовать вероятность $S(k, N, p)$ того, что из N независимых реализаций в k или большем числе случаев выпала ИСТИНА:

$$S(k, N, p) = \sum_{i=k}^N C_N^i p^i (1-p)^{(N-i)}.$$

Здесь $C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$. Для данных N, k и ε , $0 < k \leq N$, можно решить уравнение:

$$S(k, N, p) = \varepsilon.$$

Решение p_{\min} – нижняя доверительная граница для p , соответствующая доверительной вероятности ε : гипотеза $\{p < p_{\min}\}$ отвергается с вероятностью $(1 - \varepsilon)$.

Поскольку большим значениям k соответствуют большие значения p_{\min} , можно решать обратную задачу: для заданного порогового значения $p_0 < 1$

попытаться найти наименьшее значение k_0 , при котором $p_{\min} \geq p_0$. Для тех случаев, когда это возможно, в табл. 4 приведены результаты расчета для $p_0 = 0.5$ и $\varepsilon = 0.33, 0.10, 0.01$, что соответствует категориям, соответственно, «вероятно», «весьма вероятно» и «практически определено» – см. табл. 3.

Таблица 4. Минимальное число поддерживающих утверждение свидетельств (k_0) из общего их числа (N), которое позволяет считать, что $p > 0.5$ при заданной доверительной вероятности ε

N	k_0		
	$\varepsilon = 0.33$	$\varepsilon = 0.10$	$\varepsilon = 0.01$
2	2	-	-
3	3	-	-
4	3	4	-
5	4	5	-
6	5	6	-
7	5	6	7
8	6	7	8
9	6	7	9
10	7	8	10
11	7	9	10
12	8	9	11
13	8	10	12
14	9	10	12
15	9	11	13
16	10	12	14
17	10	12	14
18	11	13	15
19	11	13	15
20	12	14	16
21	12	14	17
22	13	15	17
23	13	16	18
24	14	16	19
25	15	17	19
26	15	17	20
27	16	18	20
28	16	18	21
29	17	19	22
30	17	20	22

Как видно из табл. 4, малое число свидетельств не позволяет сделать заключение для рассматриваемых значений доверительной вероятности. Одно свидетельство всегда недостаточно, а для $\varepsilon = 0.10$ и 0.01 необходимы как

минимум соответственно 4 и 7 свидетельств. Конечно, если увеличивать пороговое значение p_0 , например, с 1/2 («простое большинство») до 2/3 («квалифицированное большинство»), то требования к минимальному числу свидетельств усилятся.

Изложенный подход позволяет делать более объективные оценки достоверности заключений, исходя из общего числа имеющихся свидетельств и числа свидетельств, поддерживающих заключение. Предложенная процедура универсальна и никак не связана с природой объектов и воздействий, в отношении которых делается заключение. Однако независимость свидетельств, их однородность и качество остаются на усмотрение группы экспертов.

Заключение

Уже в цикле Второго оценочного доклада МГЭИК предпринимала усилия по характеристике неопределенности своих основных заключений и выводов, что весьма востребовано со стороны лиц, принимающих решения – пользователей докладов МГЭИК. Кроме случая оценки значений параметров на основе совокупности количественных данных, когда применимы обычные статистические методы, оценки неопределенности выполнялись и выполняются в качественных терминах. Роль экспертных заключений и влияние субъективных факторов значительны. В руководствах МГЭИК 2000 и 2010 годов, в сопутствующих публикациях ведущих ученых МГЭИК, процедура оценки неопределенности постепенно обосновывалась и приобретала все большую четкость. В руководстве 2010 г. она изложена в виде последовательности шагов, которые надо выполнить экспертам. При этом указано на необходимость анализировать свидетельства, учитывая их независимость, качество, однородность, общее число и согласие. Однако и эта современная рекомендованная процедура, если говорить о работе Рабочих групп II и III, во многом остается субъективной и полагающейся на экспертные суждения группы авторов, оценивающих неопределенность утверждений (заключений и выводов). Есть возможности дальнейшего совершенствования этой процедуры в направлении большей объективности и алгоритмичности. В данной работе предложено такое развитие в двух направлениях: анализ независимости количественных данных, используемых при оценке неопределенности результатов их обобщений, и объективная оценка достоверности качественных утверждений.

Благодарности

Разные разделы данной работы выполнены при поддержке следующих научных программ и проектов:

- *Выполнение фундаментальных научных исследований по теме "Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли" (№ 0148-2018-0006) Программы Фундаментальных Научных Исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг.,*
-

раздел 9 "Науки о Земле", подраздел 135 "Физические и химические процессы в атмосфере, включая ионосферу и магнитосферу Земли, криосферу и поверхность Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов".

- *Исследование совместных изменений климатических норм и показателей изменчивости температуры в приповерхностном слое и их влияния на погодные экстремумы, воздействия и риски для экосистем и здоровья населения на территории России и соседних стран. Программа Президиума РАН № 51 "Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования".*
- *Тема 1.3.3.2. «Исследовать влияние изменения климата на потоки CO₂ через лесные и тундровые экосистемы на территории России» Целевой научно-технической программы (ЦНТП) «Научно-исследовательские, технологические и другие работы для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» на 2017-2019 годы, утвержденной приказом Росгидромета от 28.12.2016 № 615.*

Список литературы

Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. 1982. Таблицы по математической статистике. – Москва, Финансы и статистика, 271 с.

Alley R.B., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Clarke G.K.C., Cuffey K.M., Fitzpatrick J.J., Funder S., Marshall S.J., Miller G.H., Mitrovica J.X., Muhs D.R., Otto-Bliesner B., Polyak L., White J.W.C. 2009. History of the Greenland Ice Sheet: Paleoclimatic insights. – Quat. Sci. Rev., vol. 29(15-16), pp. 1728-1756.

Climate Change 1995. 1996a. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /Editors J.J. Houghton, L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. – Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge. 572 p. ISBN 0 521 564336 Hardback; 0 521 564360 Paperback.

Climate Change 1995. 1996b. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /Editors: R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss. – Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge, 879 p. ISBN 0-521-56431-X Hardback. ISBN 0-521-56437-9 Paperback.

Gerlach M., Altmann E.G. 2019. Testing Statistical Laws in Complex Systems. – Physical Review Letters, vol. 122, pp. 168-301.

IPBES, 2018. IPBES Guide on the production of assessments. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, 44 p. – Available at <https://www.ipbes.net/guide-production-assessments>.

Mach K.J., Mastrandrea M.D., Freeman P.T., Field C.B. 2017. Unleashing expert judgment in assessment. – *Global Environmental Change*, vol. 44, pp. 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.02.005>

Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. 2010. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – Available at <http://www.ipcc.ch>.

Mastrandrea, M. D., Mach K. J. 2011. Treatment of uncertainties in IPCC Assessment Reports: Past approaches and considerations for the Fifth Assessment Report. – *Climatic Change*, vol. 108, pp.659-673.

Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Edenhofer O., Stocker T.F., Field C.B., Ebi K.L., Matschoss P.R. 2011. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. – *Climatic Change*, vol. 108, pp. 675-691. DOI 10.1007/s10584-011-0178-6.

Moss R.H., Schneider S.H. 2000. Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations To Lead Authors For More Consistent Assessment and Reporting. – In: *Guidance Papers on the Cross Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC*. Editors: R. Pachauri, T. Taniguchi and K. Tanaka. Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 33-51. ISBN 4-9980908-0-1

Sanchez-Rodriguez R., Ürge-Vorsatz D., Barau A.S. 2018. Sustainable Development Goals and climate change adaptation in cities. – *Nature Climate Change*, February 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0098-9

Статья поступила в редакцию: 03.04.2019 г.

После переработки: 20.05.2019 г.

CHARACTERIZATION OF UNCERTAINTIES IN ASSESSMENTS OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

S.M. Semenov^{1,2)*}, *G.E. Insarov*^{1,2)}, *C.L. Méndez*³⁾

¹⁾ Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation; **SergeySemenov1@yandex.ru*

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation; *insarovg@gmail.com*

³⁾ Venezuelan Institute for Scientific Research,
1020-A, Caracas, 21827, Venezuela; *carlos.menvall@gmail.com*

Abstract. For the correct use of the results of scientific assessments in the decision-making process, it is necessary to have information about their uncertainties. The evolution of approaches to assessing the uncertainty of statements (findings, conclusions) of reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is considered. The main recommendations of the IPCC guidance notes of 2000 and 2010 on characterizing the uncertainties are presented. Further development of the approaches in two directions is proposed. First, in relation to the analysis of independence of quantitative data used in the estimation of uncertainty in their synthesis. Second, in relation to the objective assessment of the degree of certainty of qualitative statements.

Keywords. Climate change, consequences, quantitative assessment, qualitative assessment, uncertainties, IPCC.

References

Myuller P., Noyman P., Shtorm R. 1982. *Tablitsy po matematicheskoy statistike* [Mathematical Statistics Tables]. Moscow, Finansy i statistika, 271 p.

Alley R.B., Andrews J.T., Brigham-Grette J., Clarke G.K.C., Cuffey K.M., Fitzpatrick J.J., Funder S., Marshall S.J., Miller G.H., Mitrovica J.X., Muhs D.R., Otto-Bliesner B., Polyak L., White J.W.C. 2009. History of the Greenland Ice Sheet: Paleoclimatic insights. – *Quat. Sci. Rev.*, vol. 29(15-16), pp. 1728-1756.

Climate Change 1995. 1996a. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /Editors J.J. Houghton, L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. – Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge, 572 p. ISBN 0 521 564336 Hardback; 0 521 564360 Paperback.

Climate Change 1995. 1996b. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /Editors: R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss. – Published by the Press

Syndicate of the University of Cambridge, 879 p. ISBN 0-521-56431-X Hardback. ISBN 0-521-56437-9 Paperback.

Gerlach M., Altmann E. G. 2019. Testing Statistical Laws in Complex Systems. – Physical Review Letters, vol. 122, pp. 168-301.

IPBES, 2018. IPBES Guide on the production of assessments. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 44 p. – Available at <https://www.ipbes.net/guide-production-assessments>.

Mach K.J., Mastrandrea M.D., Freeman P.T., Field C.B. 2017. Unleashing expert judgment in assessment. – Global Environmental Change, vol. 44, pp. 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.02.005>

Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. 2010. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – Available at <http://www.ipcc.ch>.

Mastrandrea, M. D., Mach K. J. 2011. Treatment of uncertainties in IPCC Assessment Reports: Past approaches and considerations for the Fifth Assessment Report. – Climatic Change, vol. 108, pp. 659-673.

Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Edenhofer O., Stocker T.F., Field C.B., Ebi K.L., Matschoss P.R. 2011. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. – Climatic Change, vol. 108, pp. 675-691. DOI 10.1007/s10584-011-0178-6.

Moss R.H., Schneider S.H. 2000. Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations To Lead Authors For More Consistent Assessment and Reporting. – In: Guidance Papers on the Cross Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC. Editors: R. Pachauri, T. Taniguchi and K. Tanaka. Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 33-51. ISBN 4-9980908-0-1

Sanchez-Rodriguez R., Ürge-Vorsatz D., Barau A.S. 2018. Sustainable Development Goals and climate change adaptation in cities. – Nature Climate Change, February 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0098-9