

Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке

С.М. Семенов^{1,2)}, А.А. Гладильщикова¹⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б,

²⁾ Институт географии Российской академии наук,
РФ, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

*Адрес для переписки: *SergeySemenov1@yandex.ru*

Реферат. В прикладных климатологических исследованиях в последние более чем 30 лет возникла и развилась традиция и культура построения сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Этот междисциплинарный процесс включает в себя построение сценариев социально-экономического развития (с учетом политических, экономических и технологических аспектов), оценку соответствующих изменений в климатообразующих факторах и, далее, оценку собственно изменений климата и их последствий. В данной работе систематически представлены методологические подходы, которые использовались при построении сценариев, собственно основные группы сценариев, а также некоторые результаты их анализа. Рассмотрены те группы сценариев, которые использовались в научных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) при оценке возможностей ограничить современное антропогенное изменение климата Земли.

Ключевые слова. Климатическая система, антропогенные воздействия, климатически активные вещества, сценарии, глобальный климат, изменения.

Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the XXI century

S.M. Semenov^{1,2)}, A.A. Gladilshchikova¹⁾*

¹⁾ Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *SergeySemenov1@yandex.ru*

Abstract. In applied climate research, in the last more than 30 years, a tradition and culture of constructing scenarios of anthropogenic impacts on the Earth's climate system has emerged and developed. This interdisciplinary process includes the construction of scenarios for socio-economic development (taking into account

political, economic and technological aspects), the assessment of respective changes in climate-forming factors, and, further, the assessment of climate changes themselves and their consequences. This paper systematically presents the methodological approaches used in the construction of scenarios, the main groups of scenarios themselves, as well as some results of their analysis. The groups of scenarios employed in the scientific reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in assessing the possibilities to limit the current anthropogenic climate change on the Earth are considered.

Keywords. Climate system, anthropogenic impacts, climatically active substances, scenarios, global climate, changes.

Введение

Климат Земли формируется глобальной климатической системой и потоком энергии, приходящим из космоса, в основном, от Солнца. В соответствии с определением, приведенным в Глоссарии Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), климатическая система есть «глобальная система, состоящая из пяти основных компонентов – атмосферы, гидросферы, криосферы, литосферы и биосферы – и взаимодействий между ними» (IPCC, 2021b). Эти взаимодействия осуществляются потоками вещества и энергии между этими сферами. Существуют и обратные связи между климатом и этими потоками. Расширение понятия «климатическая система» путем включения данных обратных связей, приводит к концепции «земной системы» (Earth's system). Солнце является основным первичным источником энергии для нее.

Климатическая система не статична. Существуют естественные внешние факторы ее изменчивости, такие, как вариации параметров земной орбиты и колебания солнечной активности (что модулирует поток солнечной энергии, притекающей к верхней границе атмосферы Земли), а также извержения вулканов (влияют на радиационные свойства атмосферы). Есть и иные, естественные внутренние факторы, связанные с собственной изменчивостью климатической системы, влияние которых выражается в форме, в частности, широкомасштабных колебаний земного климата (типа Эль-Ниньо – Южное колебание). Существуют и неестественные, антропогенные факторы изменения климата, связанные с хозяйственной деятельностью человека, такие, как эмиссии климатически активных веществ в атмосферу (прежде всего, парниковых газов) и изменение землепользования. Это меняет радиационные свойства атмосферы и земной поверхности, что сказывается на температуре в приповерхностном слое (в частности, вследствие изменения парникового эффекта). Конечно, при этом меняется не только термический режим, но и иные параметры климата. Изменения происходят не только в климатической системе, но и в земной системе в целом. Обратные связи также приводят к изменениям естественных потоков вещества и энергии между сферами.

Факторы и процессы, определяющие естественную изменчивость климата Земли, в значительной мере изучены. Вследствие этого естественные измене-

ния климата прогнозируемы, по крайней мере на концептуальном уровне. Иное положение возникает при наличии антропогенного воздействия на климатическую систему. В этой ситуации будущий климат можно прогнозировать, лишь зная конкретный уровень антропогенного воздействия, например, объем глобальных выбросов парниковых газов в будущем. Однако он зависит от пути развития мирового хозяйства, в том числе технологий, что прогнозировать на десятилетия невозможно. Таким образом, «безусловный» прогноз климата в том понимании, как прогноз погоды, невозможен. Вместо этого в современной науке используется «условный прогноз», прогноз в рамках определенного условия, предположения о характере антропогенных воздействий. Это предположение принято называть «сценарием». В соответствии с широким пониманием последнего термина он означает следующее:

«Правдоподобное (plausible) описание того, как может развиваться будущее, основанное на связном и внутренне непротиворечивом наборе допущений о ключевых движущих силах (например, темпах технологических изменений, ценах) и зависимостях» (IPCC, 2021b).

Информация о будущем климате генерируется климатическими моделями. Их спектр весьма широк – от простых глобально агрегированных моделей до детализированных математических моделей земной системы, выдающих распределение климатических параметров в пространстве и их изменение во времени. При этом на вход модели подается информация об антропогенном воздействии на климатическую систему Земли (в том числе об антропогенных эмиссиях климатически активных веществ, синонимически – «радиационно-активных веществ»), соответствующая определенному сценарию мирового социально-экономического развития. Результаты такого моделирования используются для того, чтобы получить представление о последствиях изменения климата по той траектории, которая соответствует заданному сценарию.

Такие сценарии разрабатываются не климатологами, а специалистами в социально-экономических науках. Климатологи в дальнейшем работают уже с теми антропогенными воздействиями на климатическую систему (в том числе траекториями эмиссии или концентраций в атмосфере радиационно-активных веществ), которые соответствуют различным сценариям мирового социально-экономического развития. Поэтому климатологи часто применяют термин «сценарий» непосредственно к режиму таких антропогенных воздействий.

Цель данной статьи – дать читателю систематизированное представление о сценариях будущих антропогенных изменений климатической системы, которые широко применялись и применяются в прикладных исследованиях с начала 1990-х годов, в том числе при подготовке научных докладов МГЭИК.

Методологические замечания

Сценарии широко применялись уже в первых обобщениях представлений о будущем климате, которые были отражены в научных докладах МГЭИК в 1990-х годах (Girod et al., 2009).

В Первом оценочном докладе МГЭИК Рабочей группой III¹⁾ была предложена (IPCC, 1990b) группа «политических сценариев» (policy scenarios) А, В, С и D. Они предназначались для изучения реакции климатической системы на различные меры по ограничению эмиссий. Сценарий А назывался также «обычный ход дел» (business-as-usual, BAU). В более поздних работах его часто обозначают SA90. Он не предполагает никаких ограничений на глобальные антропогенные выбросы радиационно-активных веществ. Остальные сценарии этой группы предполагали определенные «политики» – меры контроля выбросов (здесь «политика» означает «программа действий»).

Принятые в рамках сценариев А-D представления о будущем мировом развитии (включая различные аспекты – технологические, экономические, социальные, политические и пр.) «перерабатывались» в траектории глобальных эмиссий радиационно-активных веществ, в первую очередь парниковых газов. Это выполнялось с использованием эмпирических соотношений с/между соответствующими переменными (численностью населения, темпом роста экономики, технологическим прогрессом, потреблением энергии, валовым внутренним продуктом, уровнем международного сотрудничества и т.д.) или же с помощью более совершенного инструментария – имитационных моделей соответствующих социально-экономических процессов. Такие модели впоследствии стали называться «модели комплексной оценки», Integrated Assessment Models – IAMs).

В Первом оценочном докладе МГЭИК были также представлены так называемые «научные сценарии» (science scenarios), разработанные Рабочей группой I (IPCC, 1990a, с. 331). Они предназначались для изучения реакции климатической системы на различные изменения глобальных эмиссий радиационно-активных веществ в атмосферу безотносительно причин этих изменений. Были разработаны четыре таких сценария эмиссий. Они маркировались символами S1, S2, S3 и S4.

Затем Рабочая группа I МГЭИК оценила изменения климата до конца XXI века, соответствующие этим траекториям глобальных эмиссий, и для политических сценариев, и для научных. Расчет изменений параметров климатической системы, исходя из рассчитанных или принятых оценок траекторий глобальных эмиссий, выполнялся с помощью глобальных климатических моделей. Запуск детализированной глобальной климатической модели для расчета на срок до конца XXI века в 1980-е годы и в начале 1990-х требовал огромных машинных ресурсов. Поэтому расчеты производились по упрощенной схеме – см. раздел 6.6 в (IPCC, 1990a). Отличительными ее чертами были использование специальной подмодели перемешивания в океане (box-upwelling-diffusion model) и параметра чувствительности равновесного климата (equilibrium climate sensitivity), который характеризовал увеличение равновесной глобальной средней температуры в приповерхностном слое в ответ на удвоение концентрации CO₂ в атмосфере. При этом использовались три

¹⁾ В цикле Первого оценочного доклада МГЭИК состояла из трех Рабочих групп: I–«Наука» (Science), II–«Воздействия» (Impacts), III–«Политика» (Policy).

значения чувствительности равновесного климата: 1.5°C (низкая), 2.5°C (наилучшая оценка) и 4.5°C (высокая).

Уже через два года, в 1992 г., вышел «Дополнительный доклад к научной оценке МГЭИК» (IPCC, 1992). В нем была представлена совокупность сценариев IS92 (a-f) глобальных эмиссий радиационно-активных веществ для использования в модельных исследованиях при описании широкого спектра возможных будущих глобальных эмиссий в отсутствие скоординированной ответной реакции (т.е. политики) на изменение климата, кроме тех мер, которые уже согласованы. Впоследствии сценарии IS92 широко использовались как в цикле Второго оценочного доклада МГЭИК (см., например, (Kattenberg et al., 1995)), так и в более поздних исследованиях.

Однако уже в год выпуска Второго оценочного доклада (1995 г.) стало ясно, что понимание движущих сил антропогенных эмиссий радиационно-активных веществ и методологии моделирования физических, экологических и социально-экономических процессов вступили в фазу быстрого развития, и сценарии IS92 нуждаются в серьезном дополнении и – в некоторых отношениях – в пересмотре. В связи с этим МГЭИК приняла решение о разработке нового семейства сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему Земли, связанного с эмиссиями. Эти сценарии были предназначены для использования в цикле Третьего оценочного доклада МГЭИК (1996-2001 гг.) и других научных работах этого направления. Итоги этой работы были подведены в публикации специального доклада МГЭИК о сценариях выбросов – СДЦВ, Special Report on Emission Scenarios – SRES (IPCC, 2000). Решающую роль в подготовке этого доклада сыграл координирующий ведущий автор Небойша Накичнович и его группа в Международном институте прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) в Лаксенбурге, Австрия.

Сценарии SRES учитывают влияние широкого спектра факторов эмиссий – демографических, технологических, экономических и др. Эти сценарии не включают факторы климатической политики, т.е. какие-либо меры, направленные на ограничение антропогенного изменения климата. Однако при построении сценариев учитывалось, что «неклиматические политики» могут оказывать влияние на эмиссии парниковых газов. Сценарии SRES описывают антропогенные выбросы парниковых газов и некоторых других радиационно-активных веществ, а также факторы, их определяющие. В рассмотрение были включены антропогенные выбросы диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄), закиси азота (N₂O), гидрофторуглеродов (HFCs), перфторуглеродов (PFCs), гексафторида серы (SF₆), гидрохлорфторуглеродов (HCFCs), хлорфторуглеродов (CFCs), химических предшественников (precursors) аэрозолей, а также выбросы некоторых химически активных газов – диоксида серы (SO₂), оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x) и неметановых летучих органических соединений (NMVOCs). Эмиссии были представлены в агрегированном виде для четырех регионов мира и глобально. Обратные связи климат-эмиссии не учитывались (IPCC, 2000, p. 3).

При подготовке этих сценариев широко использовались данные специальной научной литературы и шесть различных подходов к математическому моделированию рассматриваемых процессов. Уже в 1998 г. по решению Бюро МГЭИК разрабатываемые сценарии стали доступны для авторов Третьего оценочного доклада МГЭИК (IPCC, 2001a, 2001b, 2001c) и были использованы при его подготовке. При расчете климата будущего в рамках сценариев SRES использовалось несколько климатических моделей. Это дало возможность оценить изменчивость климата не только в зависимости от сценария антропогенных эмиссий, но и от свойств климатических моделей («естественнонаучная изменчивость»).

В цикле Четвертого оценочного доклада МГЭИК (2002-2007 гг.) использовались, в основном, сценарии SRES. Однако Рабочая группа III МГЭИК выполнила также поиск в научной литературе и систематизацию значительного числа новых сценариев (post-SRES) антропогенных эмиссий, построенных с использованием концептуально близких подходов. Расчет соответствующих климатов будущего производился далее с помощью широкого спектра климатических моделей – от упрощенных, агрегированных моделей (Climate Models, CMs) до, впоследствии, сложных «моделей общей циркуляции атмосферы и океана» – МОЦАО (Atmosphere – Ocean General Circulation Models, AOGMs). Со временем МОЦАО во все большей мере учитывали обратную связь изменения климата с углеродным циклом. Для этих моделей сейчас используется название «модели земной системы» (Earth's System Models, ESMs). Такое развитие моделей было необходимым, поскольку появлялись новые достоверные данные о таких явлениях, как, например, усиление естественных эмиссий или же нетто-эмиссий парниковых газов из наземных систем в атмосферу при потеплении, ослабление поглощения атмосферного CO_2 океаном при потеплении и закислении поверхностного слоя. Учет этого приводил к более высоким значениям концентраций парниковых газов при сценарных расчетах.

Завершая работу над Четвертым оценочным докладом, МГЭИК приняла решение более не принимать непосредственного участия в научных разработках новых сценариев, а лишь их катализировать, организуя необходимые научные совещания – семинары, симпозиумы и т.д. В 2008 г. в Нордвейкерхауте, Нидерланды, было организовано подобное совещание, инициировавшее процесс. На этом совещании было предложено изменить подход к организации разработки сценариев научным сообществом (Moss et al., 2008).

Это изменение отражено на рис. 1. Ранее – см. левую панель рисунка – процесс построения сценариев развивался последовательно, а именно, последовательно оценивались: социально-экономические и эмиссионные сценарии (с помощью моделей комплексной оценки – IAMs); радиационное воздействие; будущий климат (с помощью климатических моделей – CMs и более сложных); воздействия, адаптация и уязвимость (с помощью методов оценки воздействий, адаптации и уязвимости IAV – Impacts, Adaptation and Vulnerability). Однако такой логичный подход обладал и некоторыми недостатками. А именно, процесс полной разработки сценариев занимал очень

много времени (что, в частности, не дало возможности разработать полностью новую совокупность сценариев в цикле Четвертого оценочного доклада МГЭИК (2002-2007 гг.). Также было затруднительно обеспечивать должный интенсивный и своевременный обмен информацией и взаимную корректировку разработок на разных этапах работы.

В связи с этим экспертами, собравшимися в Нордвейкерхауте, был предложен новый, параллельный подход, представленный на правой панели рис. 1. В нем процесс начинается с разработки блока (1) – репрезентативных траекторий концентраций (RCPs – representative concentration pathways) радиационно-активных веществ и радиационного воздействия (radiative forcing). Блоки (2a) и (2b) разрабатываются одновременно. При расчете углеродного цикла и климатических параметров в блоке (2a) на вход принимаются RCPs, разрабатываемые в блоке (1), а эмиссионные и социально-экономические сценарии, разрабатываемые в блоке (2b), позволяют производить отбор и корректировать RCPs. Разработка сценариев блоков (2a) и (2b) проходит во взаимодействии с оценками воздействий, адаптации и уязвимости, получаемыми в блоке (3).

Предполагалось, что при реализации параллельной схемы, представленной на правой панели рис. 1, исследовательскому сообществу удастся завершить все эти разработки одновременно и, желательно, в цикле Пятого оценочного доклада МГЭИК (2008-2015 гг.). Запрос МГЭИК состоял в том числе в том, чтобы разработчики учитывали потребности «конечного потребителя», которым в значительной мере являлся международный переговорный процесс по климату. В его рамках уже появилось понятие «глобальной температурной цели», т.е. максимально допустимого превышения глобальной средней температурой в приповерхностном слое ее доиндустриальных значений. В преддверии переговоров по новому международному климатическому соглашению – Парижскому соглашению (заключено в 2015 г.) – политикам важно было знать способны ли различные меры по ограничению эмиссий стабилизировать температуру, удержать ее в «допредельной области» или же вернуть в эту область после временного превышения (overshoot) максимально допустимого уровня (Arora et al., 2011). Т.е., возвращаясь к языку Первого оценочного доклада МГЭИК, требовался анализ «политических» сценариев.

Представленная на рис. 1 схема построения сценариев в значительной мере позволила приблизиться к достижению этих целей, и сценарии RCP сыграли важную роль в цикле Пятого оценочного доклада МГЭИК (2008-2014 гг.). Однако уже при завершении этого цикла научное сообщество стало осознавать некоторые недостатки построенной совокупности сценариев. Среди них были следующие:

- модели IAMs, использовавшиеся для получения оценок тех эмиссий радиационно-активных веществ, на основе которых далее рассчитывались репрезентативные траектории концентрации RCP и радиационное воздействие RF, были весьма разнородными в отношении учитываемых социально-экономических и технологических факторов;

– модели CMs, использовавшиеся для расчета климатов, соответствующих RCPs, были все же упрощенными, существенно агрегированными; однако уже ясно проявилась потребность в оценке пространственных распределений будущих изменений климата;

– изменения температуры, соответствующие большинству RCPs, не соответствовали температурным целям 1.5 и 2°C, обсуждавшимся в связи с подготовкой Парижского соглашения.

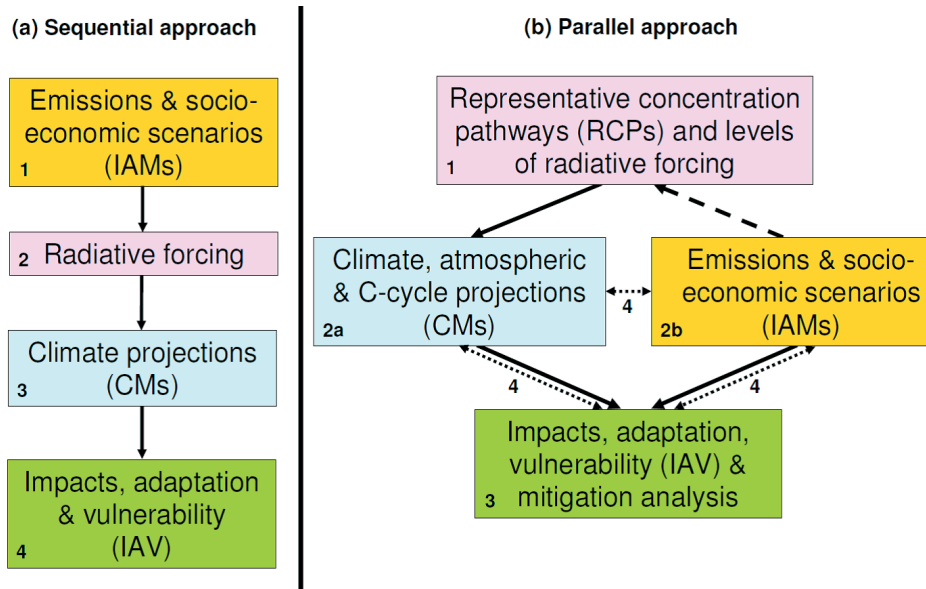


Рисунок 1. Подходы к разработке глобальных сценариев: (а) предыдущий, последовательный подход; (б) предложенный новый, параллельный подход

Цифры обозначают этапы работы (2a и 2b выполняются одновременно). Стрелки указывают на передачу информации (сплошная линия), отбор сценариев RCP (крупная пунктирная линия) и интеграцию информации и обратные связи (мелкая пунктирная линия); (Moss et al., 2008)

Figure 1. Approaches to the development of global scenarios: (a) the previous, sequential approach; (b) the proposed new, parallel approach

The numbers indicate the stages of work (2a and 2b are performed simultaneously). Arrows indicate information transfer (solid line), RCP scenario selection (large dotted line) and information integration and feedbacks (small dotted line); (Moss et al., 2008)

В связи с этим в цикле Шестого оценочного доклада МГЭИК (2015-2022 гг.) в научном сообществе была развернута работа по построению нового семейства сценариев SSP – shared socio-economic pathways («общие социально-экономические пути» развития). Появилось большое число публикаций, развивающих новый подход – см., например, (Ebi et al., 2014; Kriegler et al., 2014; O'Neill et al., 2013, 2014; van Vuuren et al., 2014). Развиваемая в этих и других публикациях новая структура совокупности сценариев отвечала двум основным требованиям (Gidden et al., 2019, p.1 444):

– общности социально-экономических предположений (в том числе в отношении численности населения, валового внутреннего продукта, уровня бедности), используемых при разных модельных реализациях сценария;

– возможности исследования множества путей мирового развития, в рамках которых заданные параметры климата могут быть достигнуты со временем (обычно – к концу XXI века).

Рамочная структура такого подхода весьма четко представлена в работе (van Vuuren et al., 2014) – см. рис. 2.

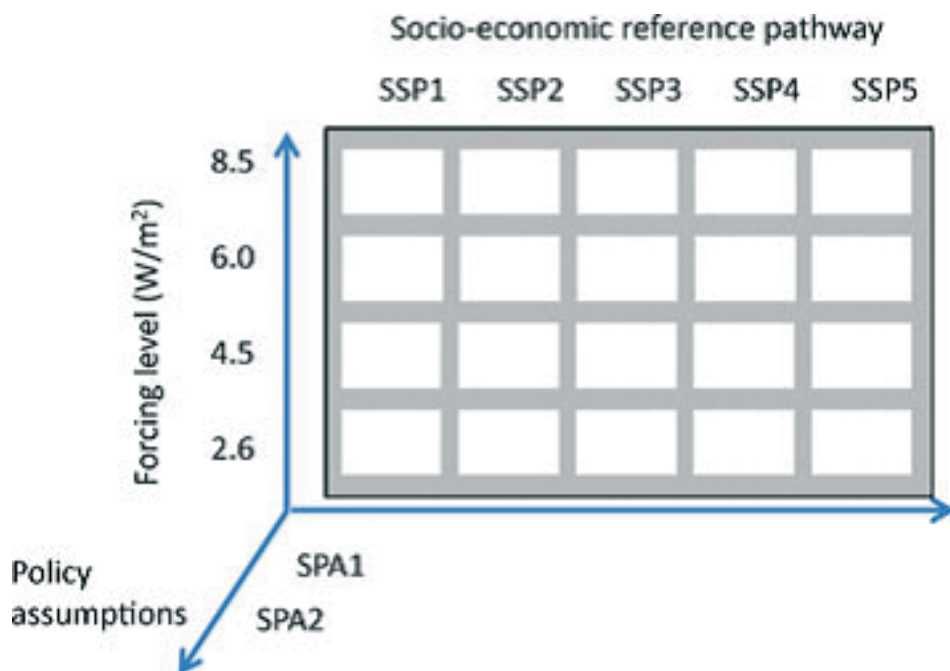


Рисунок 2. Достижимый к концу определенного периода уровень радиационного воздействия (radiative forcing – RF, Вт м⁻²) зависит от базового (reference) общего пути социально-экономического развития (shared socio-economic pathway – SSP) и базового предположения о политике (shared policy reference assumptions – SPA) (van Vuuren et al., 2014)

Figure 2. The level of radiative forcing (RF, Wm⁻²) achieved at the end of a certain period depends on the basic (reference) shared socio-economic pathway (SSP) and the basic shared policy reference assumptions (SPA) (van Vuuren et al., 2014)

Примерами таких SPA могут быть меры митигации (единые углеродные цены или же детальное регулирование эмиссий) и меры адаптации (например, уровень международного сотрудничества) (van Vuuren et al., 2014, p. 380).

Разработки этого направления были выполнены несколькими группами экспертов. Наибольшее применение в прикладных исследованиях получили пять сценариев SSP:

SSP1: (van Vuuren et al., 2017); «зелёное» развитие;

SSP2: (Fricko et al., 2017); промежуточный сценарий;

SSP3: (Fujimori et al., 2017); неравенство между странами;
SSP4: (Calvin et al., 2017); неравенство внутри стран;
SSP5: (Kriegler et al., 2017); использование ископаемого топлива.

В условиях этих сценариев в зависимости от применяемой климатической политики²⁾ могут достигаться различные уровни радиационного воздействия (Riahi et al., 2017).

Следует отметить, что сценарии SSP разрабатывались при тесном взаимодействии с проектом CMIP – Coupled Model Intercomparison Project (Eyring et al., 2016; <https://search.es-doc.org/?project=cmip6&>), а именно, его шестой фазой – CMIP6. Модели IAMs гармонизировались в рамках подпроекта Scenario MIP – Scenario Model Intercomparison Project (O'Neill et al., 2016; <https://cmip.ucar.edu/scenario-mip>), а расчеты будущих климатов делались с помощью сложных климатических моделей проекта CMIP6 (<http://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>).

Сценарии

Сценарии А – D и S1 – S4

«Политические» сценарии А – D, представленные в Первом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 1990b), были разработаны Рабочей группой III МГЭИК. Они описывают до 2100 г. глобальные антропогенные эмиссии диоксида углерода (CO₂) метана (CH₄), закиси азота (N₂O), хлорфторуглеродов (ХФУ), оксида углерода (CO) и оксидов азота (NO_x). При построении сценариев эти эмиссии определялись, исходя из предположений о темпах развития мирового хозяйства и принимаемых мерах («политика») по ограничению антропогенного воздействия на климатическую систему, прежде всего по ограничению эмиссий радиационно-активных веществ. Приведем их краткое описание, следуя (IPCC, 1990a, Appendix 1) с небольшими изменениями:

«В Сценарии А (BAU) энергоснабжение связано с интенсивным использованием угля, при этом повышение эффективности использования весьма умеренное. Контроль уровня CO₂ также незначительный. Вырубка лесов продолжается. Эмиссии метана в сельском хозяйстве не ограничиваются. В отношении ХФУ выполняется, хотя бы частично, Монреальский протокол.

В Сценарии В в энергоснабжении постепенно происходит переход на низкоуглеродное топливо, преимущественно на природный газ. Достигается значительное увеличение эффективности использования. Контроль эмиссии CO₂ становится более строгим. Процесс сведения лесов обращается вспять. Монреальский протокол реализуется в полном объеме.

В Сценарии С переход к возобновляемым источникам энергии и ядерной энергии происходит во второй половине XXI века. Эмиссии ХФУ прекращаются, а сельскохозяйственные эмиссии ограничиваются.

²⁾ В данной статье термин «policy» переводится с английского для краткости и удобства словоупотребления как «политика», хотя ему по смыслу в русском языке лучше соответствует более узкое «программа действий».

Сценарий D предполагает переход к возобновляемым источникам энергии и ядерной энергии в первой половине XXI века, что сокращает эмиссии диоксида углерода, делая их относительно стабильными в индустриальных странах. Этот сценарий показал, что строгий контроль эмиссий в индустриальных странах в сочетании с небольшим ростом эмиссий в развивающихся странах приводит к стабилизации концентрации в атмосфере. В рамках этого сценария глобальные антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу к середине XXI века становятся вполнину меньше значения 1985 г.».

Научные сценарии S1 – S4 были построены Рабочей группой I МГЭИК с использованием представлений об эволюции глобальных эмиссий парниковых газов, которые не были связаны с конкретными социально-экономическими предположениями. А именно, считалось, что для всех рассматриваемых парниковых газов объемы их глобальных антропогенных эмиссий в будущем эволюционируют следующим образом:

S1 – после 1990 г. сохраняются на уровне 1990 г.;

S2 – сократились на 50% в 1990 г. и затем сохраняются постоянными на этом уровне;

S3 – ежегодно сокращаются на 2%, начиная с 1990 г.;

S4 – ежегодно возрастают на 2% с 1990 г. до 2010 г., а затем сокращаются ежегодно на 2%.

Во всех случаях объем эмиссий в 1990 г. считался таким же, как для BAU (Сценарий A).

На рис. 3 приведены траектории глобальных антропогенных эмиссий CO_2 в атмосферу, соответствующие сценариям A – D.

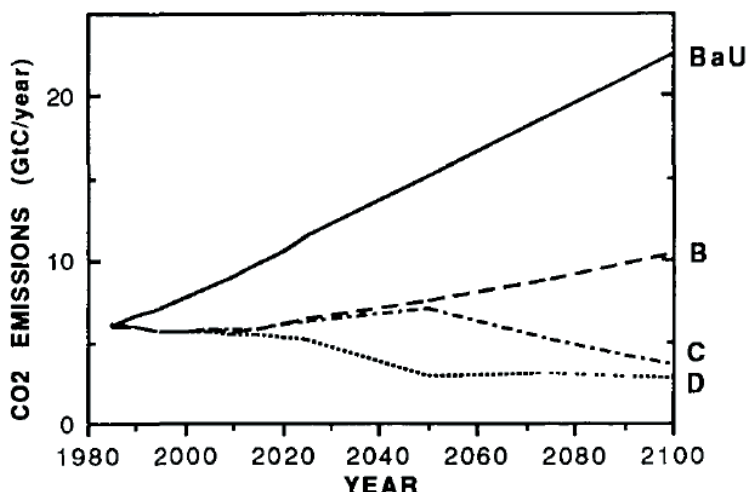


Рисунок 3. Глобальные антропогенные эмиссии диоксида углерода CO_2 (ГтС год^{-1}) для сценариев A – D, разработанных Рабочей группой III МГЭИК (IPCC, 1990b, с. 331)

Figure 3. Global anthropogenic emissions of carbon dioxide CO_2 (GtC year^{-1}) for scenarios A – D developed by IPCC Working Group III (IPCC, 1990b, p. 331)

На рис. 4 представлены изменения концентрации диоксида углерода CO_2 (ppm) в атмосфере в рамках научных сценариев S3 и S4 (IPCC, 1990а, с. 334), разработанных Рабочей группой I МГЭИК. Аббревиатура «ра» в поле рисунка означает «в год» (*per annum* – лат.) и вместе с предшествующим числом характеризует ежегодное сокращение глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов, применяемое в расчете с указанной даты.

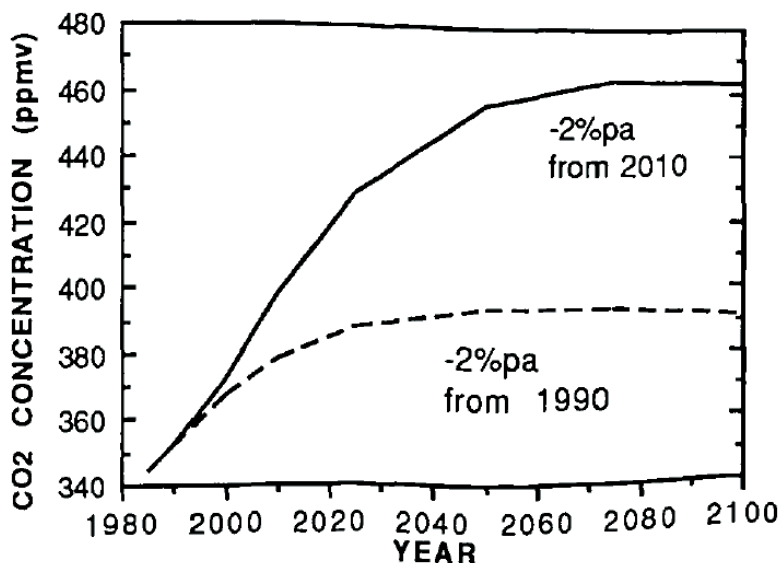


Рисунок 4. Изменения концентрации диоксида углерода CO_2 (ppm) в атмосфере в рамках сценариев S3 и S4, разработанных Рабочей группой I МГЭИК (IPCC, 1990а, с. 334)

Figure 4. Changes in the concentration of carbon dioxide CO_2 (ppm) in the atmosphere under scenarios S3 and S4 developed by IPCC Working Group I (IPCC, 1990а, p. 334)

В докладе Рабочей группы I МГЭИК (IPCC, 1990а) приведены те рассчитанные изменения средней глобальной температуры в приповерхностном слое, которые соответствуют политическим сценариям А – D (рис. 5). При расчете использовалась наилучшая оценка чувствительности равновесного климата: потепление на 2.5°C в приповерхностном слое воздуха при удвоении концентрации CO_2 .

В докладе Рабочей группы I МГЭИК (IPCC, 1990а) приведены также изменения средней глобальной температуры в приповерхностном слое, которые соответствуют научным сценариям и S1 – S4. На рис. 6 представлены результаты расчета в рамках сценариев S3 и S4.

В рамках сценариев А – D и S1 – S4 Рабочей группой I МГЭИК были оценены изменения и некоторых других параметров климатической системы в XXI веке, в том числе концентраций парниковых газов в атмосфере, распределения температуры и суммы осадков по сезонам, подъема уровня моря, некоторых региональных климатических параметров (IPCC, 1990а, с. 331-339).

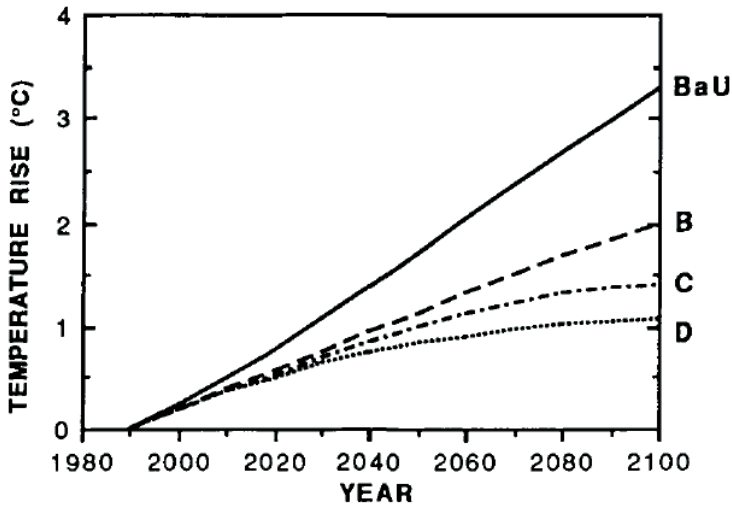


Рисунок 5. Увеличение средней глобальной температуры в приповерхностном слое, соответствующее сценариям А – D (IPCC, 1990a, с. 336)

Figure 5. An increase in the average global temperature in the near-surface layer corresponding to scenarios A – D (IPCC, 1990a, p. 336)

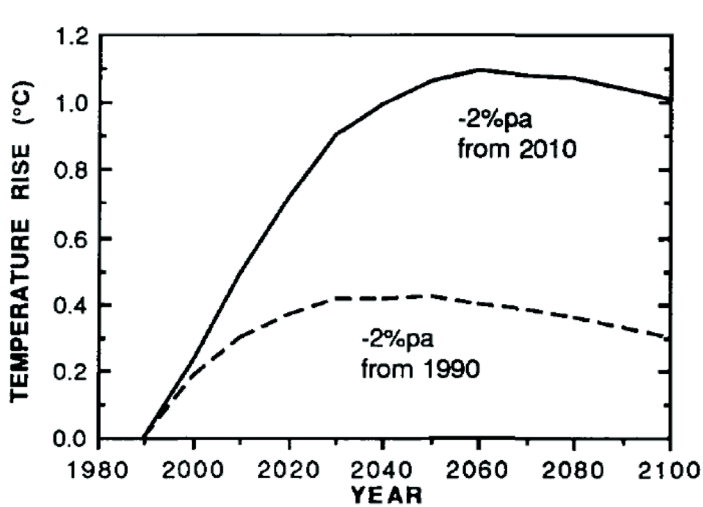


Рисунок 6. Изменения глобальной средней температуры в приповерхностном слое в условиях сценариев S3 и S4 (IPCC, 1990a, с. 336)

Figure 6. Changes in the global average temperature in the near-surface layer under the conditions of scenarios S3 and S4 (IPCC, 1990a, p. 336)

Сценарии IS92 (a-f)

При построении этих сценариев зависимости эмиссий от социально-экономических переменных учитывались более детально.

Вот, например, какие параметры мирового развития были приняты для сценария IS92a (IPCC, 1992, p. 11):

- население – 11.3 млрд к 2100;
- экономический рост в год – 2.9% в 1990-2025 гг. и 2.3% в 1990-2100 гг.;
- энергия (предложение) – 12 000 ЭДж (экзаджоулей) условного топлива в год; 13 000 ЭДж природного газа; стоимость солнечной энергии снижается до 0.075 долл. США за кВтч (киловатт•час); 191 ЭДж биотоплива доступны в год по цене 70 долл. США за баррель;
- вступил в силу на международном уровне согласованный контроль эмиссий оксидов серы SOx, оксидов азота NOx и неметановых летучих органических соединений NMVOCs;
- частичное выполнение Монреальского протокола. Передача технологий приводит к постепенному отказу от ХФУ к 2075 году даже в странах, не подписавших соглашение.

На рис. 7 представлены результаты оценки изменения глобальных антропогенных эмиссий диоксида углерода CO₂ в условиях сценариев IS92 (a-f).

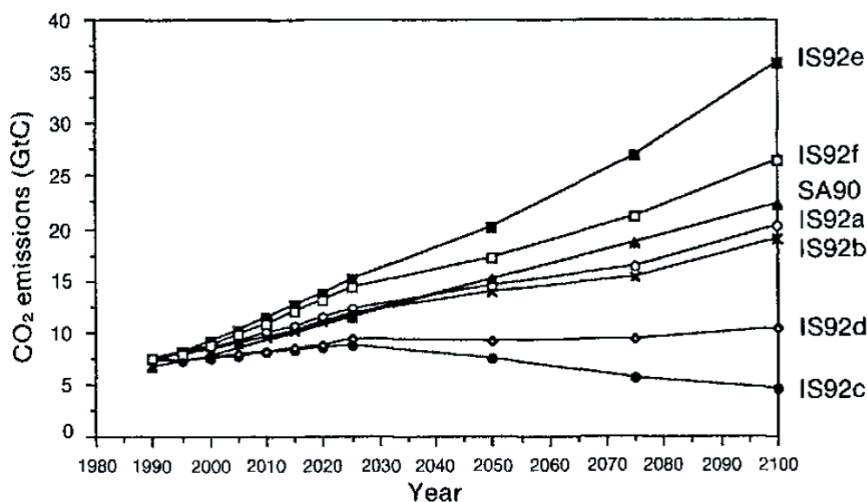


Рисунок 7. Глобальные антропогенные эмиссии CO₂ (Гт С год⁻¹) в рамках сценариев IS92 (a-f) (IPCC, 1992, p. 13)

Figure 7. Global anthropogenic CO₂ emissions (Gt C year⁻¹) under IS92 (a-f) scenarios (IPCC, 1992, p. 13)

Расчеты в рамках сценария IS92a приводят к концентрациям радиационно-активных веществ, которые чуть меньше тех, что соответствуют Сценарию А (BAU), представленному в Первом оценочном докладе МГЭИК (IPCC, 1990a, 1990b). Причины этого – более умеренные предположения об эмиссиях и влияние факторов, которые частично противоположны по своему действию.

На рис. 8 и 9 представлены изменения глобальной средней температуры в приповерхностном слое, рассчитанные в условиях сценариев IS92 (a-f). Как видно на рисунке, наибольший рост температуры соответствует сценарию IS92e, который предполагал умеренный рост мирового населения, быстрый рост экономики, высокую доступность ископаемого органического топлива и постепенное сокращение использования ядерной энергии.

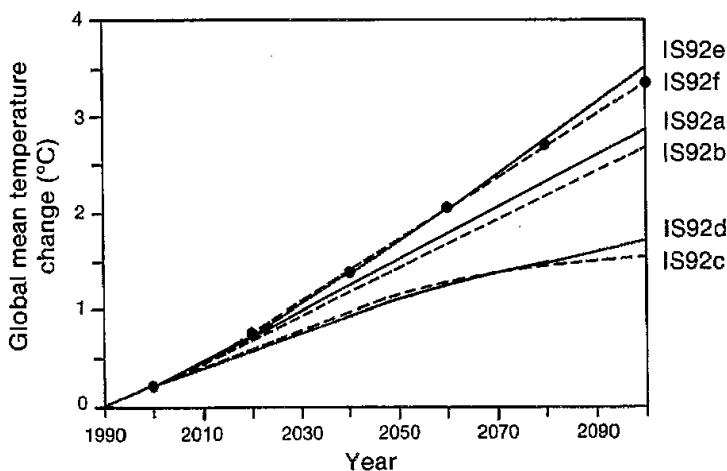


Рисунок 8. Изменения глобальной средней температуры в приповерхностном слое, рассчитанные в условиях сценариев IS92 (a-f); использовалась наилучшая оценка чувствительности равновесного климата (IPCC, 1992, p. 18)

Figure 8. Changes in the global mean temperature in the near-surface layer calculated under the conditions of the IS92 (a-f) scenarios; the best estimate of the equilibrium climate sensitivity was used (IPCC, 1992, p. 18)

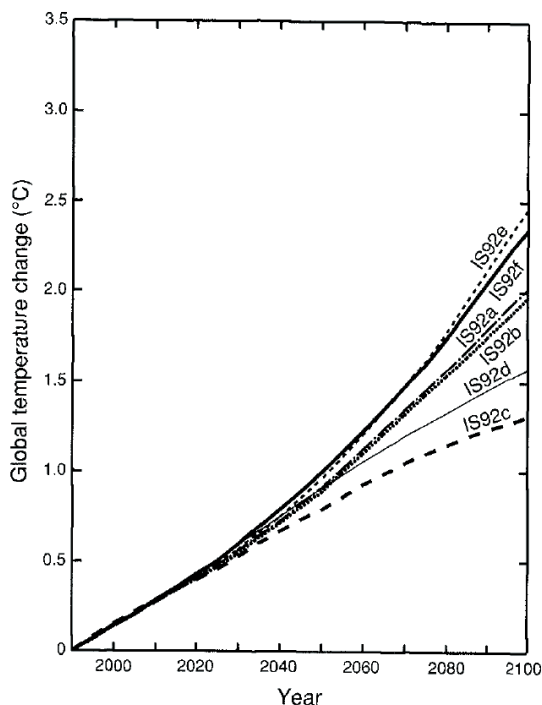


Рисунок 9. Изменения глобальной средней температуры в приповерхностном слое, рассчитанные в условиях сценариев IS92(a-f) с полным учетом радиационного воздействия аэрозолей. Использовалась наилучшая оценка чувствительности равновесного климата (Kattenberg et al., 1995, p. 323)

Figure 9. Changes in the global mean temperature in the near-surface layer calculated under the conditions of the IS92(a-f) scenarios with full consideration of the radiation effects of aerosols. The best estimate of the equilibrium climate sensitivity was used (Kattenberg et al., 1995, p. 323)

Подобные сценарные исследования были продолжены и нашли свое отражение, в частности, во Втором оценочном докладе МГЭИК, вышедшем в 1995 г. На рис. 9 приведены результаты, опубликованные в (Kattenberg et al., 1995, р. 316), которые уточняют данные рис. 6 – учитывают охлаждающий эффект аэрозолей. Сравнение кривых, соответствующих сценарию IS92e, показывает, что охлаждающий эффект аэрозолей значителен – около 1°C к концу XXI века.

Сценарии SRES

В докладе (IPCC, 2000) представлены результаты разработки 40 сценариев, построенных шестью группами специалистов в области математического моделирования. Им не приписаны никакие вероятности реализации, т.е. использовать их для прогнозирования нельзя. Они предназначены для оценки глобальных и – в какой-то мере – региональных эмиссий, соответствующих определенным предположениям о мировом развитии в будущем, а также для понимания вклада различных социально-экономических факторов – по отдельности и совместно – в формирование эмиссий.

Сценарии SRES организованы в четыре семейства (family) – A1, A2, B1, B2. Каждое из них характеризовалось своей «сюжетной линией» (storyline). Приведем их краткое описание, следуя (IPCC, 2000, р. 4-5).

A1. Основная линия и сценарии этого семейства предполагают быстрый экономический рост, быстрое внедрение новых эффективных технологий, а также рост народонаселения до середины XXI столетия и последующее его уменьшение. Основными чертами развития будут сближение регионов, существенное уменьшение региональных различий в доходах на душу населения, усиление культурных и социальных взаимодействий, а также создание новых возможностей. Сценарии этого семейства делятся на три группы, различающиеся по энергетическому «акценту»: A1FI – интенсивное использование ископаемого органического топлива, A1T – интенсивное использование иных видов топлива, A1B – сбалансированное использование всех видов топлива.

A2. Основная линия и сценарии этого семейства описывают весьма неоднородный мир. Регионы (и страны) ориентируются на свои силы, на сохранение местных особенностей. Темпы рождаемости в различных регионах сближаются очень медленно, что приводит к сохранению роста глобального народонаселения. Экономическое развитие будет в основном регионально ориентированным, а рост подушного дохода и технологические изменения будут более фрагментированными, чем для других семейств сценариев.

B1. Основная линия и сценарии этого семейства описывают такой же конвергирующий мир с такой же динамикой народонаселения, как и основная линия семейства A1. Однако при этом предполагаются быстрые изменения в экономической структуре в пользу обслуживающего и информационного компонентов при сокращении материалоемкости и при внедрении чистых и ресурсосберегающих технологий. Упор будет делаться на глобальные решения экономических и социальных проблем, на поддержание окружающей

среды в устойчивом состоянии, включая меры по улучшению положения в области равноправия (регионов, стран). При этом новых инициатив в области регулирования климата не предполагается.

B2. Основная линия и сценарии этого семейства описывают мир, в котором упор делается на локальные решения в области поддержания устойчивости экономики, социальной сферы и окружающей среды. Глобальное народонаселение будет неуклонно возрастать с темпом меньшим, чем для A2. Темп развития экономики будет средним. Изменения в технологиях будут более медленными и более разнообразными, чем для основных линий семейств B1 и A1. Хотя сценарии этого семейства также ориентированы на защиту окружающей среды и социальную справедливость, они ориентируются в этом отношении на региональные уровни.

Весь спектр разработанных сценариев схематически представлен на рис. 10. Термин (см. подпись к рисунку) «иллюстративный» (illustrative) не надо понимать как «искусственный». Напротив, иллюстративные сценарии выражают самую суть тех предположений, которые были сделаны при словесном описании основных «сюжетных линий» соответствующих семейств и групп сценариев. Четыре «иллюстративных маркерных» сценария наиболее широко использовались как в работе МГЭИК, так и в научных исследованиях этого круга вообще.

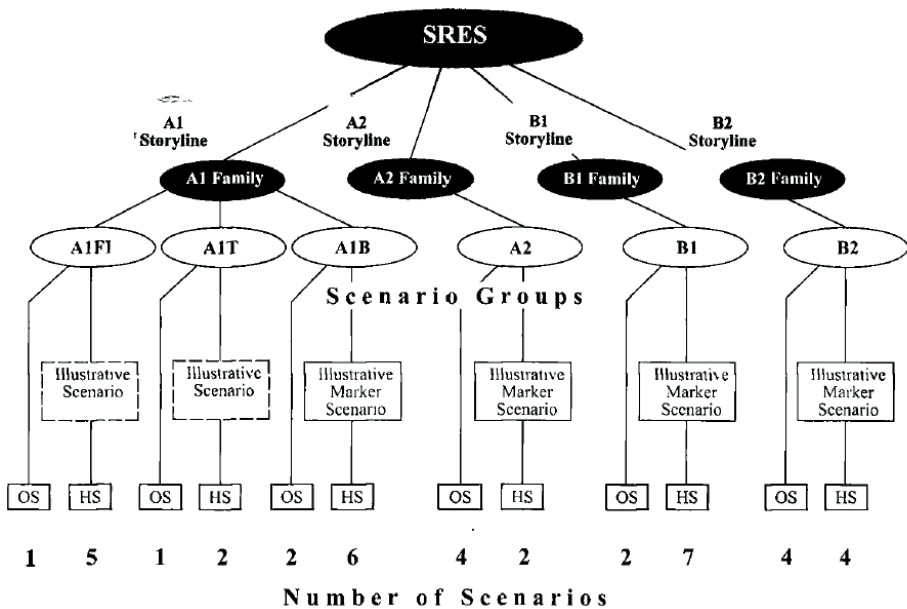


Рисунок 10. Схематическое изображение сценариев SRES

Figure 10. Schematic representation of SRES scenarios

Четырем сюжетным линиям (storyline) соответствуют четыре семейства сценариев A1, A2, B1 и B2. Весь набор сценариев состоит из шести сценарных групп (scenario groups); в семействах A2, B1, B2 есть лишь по одной группе, а в семействе A1 – три группы, характеризующие альтернативное развитие эне-

тических технологий (A1FI – интенсивное использование ископаемого органического топлива; A1B – сбалансированное использование различных видов топлива; A1T – использование преимущественно источников энергии, иных, чем ископаемое топливо). Внутри каждого семейства или группы некоторые сценарии используют гармонизированные, согласованные предположения о населении мира, валовом мировом продукте и конечном потреблении энергии. Они помечены как «HS» (harmonized scenarios); как «OS» обозначены сценарии, которые исследуют неопределенности, связанные с факторами, не рассмотренными в сценариях «HS». Внизу рисунка показано число сценариев, разработанных в каждой категории. Для каждой из шести групп сценариев построен иллюстративный сценарий (который всегда гармонизированный). Были также построены четыре иллюстративных маркерных сценария, по одному для каждого семейства сценариев. Также были построены два дополнительных иллюстративных сценария для групп A1FI и A1T.

На рис. 11 воспроизведен один из результатов доклада (IPCC, 2000) – эволюция эмиссий диоксида углерода CO_2 в 1990-2100 гг. для шести иллюстративных сценариев мирового социально-экономического развития.

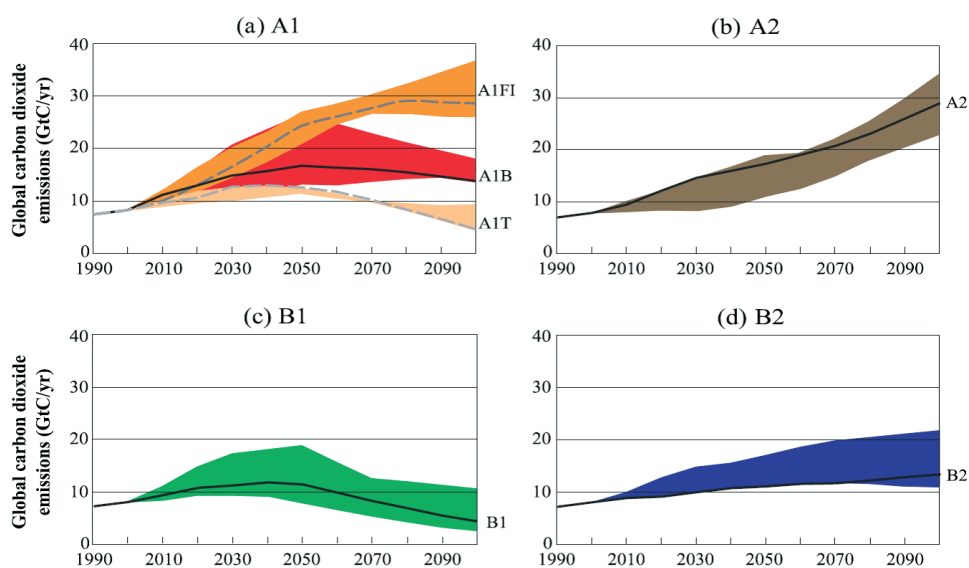


Рисунок 11. Суммарные годовые глобальные выбросы CO_2 из всех источников (энергетика, промышленность и изменения в землепользовании) с 1990 по 2100 год (Гт С год^{-1}) для семейств и групп сценариев

Figure 11. Total annual global CO_2 emissions from all sources (energy, industry and land use changes) from 1990 to 2100 (Gt C year^{-1}) for families and groups of scenarios

На рис. 11 представлены иллюстративные маркерные сценарии (A1, A2, B1, B2, сплошные линии) и два дополнительных иллюстративных сценария A1FI и A1T (пунктирные линии). Цветные полосы соответствуют диапазону соответствующих гармонизированных и негармонизированных сценариев; рисунок, соответствующий (IPCC, 2000, р. 9), заимствован из изданной отдельной брошюрой «Резюме для политиков».

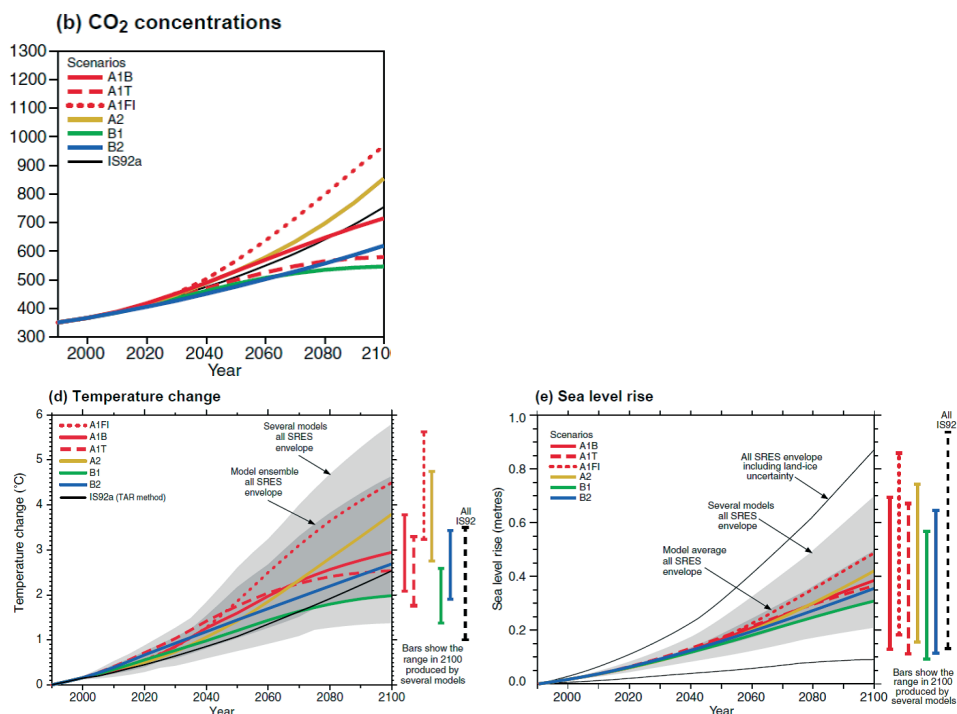


Рисунок 12. Результаты расчета изменения концентрации CO₂, температуры и уровня моря в 1990-2100 гг. для шести иллюстративных сценариев SRES и, для сравнения, для сценария IS92a (IPCC, 2001d)

Figure 12. The results of calculating the change in CO₂ concentration, temperature and sea level in 1990-2100 for six illustrative SRES scenarios and, for comparison, for the IS92a scenario (IPCC, 2001d)

На панелях (b), (d) и (e) для шести иллюстративных сценариев представлены соответственно изменения концентрации CO₂, глобальной средней температуры в приповерхностном слое и уровня моря. При этом при расчетах учитывались изменения концентраций всех рассматриваемых газов и аэрозолей. Расчеты проведены с помощью упрощенной модели, которая настраивалась на результаты моделирования с помощью нескольких сложных климатических моделей, обладающих различной чувствительностью климата. Эти несколько модификаций упрощенной модели обозначаются как «Several models». «All SRES envelope» означает совокупность 35 рассмотренных сценариев SRES. «Model average» или «Model ensemble» означают среднее из результатов модельных расчетов. Для уровня моря проводились также вычисления с учетом неопределенностей, связанных с ледниковыми покровами (land-ice uncertainties); (IPCC, 2001d, p. 160).

Обратим внимание на вертикальные отрезки, изображенные в правой части панелей (d) и (e) рис. 12. Они указывают на разброс значений температуры, который возникает при использовании одного и того же сценария эмиссий различными климатическими моделями. Разброс значителен, и его

происхождение – недостаток научной информации, порождающий значительные структурные недостатки и неопределенности значений коэффициентов климатических моделей.

Это лишь усилится в цикле Четвертого оценочного доклада МГЭИК (2002–2007 гг.). Так, на правой панели рис. 13 можно заметить, что ожидаемые диапазоны глобального потепления в целом соответствуют тем, что были получены в Третьем оценочном докладе, – см. рис. 12. Однако неопределенности и верхние границы для температуры несколько больше главным образом потому, что в более широкой совокупности использованных климатических моделей многие предполагали более сильную обратную связь между климатом и углеродным циклом. Ведь потепление снижает поглощение земными и океанскими системами атмосферного CO_2 , что приводит при сценарных расчетах к более высоким уровням диоксида углерода.

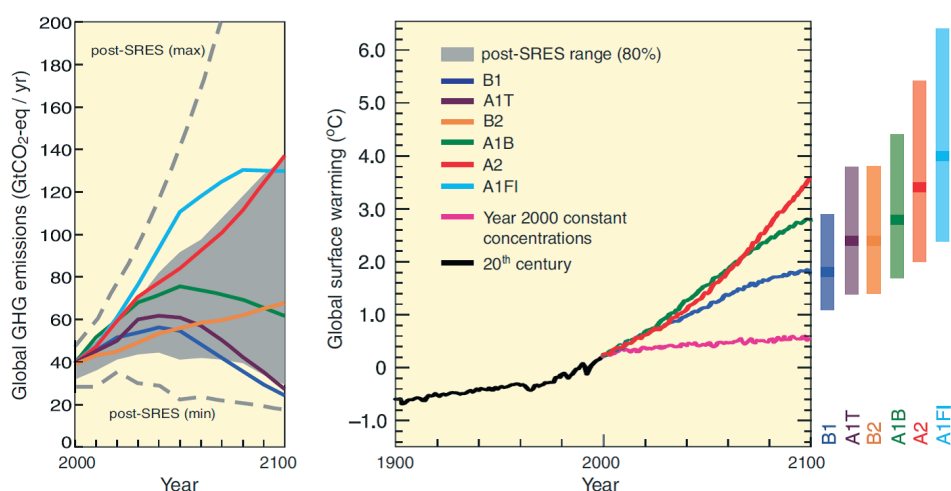


Рисунок 13. Левая панель: глобальные выбросы парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O и F-газы, в GtCO_2 -экв.) в отсутствие политики в области климата – шесть иллюстративных маркерных сценариев SRES (цветные линии) и диапазон 80-го перцентиля для совокупности сценариев, опубликованных после SRES (post-SRES, серая закрашенная область); правая панель: глобальная температура в приповерхностном слое (IPCC, 2007)

Figure 13. Left panel: global greenhouse gas emissions (CO_2 , CH_4 , N_2O and F-gases, in GtCO_2 -eq.) in the absence of climate policy – six illustrative marker scenarios SRES (colored lines) and the 80th percentile range for the set of scenarios published after SRES (post-SRES, gray shaded area); right panel: global temperature in the near-surface layer (IPCC, 2007)

Пунктирные линии на рис. 13 показывают полный спектр сценариев post-SRES. Правая панель: сплошные линии – глобальные мультимодельные средние для потепления в приповерхностном слое для сценариев A2, A1B и B1, показанные как продолжение результатов модельного расчета для XX века. Эти расчеты учитывают также эмиссии короткоживущих парниковых газов и аэрозолей. Розовая линия – результат расчета с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), в котором атмосферные концентрации поддерживаются постоянными на уровне 2000 года. Вертикальные отрезки в правой части рисунка указывают на наилучшие оценки (сплошная линия в каждом

столбце) и *вероятный*³⁾ диапазон. Оценки выполнены для шести маркерных сценариев SRES для 2090-2099 гг. Все значения температуры приведены относительно средних за период 1980-1999 гг. (IPCC, 2007, р. 7).

Сценарии RCP

В цикле Четвертого оценочного доклада МГЭИК (2002-2007 гг.) в самом докладе были использованы, в основном, сценарии эмиссий SRES. Однако к этому времени в специальной литературе появилось значительное число и иных сценариев. Рабочая группа III МГЭИК провела оценку научной литературы, посвященной базовым сценариям и сценариям стабилизации, опубликованной после выпуска Третьего оценочного доклада МГЭИК (2001 г.). Было выявлено около 150 таких сценариев. В начале работы над сценариями RCP (см. рис. 1) был проведен первичный отбор 30 наиболее всесторонних из них.

Для дальнейшей работы четыре типа RCP были определены с точки зрения уровней радиационного воздействия и концентраций радиационно-активных веществ, а также формы траектории концентраций – см. табл. 1.

Таблица 1. Типы репрезентативных траекторий концентраций – RCP (Moss et al., 2008, р. XIV)

Table 1. Types of representative concentration pathways – RCP (Moss et al., 2008, р. XIV)

Название	Радиационное воздействие	Концентрация	Форма
RCP8.5	Возрастание до 8.5 Вт/м ² в 2100 г.	Возрастание до ~1370 CO ₂ -экв. в 2100 г.	Возрастание
RCP6.0	Возрастание до ~6 Вт/м ² при стабилизации после 2100 г.	Возрастание до ~850 CO ₂ -экв. (при стабилизации после 2100 г.)	Стабилизация без временного превышения
RCP4.5	Возрастание до ~4.5 Вт/м ² при стабилизации после 2100 г.	Возрастание до ~650 CO ₂ -экв. (при стабилизации после 2100 г.)	Стабилизация без временного превышения
RCP3-PD	Возрастание до ~3 Вт/м ² до 2100 г. и затем убывание	Возрастание до ~490 CO ₂ -экв. до 2100г. и затем убывание	Достижение максимума и затем убывание

При формировании этой таблицы приблизительные уровни радиационного воздействия были определены как $\pm 5\%$ от заявленного уровня в Вт/м². Значения радиационного воздействия включают нетто-эффект всех антропогенных парниковых газов и других воздействующих факторов.

В ходе обсуждения экспертами для дальнейшей работы были выбраны четыре сценария, соответствующие требованиям, приведенным в табл. 1. Эти сценарии RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 и RCP3-PD были построены с использова-

³⁾ В терминологии МГЭИК «вероятно» соответствует доверительной вероятности «66% и выше» (Semenov, Insarov, Méndez, 2019).

нием следующих IAMs соответственно: MESSAGE (Riahi et al., 2007), AIM (Fujino et al., 2006), MiniCAM (Clarke et al., 2007), IMAGE (van Vuuren et al., 2006, 2007).

Обсуждение в среде экспертов также показало, что сценарии RCP2.6 и RCP2.9, построенные с помощью модели IMAGE, также представляют существенный интерес. Для них более выражены достижение пика – максимальной концентрации/радиационного воздействия – и последующий спад. Эти сценарии более соответствуют достижению глобальной температурной цели – неперевышения глобальной средней температурой уровня 2°C по отношению к доиндустриальным значениям.

Дальнейшая работа исследовательского сообщества над сценариями, в конечном счете, сконцентрировалась на сценариях RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 и RCP2.6, которые и были использованы в Пятом оценочном докладе МГЭИК, вышедшем в 2014/2015 гг. На рис. 14 представлены эти сценарии.

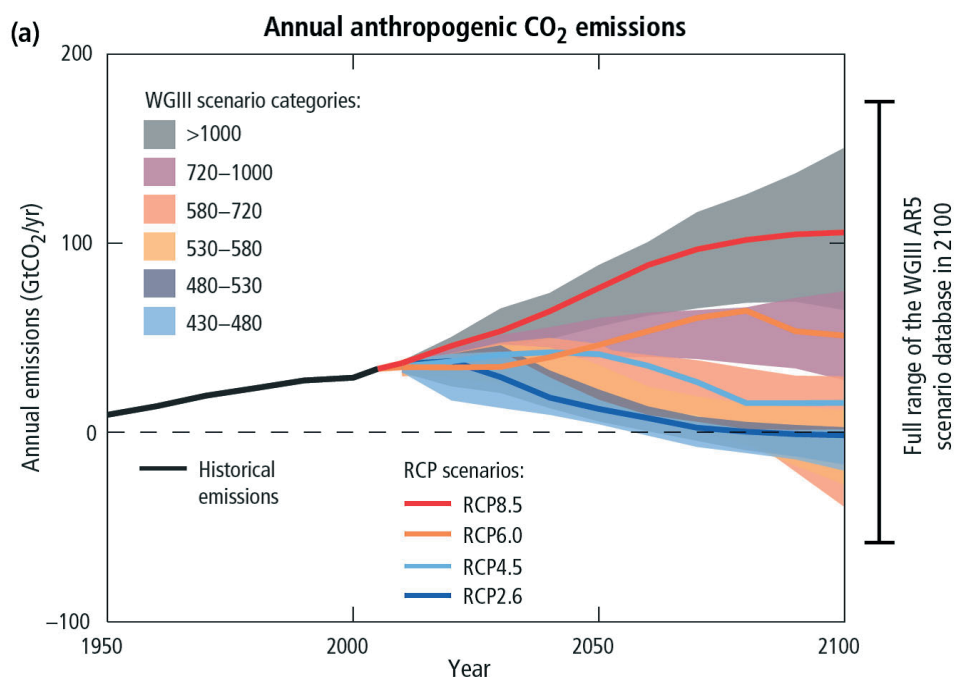


Рисунок 14. Глобальные антропогенные эмиссии диоксида углерода ($\text{ГтCO}_2 \text{ год}^{-1}$) в условиях сценариев RCP и исторические эмиссии – сплошные линии

Затумбованные области соответствуют диапазону 5-95% индивидуальных оценок, соответствующих опубликованным сценариям, объединенным Рабочей группой III МГЭИК в категории, маркированные диапазоном концентраций парниковых газов в ppm $\text{CO}_2\text{-экв.}$ в 2100 г. (IPCC, 2014, p. 9)

Figure 14. Global anthropogenic carbon dioxide emissions ($\text{GtCO}_2 \text{ year}^{-1}$) under RCP scenarios and historical emissions – solid lines

The shaded areas depict a range of 5-95% of individual estimates corresponding to the published scenarios combined by the Working Group III of IPCC in categories marked with a range of greenhouse gas concentrations in ppm $\text{CO}_2\text{-eq.}$ in 2100 (IPCC, 2014, p. 9)

На рис. 15 для примера изображены изменения глобальной средней температуры в приповерхностном слое и подъем уровня моря, соответствующие сценариям RCP8.5 и RCP2.6, а также средние значения этих переменных в последнее двадцатилетие XXI века для всех рассматриваемых сценариев.

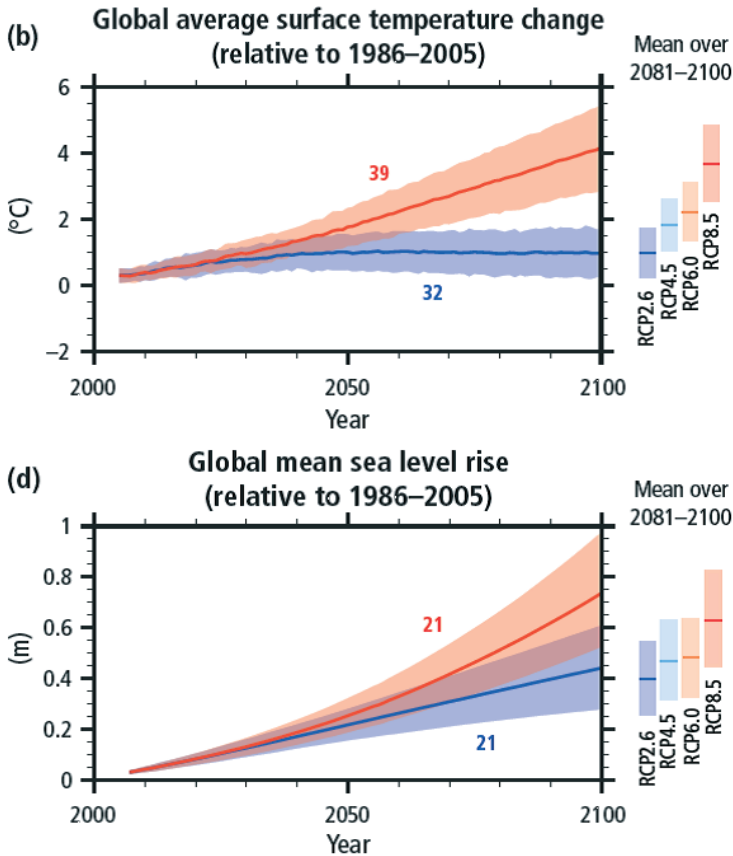


Рисунок 15. Изменение глобальной средней температуры (°C) в приповерхностном слое (b) и (d) подъем уровня моря (м) в 2006–2100 гг. по отношению к среднему значению за 1986–2005 гг. в условиях сценариев RCP2.6 и RCP8.5

Справа от оси ординат приведены средние значения за 2081–2100 гг. Сплошные линии соответствуют мультимодельным средним, а затумешиваемые области – разбросу 5–95% оценок индивидуальных моделей вокруг среднего значения (IPCC, 2014, p. 59)

Figure 15. Change in global mean temperature (°C) in the near-surface layer (b) and (d) sea level rise (m) in 2006–2100 relative to the average value for 1986–2005 under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios. The average values for 2081–2100 are shown to the right of the ordinate axis. Solid lines correspond to multi-model averages, and shaded areas correspond to a spread of 5–95% of individual model estimates around the average value (IPCC, 2014, p. 59)

Анализ сценариев RCP показал с высокой степенью уверенности (*high confidence*)⁴⁾, что в конце XXI века в условиях сценариев RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5 глобальное потепление превзойдет 1.5°C по отношению к доиндустриальным значениям 1850–1900 гг. Превышение уровня 2°C следует ожидать в

⁴⁾Характеризация неопределенностей в докладах МГЭИК представлена подробно в (Semenov, Insarov, Méndez, 2019).

условиях сценариев RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5 с уверенностью от *средней* (*medium confidence*) в первом случае до *высокой* (*high confidence*) в остальных.

Таким образом, сценарии RCP не давали возможности полноценно изучить весь диапазон возможного потепления в XXI веке, а именно, ту часть этого диапазона, которая соответствует достижению глобальных температурных целей – непревышения глобальной средней температурой в приповерхностном слое уровней 1.5°C и 2°C по отношению к доиндустриальным значениям. Поэтому специалистами была начата подготовка новой совокупности сценариев SSP (*shared socio-economic pathways*), которые были использованы МГЭИК в цикле Шестого оценочного доклада в 2015-2022 гг.

Сценарии SSP

Во вкладе Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад МГЭИК (IPCC, 2021a, p. 12) использовались пять иллюстративных сценариев SSP. Они маркируются символами SSP *x-y*. Здесь *x* = 1, ..., 5 указывает на номер группы сценариев. Группе соответствует «общий социально-экономический путь», *shared socio-economic pathway* – SSP. При этом в соответствии с принципами построения сценариев SSP объемы эмиссий при их реализации могут различаться вследствие различий в социально-экономических предположениях, мерах митигации (в данном контексте – целенаправленного сокращения эмиссий парниковых газов), а также мерах по ограничению выбросов аэрозолей и неметановых химических предшественников озона. В маркировке также присутствует число *y*, указывающее на радиационное воздействие в 2100 г. Траектории начинаются в 2015 г.

В рамках сценариев SSP3-7.0 и SSP5-8.5 эмиссии парниковых газов высоки и довольно интенсивно растут в течение XXI века.

Сценарию SSP2-4.5 соответствуют более умеренные выбросы парниковых газов, причем нетто-эмиссии CO₂ практически не растут до середины века.

Для сценариев SSP1-1.9 и SSP1-2.6 характерны очень низкие значения эмиссий парниковых газов, причем нетто-эмиссии CO₂ становятся нулевыми к 2050 г., а затем отрицательными (рис. 16).

Расчет соответствующих климатов (рис. 17) проведен с помощью моделей проекта CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*, phase 6; Проект взаимного сравнения сопряженных моделей, фаза 6), с использованием результатов моделирования потепления в прошлом, а также с использованием новой оценки чувствительности равновесного климата. Значения изменений *vs.* 1850-1900 гг. рассчитаны как средние для 20-летних периодов. Они получены прибавлением 0.85°C (повышение температуры с 1850-1900 до 1995-2014 гг.) к смоделированным изменениям относительно 1995-2014 гг. Диапазоны, соответствующие категории *весьма вероятно* (*very likely*)⁵⁾, показаны для SSP1-2.6 и SSP3-7.0 затушеванными областями (IPCC, 2021a, p. 22-23).

⁵⁾Т.е. с доверительной вероятностью не менее 0.9; характеристика неопределенностей в докладах МГЭИК представлена подробно в (Semenov, Insarov, Méndez, 2019).

Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios

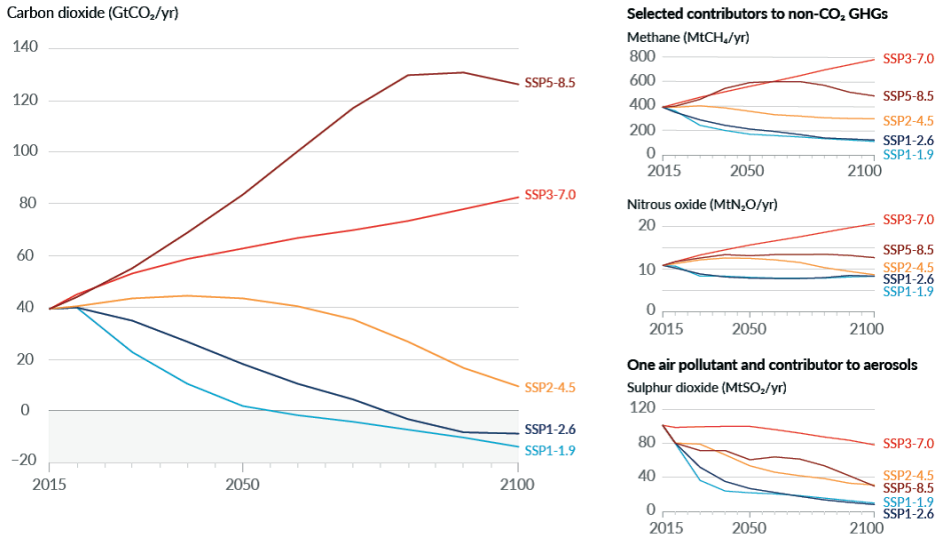


Рисунок 16. Будущие глобальные антропогенные годовые эмиссии диоксида углерода CO₂ (нетто-эмиссии), метана CH₄, закиси азота N₂O и диоксида серы SO₂ в рамках пяти иллюстративных сценариев: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 (IPCC, 2021a, p. 13)

Figure 16. Future global anthropogenic annual emissions of carbon dioxide CO₂ (net-emissions), methane CH₄, nitrous oxide N₂O and sulfur dioxide SO₂ under five illustrative scenarios: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 (IPCC, 2021a, p. 13)

(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900

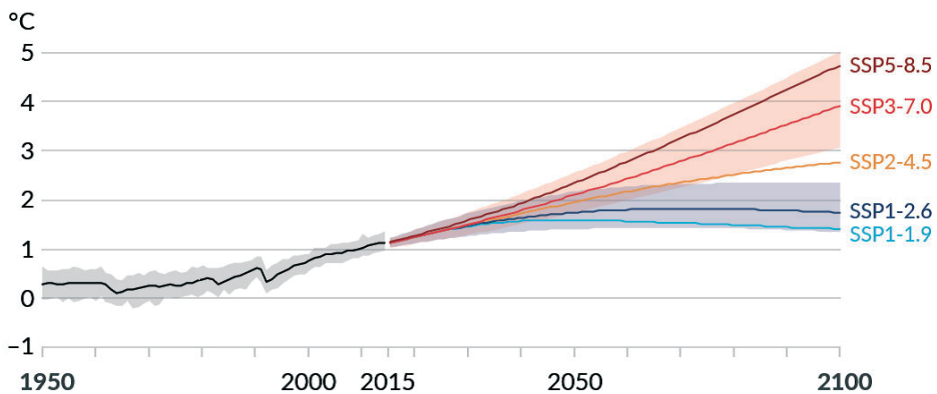


Рисунок 17. Изменения глобальной средней температуры в приповерхностном слое (°C) по сравнению с уровнем 1850-1900 гг.

Figure 17. Changes in the global average temperature in the near-surface layer (°C) compared to the level of 1850-1900

Как видно на рис. 17, только сценарии SSP1-1.9 и SSP1-2.6 оставляют некоторую возможность того, что температурные цели, декларированные Парижским соглашением – непревышение глобальной средней температурой уровней 1.5°C и 2°C над доиндустриальными значениями – могут быть достигнуты. Причем это потребует быстрого и очень существенного ограничения глобальной антропогенной нетто-эмиссии CO₂, ее выхода на нулевой, а затем и отрицательный уровень к середине XXI века, а также весьма существенного ограничения глобальных антропогенных эмиссий других парниковых газов.

Заключение

Известно, что существует предел предсказуемости при прогнозировании погоды. Это 7-10 суток. Далее оценки будущей погоды обладают столь значительной неопределенностью, что их практическое значение весьма ограничено.

Климат есть статистическая характеристика погоды за значительный промежуток времени – десятилетия. Это – средние значения метеорологических величин, их дисперсии, корреляции и т.д. Предсказания климата с помощью климатических моделей возможны на десятилетия вперед в том случае, когда внешние воздействия на климатическую систему известны. Правда, и в этом случае результат прогноза будет обладать некоторой неопределенностью из-за неполного знания коэффициентов уравнений, описывающих эволюцию климатической системы, а также вследствие естественной изменчивости моделируемых процессов.

Однако антропогенные воздействия на климатическую систему Земли, в том числе обогащение атмосферы радиационно-активными веществами (парниковыми газами, аэрозолями) и изменения в радиационных свойствах земной поверхности, нельзя предсказать на несколько десятилетий вперед. Ведь они зависят от пути мирового социально-экономического развития, который на таких временных горизонтах пока непредсказуем.

Поэтому в прикладных климатологических исследованиях используются сценарии. Сценарий, по существу, есть условный прогноз антропогенного воздействия на климатическую систему, который соответствует определенным предположениям о пути мирового социально-экономического развития. В научных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) сценарии использовались с самого начала ее работы – с 1990-х годов. В настоящее время в цикле Шестого оценочного доклада МГЭИК (2016-2022 гг.) используется новая совокупность сценариев SSPs – shared socio-economic pathways (общие социально-экономические пути развития). Они были разработаны не в рамках МГЭИК, а группами исследователей в крупных международных и национальных научных учреждениях. МГЭИК лишь катализировала эту работу. Для разработки этих сценариев использовались модели комплексной оценки, Integrated Assessment Models – IAMs. Климаты будущего, соответствующие этим сценариям антропогенного

воздействия на климатическую систему Земли, вычислялись с помощью сложных глобальных климатических моделей проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 6).

Разработчиками не приписывались какие-либо вероятности построенным сценариям. Поэтому построенные климаты будущего нельзя рассматривать в качестве прогнозных. Цель этого анализа – установить, какими могут быть характеристики климата на протяжении XXI века и далее в условиях, заложенных в сценарии путей мирового развития. Анализ показал, что добиться выполнения температурных целей, предусмотренных Парижским соглашением – непревышения глобальной средней температурой уровней 1.5°C и 2°C над доиндустриальными значениями, можно. Однако это требует весьма решительного сокращения глобальных антропогенных эмиссий парниковых газов в первую половину XXI века, а для CO₂ – выхода к 2050 г. на нулевые и, далее, отрицательные глобальные нетто-эмиссии. Целесообразно ли это – решать мировому сообществу, исходя из экономических и политических критериев, в рамках международного переговорного процесса по климату.

Данные расчетов параметров климата будущего, полученные с помощью глобальных климатических моделей с использованием сценариев SSP, доступны в сети ИНТЕРНЕТ (см., например, <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>). Они могут быть полезны для исследования изменений климата и их последствий на территории России, в частности, при разработке Третьего оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке со стороны следующих программ и проектов:

Темы 3.1. «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций» Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утвержденного приказом № 745 от 31.12.2019.

Темы «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009)".

Список литературы

Arora, V.K., Scinocca, J.F., Boer, G.J., Christian J.R., Denman, K.L., Flato, G.M., Kharin, V.V., Lee, W.G., Merryfield, W.J. (2011) Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L05805, doi:10.1029/2010GL046270.

Calvin, K., Bond-Lamberty, B., Clarke, L., Edmonds, J., Eom, J., Hartin, C., Kim, S., Kyle, P., Link, R., Moss, R., McJeon, H., Patel, P., Smith, S., Waldhoff, S., Wise, M. (2017) The SSP4: A world of deepening inequality, *Global Environ. Change*, vol. 42, pp. 284-296.

Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., Richels, R. (2007) *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, DC, 154 p.

Ebi, K.L., Hallegatte, S., Kram, T., Arnell, N.W., Carter, T.R., Edmonds, J.A., Kriegler, E., Mathur, R., O'Neill, B.C., Riahi, K., Winkler, H., van Vuuren, D.P., Zwickel, T. (2013) A new scenario framework for climate change research: background, process, and future directions, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-013-0912-3.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, no. 9, pp. 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.

Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D.L., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schoepp, W., Riahi, K. (2017) The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the XXI century, *Global Environ. Change*, vol. 42, pp. 251-267, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004>.

Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D.S., Dai, H., Hijioka, Y., Kainum, M. (2017) SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways, *Global Environ. Change*, vol. 42, pp. 268-283.

Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T., Matsuoka, Y. (2006) Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy, *The Energy Journal Special Issue*, pp. 343-354.

Gidden, M.J., Riahi, K., Smith, S.J., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., van Vuuren, D.P., van den Berg, M., Feng, L., Klein, K., Calvin, K., Doelman, J.C., Frank, S., Fricko, O., Harmsen, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Hilaire, J., Hoesly, R., Horing, J., Popp, A., Stehfest, E., Takahashi, K. (2019) Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, pp. 1443-1475, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>.

Girod, B., Arnim, W., Mieg, H., Hulme, M. (2009) The evolution of the IPCC's emissions scenarios, *Environ. Sci. Policy*, doi:10.1016/j.envsci.2008.12.006.

IPCC (1990a) *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment*, in Houghton, J.T.,

Jenkins, G.J., Ephraums, J.J., (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 366 p., <https://www.ipcc.ch/report/ar1/wg1>.

IPCC (1990b) *Emissions scenarios. The IPCC Response Strategies. (Bernthal F., Dowdeswell E., Luo J., Attard D., Vellinga P. Karimanzira R., and the Lead Contributors)*, 270 p., https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_III_full_report.pdf.

IPCC (1992) Climate Change 1992. *The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Report Prepared for IPCC by Working Group I*, in J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney (eds), Cambridge University Press, 1992.

IPCC (2000) *Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III (N. Nakićenović et al.)*, Cambridge University Press, 599 p.

IPCC (2001a) Climate Change 2001. *The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, in Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., et al., (eds.), Cambridge University Press, 881 p.

IPCC (2001b) *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., et al., (eds.), Cambridge University Press, 1032 p.

IPCC (2001c) *Climate Change 2001. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, in Metz B., Davidson O., Swart R. et al., (eds.), Cambridge University Press, 752 p.

IPCC, 2001 (2001d) *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 p.

IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.

IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC (2021a) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Păun, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K.

May-cock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 39 p.

IPCC (2021b) Annex VII: Glossary [Matthews J.B.R., Möller V., van Diemen R., Fuglestvedt J.S., Masson-Delmotte V., Méndez C., Semenov S., Reisinger A. (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), In Press.

Kattenberg, A., Giorgi, F., Grassl, H., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Tokioka, T., Weaver, A.J., Wigley, T.M.L. (1995) *Climate Models – Projections of Future Climate. In: Climate Change 1995. The Science of Climate Change*, (Edited by J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell). Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1995.

Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., Ebi, K.L., Kram, T., Riahi, K., Winkler, H., Vuuren, D.P.V. (2014) A new scenario frame work for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions, *Clim. Change*, vol. 122, pp. 401-414, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5>.

Kriegler, E., Bauer, N., Popp, A., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B. L., Hilaire, J., Klein, D., Mouratiadou, I., Weindl, I., Bertram, C., Dietrich, J.-P., Luderer, G., Pehl, M., Pietzcker, R., Piontek, F., Lotze-Campen, H., Biewald, A., Bonsch, M., Giannousakis, A., Kreidenweis, U., Müller, C., Rolinski, S., Schultes, A., Schwanitz, J., Stevanovic, M., Calvin, K., Emmerling, J., Fujimori, S., Edenhofer, O. (2017) Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century, *Global Environ. Change*, 42, pp. 297-315.

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Lin, E., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarqu, J.F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J.-P., Zurek, M. (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, 132 pp.

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson B.M. (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (Scenario MIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, no. 9, pp. 3461-3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R., Vuuren, D.P. (2013) v.: A new scenario frame work for climate change

research: the concept of shared socioeconomic pathways, *Clim. Change*, vol. 122, pp. 387-400, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>.

Riahi, K., Gruebler, A., Nakicenovic, N. (2007) Scenarios of long-term socioeconomic and environmental development under climate stabilization. Greenhouse Gases – Integrated Assessment. *Special Issue of Technological Forecasting and Social Change*, vol. 74(7), pp. 887-935, doi:10.1016/j.techfore.2006.05.026.

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M. (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emission implications: An overview, *Global Environ. Change*, vol. 42, pp. 153-168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

Semenov, S.M., Insarov, G.E., Méndez, C.L. (2019) Characterization of uncertainties in assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 103-119. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-2-103-119.

Van Vuuren, D.P., Eickhout, B., Lucas, P.L., den Elzen, M.G.J. (2006) Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing – Exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. Multigas Mitigation and Climate Policy. *The Energy Journal Special Issue*, no. 3, pp. 201-234.

Van Vuuren, D.P., den Elzen, M.G.J., Lucas, P.L., Eickhout, B., Strengers, B.J., van Ruijven, B., Wonink, S., van Houdt, R., (2007) Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs, *Climatic Change*, vol. 81, pp. 119-159.

Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., O'Neill, B.C., Ebi, K.L., Riahi, K., Carter, T.R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., Winkler, H. (2014) A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture, *Climatic Change*, 122:373-386, doi 10.1007/s10584-013-0906-1.

Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., Gernaat, D.E., Doelman, J.C., van den Berg, M., Harmsen, M., de Boer, H.S., Bouwman, L.F., Daioglou, V., Edelenbosch, O.Y., Girod, B., Kram, T., Lassaletta, L., Lucas, P.L., van Meijl, H., Müller, C., van Ruijven, B.J., van der Sluis, S., Tabeau, A. (2017) Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm, *Global Environ. Change*, vol. 42, pp. 237-250.

Статья поступила в редакцию (Received): 20.01.2022

Статья доработана после рецензирования (Revised): 07.02.2022

Принята к публикации (Accepted): 14.02.2022

Для цитирования / For citation:

Семенов, С.М., Гладильщикова, А.А. (2022) Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 75-106, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-75-106.

Semenov, S.M., Gladilshchikova, A.A. (2022) Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the XXI century, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 1, pp. 75-106, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-75-106.