

(Объединённая научная сессия Отделения физических наук, Отделения химии и наук о материалах, Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления и Отделения наук о Земле Российской академии наук, 19 января 2021 г.)

Интеграция климатической variability и глобального изменения климата в планирование использования возобновляемых источников энергии

Ф. Дробински, А. Танте

Обозначенная в Парижском соглашении траектория удержания глобального потепления на уровне ниже 2 °C диктует не только сроки, но и скорость, с которой должна меняться наша энергетическая система для декарбонизации производства энергии. Соблюдение Парижского соглашения требует снижения использования углерода в производстве энергии примерно на 75 % и, следовательно, быстрого перехода от добычи ископаемых энергоносителей к производству, основанному на низкоуглеродных технологиях. Среди таких технологий есть технологии, основанные на возобновляемых источниках энергии. Климатическая variability приводит к нестабильности источников возобновляемой энергии (солнечной, ветровой, морской), что является проблемой для баланса энергосистемы. В данном контексте говорить о переходе в энергетике означает столкнуться с проблемой продвижения на рынок низкоуглеродного производства энергии при одновременном ограничении последствий климатической variability для обеспечения социально-технической осуществимости и экономической жизнеспособности. Проблема не является простой, и необходимо чётко определить тонкий баланс между срочностью (резкое сокращение выбросов) и оптимальностью (выбор стратегии производства низкоуглеродной энергии, анализ возможностей и препятствий).

Ключевые слова: изменение климата, смягчение последствий изменения климата, энергетический переход, возобновляемые источники энергии, интеграция возобновляемых источников энергии

PACS numbers: 88.40. – j, 88.50. – k, 92.60.Ry

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039080>

Содержание

1. Изменение климата и смягчение его последствий (1191).
2. Пути перехода к низкоуглеродным технологиям производства электроэнергии (1196).
3. Изменчивость климата и интеграция возобновляемых источников энергии (1198).

- 3.1. Фазы и проблемы интеграции переменных возобновляемых источников энергии. 3.2. Детальное рассмотрение проблемы variability производства энергии из возобновляемых источников.
 4. Выводы и предстоящие задачи (1200).
- Список литературы (1201).

Ф. Дробински (*), А. Танте
Laboratoire de Météorologie Dynamique —
Institut Pierre Simon Laplace;
Ecole polytechnique — IP Paris,
ENS — PSL Université, Sorbonne Université,
CNRS, France
E-mail: (*) philippe.drobinski@lmd.ipsl.fr

Статья поступила 30 мая 2021 г.

1. Изменение климата и смягчение его последствий

Климат теплеет. На рисунке 1a (из работы [1]) показана временная эволюция температурной аномалии с доиндустриального уровня на основе трёх наборов наблюдений (чёрные, фиолетовые и зелёные линии). Независимо от тенденции к потеплению, вызванной деятельностью человека, климат демонстрирует сильную естественную изменчивость на многих масштабах, включая внутрисезонные и межгодовые масштабы. Действительно, кли-

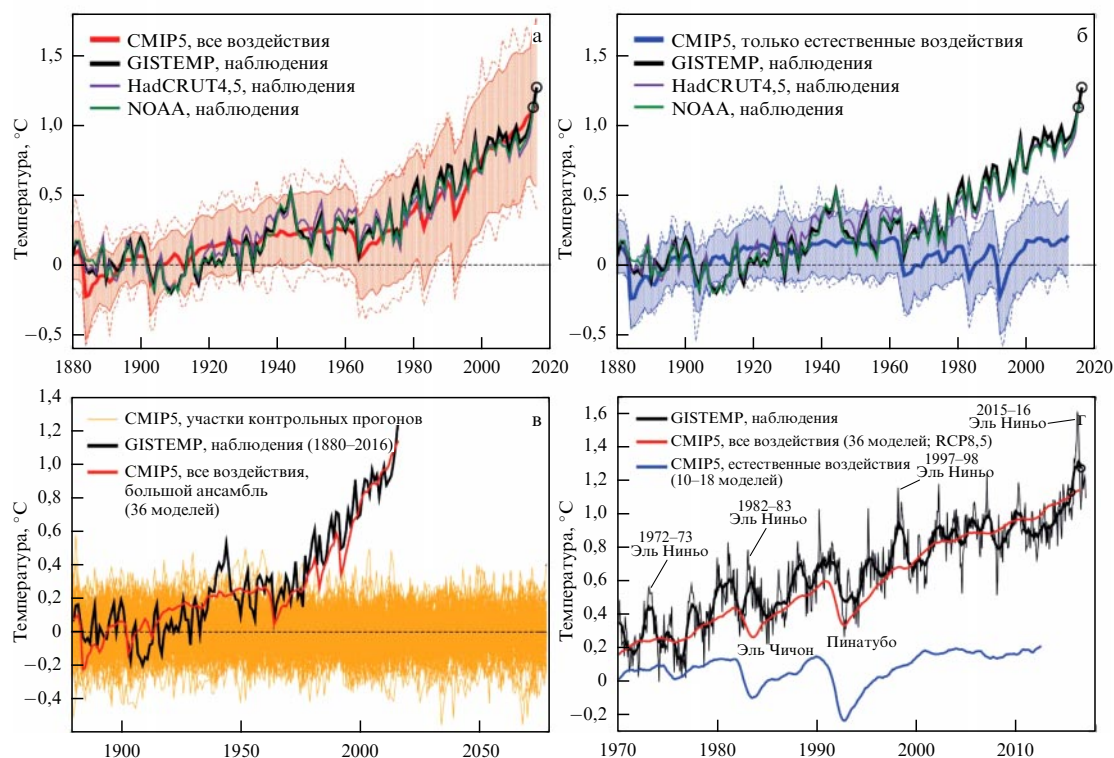


Рис. 1. (В цвете онлайн.) Наблюдаемые средне-глобальные температурные аномалии в сравнении с результатами моделирования по проекту Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) ($^{\circ}\text{C}$; эталонный период 1881–1920 гг.). (а) Среднее по большому ансамблю, включающему 36 средних из разных моделей, найденное по CMIP5 с учётом всех воздействий (антропогенных и естественных) (жирная красная кривая); ± 2 стандартных отклонения (красное затенение) и разброс минимум–максимум (красная штриховая линия) между годовыми средними для индивидуальных моделей; наблюдаемые аномалии GISTEMP (чёрная линия), HadCRUT4,5 (фиолетовая линия) и NOAA (зелёная линия). (б) То же, что на рис. а, но с учётом только естественных воздействий (18 моделей; синие кривые и затенение). (в) Наблюдаемые (GISTEMP; чёрная линия) и средние по большому ансамблю с учётом всех воздействий (красная линия) аномалии в сравнении с 200-летними участками 36 контрольных прогонов CMIP5 (оранжевая линия). (г) Аномалии скользящего среднего за 12 месяцев по наблюдениям GISTEMP (жирная чёрная линия; месячные аномалии показаны тонкой чёрной линией) и средние по большому ансамблю CMIP5 с учётом всех воздействий (красная линия) и только естественных воздействий (синяя линия). Наблюдаемые годовые средние GISTEMP (январь–декабрь) для 2015 и 2016 гг. на графиках (а), (б) и (г) выделены кружками. См. также дополнительные материалы в Интернете. Источник: [1].

мат — чрезвычайно сложная система, элементы которой (атмосфера, гидросфера, криосфера, геосфера, биосфера, включая человеческие сообщества) взаимодействуют между собой. Он развивается с течением времени под действием собственных внутренних динамических элементов и из-за внешних сил, таких как изменения земной орбиты, солнечная эволюция и её циклы, крупные извержения вулканов. Естественные колебания частично упорядочены во времени и пространстве. Они называются режимами изменчивости и включают, в частности, Южное колебание Эль-Ниньо (ENSO) (для обзора см., например, [2]) и Североатлантическое колебание (NAO) (для обзора см., например, [3]). На рисунке 1г наблюдаемые скачки температуры (чёрная линия) относятся к четырём крупным явлениям Эль-Ниньо и двум крупным вулканическим извержениям. Помимо естественной изменчивости, с 1980-х годов значительно усилилась тенденция, свидетельствующая о глобальном потеплении. Это вызвано антропогенными воздействиями, такими как изменение состава атмосферы (например, парниковый газ, аэрозоли) и изменения в землепользовании. В 2020 году климат потеплел примерно на $1,25^{\circ}\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным уровнем из-за антропогенных выбросов парниковых газов.

Действительно, с доиндустриального периода концентрация двуокиси углерода (CO_2) увеличилась примерно с 300 до 415 частей на миллион (ppm). До наступления индустриальной эры концентрация CO_2 колебалась от 180 до 300 частей на миллион, следуя циклу Миланковича, длившемуся около 100000 лет. Если мы рассмотрим проблему в геологических временных масштабах, то наша эпоха характеризуется добычей нефти — знакового топлива промышленно развитых стран, приближающейся к глобальному пику (в зависимости от её типа, обычного или нетрадиционного), в то же время климатическая система подвержена увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере, которое вызывает радиационное воздействие порядка 2 Вт м^{-2} по сравнению с доиндустриальным уровнем [4, 5].

Помимо наблюдений и теории, важное значение для установления связи происходящих изменений с деятельностью человека имеют моделирование процессов управления и историческое моделирование на основе системных моделей Земли (ESM). На рисунке 1 сравниваются наблюдаемые аномалии глобальной средней температуры для трёх наборов данных наблюдений с результатами исторического моделирования при помощи моделей CMIP5 с учётом комбинации антропогенных

Таблица 1. Оценки трендов и 90%-ных доверительных интервалов глобальной температуры, измеренной спутниковыми радиозондами и микроволновыми зондами, в нижней тропосфере (LT) (0–5 км), средней тропосфере (MT) (5–10 км) и нижней стратосфере (LS) (10–50 км). Источник: МГЭИК (2013) [8]

Набор данных	Тренды в °C за десять лет (1979–2012 гг.)		
	LT	MT	LS
HadAT2 [11]	0,162 ± 0,047	0,079 ± 0,057	–0,436 ± 0,204
RAOBCORE 1,5 [12]	0,139 ± 0,049	0,079 ± 0,054	–0,266 ± 0,227
RICH-obs [12]	0,158 ± 0,046	0,081 ± 0,052	–0,331 ± 0,241
RICH-tau [12]	0,160 ± 0,046	0,083 ± 0,052	–0,345 ± 0,238
RATAPAC [13]	0,128 ± 0,044	0,039 ± 0,057	–0,468 ± 0,225
UAH [14]	0,138 ± 0,043	0,043 ± 0,042	–0,372 ± 0,201
RSS [15, 16]	0,131 ± 0,045	0,079 ± 0,043	–0,268 ± 0,177
STAR [17]		0,123 ± 0,047	–0,320 ± 0,175

и естественных воздействий (рис. 1а) и с учётом только естественных воздействий (извержений вулканов, изменения солнечной радиации) (рис. 1б) [1]. Все временные ряды относятся к эталонному периоду 1901–1960 гг. Обнаружено, что наблюдения после примерно 1980 г., указывающие на заметное потепление, не согласуются с результатами моделирования при учёте только естественных воздействий, но согласуются с результатами моделирования с учётом комбинации антропогенных и естественных воздействий. Это означает, что потепление в основном связано с антропогенным воздействием, в соответствии с предыдущими исследованиями и оценками [6–10].

Другим наблюдаемым проявлением антропогенного происхождения глобального потепления из-за увеличения концентрации парниковых газов является повышение уровня мирового океана, а также сокращение площади морского льда. Охлаждение стратосферы, слоя атмосферы, который обычно простирается от 10 до 50 км и находится выше уровня эффективного излучения (высота которого около 6 км), также имеет антропогенное происхождение. Связанное с увеличением выброса парниковых газов в тропосфере (слое между поверхностью Земли и стратосферой), оно частично усилилось из-за истощения стратосферного озона между 1979 г. и серединой 1990-х гг. (табл. 1) [8]. Ключом к пониманию причин охлаждения стратосферы является тот факт, что большая часть парникового газа сосредоточена на малых высотах, в тропосфере, где он блокирует больше теплоты, уменьшая её поступление на большие высоты. В атмосфере есть уровень, называемый уровнем эффективного излучения с температурой эффективного излучения (около 252 К), расположенный в середине тропосферы на высоте примерно 6 км. Поскольку увеличение количества парниковых газов приводит к росту температурного градиента, температура будет "поворачиваться" вокруг этой фиксированной точки: атмосфера ниже этой точки нагреется, а выше — остынет. Однако такая температурная тенденция нарушается из-за противоположных эффектов восстановления стратосферного озона и увеличения содержания других парниковых газов [18].

Хотя не вызывает сомнений, что глобальное потепление будет продолжаться, если рост выброса парниковых газов не будет остановлен, будущий климат не является строго предсказуемым, поскольку траектория его развития в значительной степени будет зависеть от людей и действий, которые страны планеты предпримут для сокращения этих выбросов. Для выяснения возможных вариантов будущего развития ситуации были составлены

сценарии с использованием демографических и социально-экономических прогнозов, преобразованных в выбросы парниковых газов [19]. Принято рассматривать не один, а несколько сценариев. Были последовательно разработаны сценарии для отчётов Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) за 2001 и 2007 гг. Социально-экономические сценарии, сгруппированные в 4 семейства (A1, A2, B1 и B2), были пересчитаны в выбросы парниковых газов и аэрозолей, после чего результаты были использованы в качестве исходных данных для моделей, имитирующих климат будущего [20]. Сценарии A1 описывают мир будущего с очень быстрым экономическим ростом, глобальным населением, которое достигнет пика в середине столетия, после чего начнёт сокращаться, а также быстрым внедрением новых и более эффективных технологий. Семейство сценариев A2 описывает очень неоднородный мир. Основная идея — опора на собственные силы и сохранение местной самобытности. Семейство B1 описывает конвергентный мир с тем же самым глобальным населением, которое достигает пика в середине века и затем сокращается, как в сценариях A1, но с быстрыми изменениями экономических структур в сторону сервисной и информационной экономики, со снижением материалоёмкости и внедрением чистых и ресурсосберегающих технологий. Семейство сценариев B2 описывает мир, в котором упор делается на локальные решения проблем экономической, социальной и экологической устойчивости. Климатические сценарии, полученные в результате указанного моделирования, в свою очередь, использовались в моделях воздействий (например, на экосистемы или гидрологию), а затем, наконец, — в исследованиях социально-экономических воздействий изменений климата и адаптации к ним.

Подготовка пятого отчёта МГЭИК в 2013 г. была основана на параллельном подходе [21]. Рассматривались четыре траектории развития выбросов и концентраций парниковых газов, озона и аэрозолей, а также землепользования, получившие название репрезентативных траекторий концентрации (Representative Concentration Pathways, RCP) [19]. Четыре RCP-сценария эволюции концентраций парниковых газов были пересчитаны в радиационное воздействие, т.е. изменение радиационного баланса планеты. Радиационный баланс определяется разницей между полученным солнечным излучением и инфракрасным излучением, испускаемым планетой. Каждый RCP-сценарий соответствует различной эволюции этого воздействия на горизонте 2300 г. Чем выше значение радиационного воздействия, тем больше система Земля —

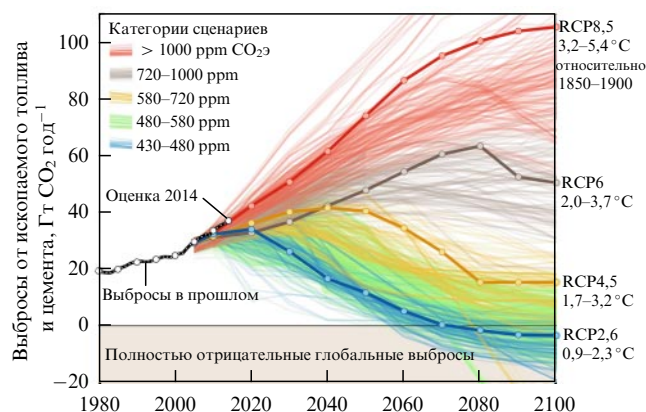


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Выбросы от использования ископаемого топлива и цемента ($\text{Гт CO}_2 \text{ год}^{-1}$) в виде репрезентативных траекторий концентрации (RCP) (линии). Показаны более 1000 сценариев IPPC из пятого оценочного доклада МГЭИК, которые обобщают широкий спектр опубликованных в научной литературе сценариев динамики выбросов и определены на основе уровней концентрации CO_2 (в ppm) в 2100 г. Оценка для 2014 г. показывает, что в настоящее время мы находимся на красной траектории RCP8,5. Источник: [22].

атмосфера накапливает энергии и нагревается. На рисунке 2 (из работы [22]) показаны выбросы парниковых газов от использования ископаемого топлива и цемента для четырёх сценариев RCP (жирные линии). Четыре сценария дают разброс радиационного воздействия от $2,6 \text{ Вт м}^{-2}$ до $8,5 \text{ Вт м}^{-2}$. На рисунке 2 показано, что в зависимости от сценария потепление в среднем может составлять от 1°C до более чем 5°C по сравнению с доиндустриальным периодом. Для этих эталонных сценариев были выполнены прогнозы климата с использованием RCP в качестве исходных данных. Параллельно сценарии выбросов (тонкие линии на рис. 2), разработанные на основе социально-экономических прогнозов, сравнивались со сценариями RCP.

Чтобы характеризовать эволюцию температуры атмосферы в ответ на заданное радиационное воздействие, традиционно используются два показателя: равновесная чувствительность климата (equilibrium climate sensitivity, ECS), которая определяется как повышение средней глобальной приземной температуры воздуха вследствие удвоения концентрации CO_2 в атмосфере, и переходная реакция климата (transient climate response, TCR), которая вводится для характеристики указанного отклика¹. Для оценки чувствительности климата и её неопределённости используются инструментальные данные, моделирование климата и палеоклиматические сведения [8, 23]. Измерения дают оценку для переходной реакции (TCR) примерно $1,3^\circ\text{C}$, а для равновесной чувствительности (ECS) — от $1,5$ до $2,0^\circ\text{C}$, что находится в нижней области прогнозов климатических моделей CMIP5, предсказывающих ECS от $2,1$ до $4,7^\circ\text{C}$ и TCR от $1,1$ до $2,6^\circ\text{C}$ [8]. Рисунок 3 иллюстрирует вариабельность оценок чувствительности климата по источникам данных [8].

¹ TCR — это изменение глобальной приземной температуры, усреднённое за период более 20 лет с центром в точке удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере; характеризует скорость реакции приземной температуры на воздействие парниковых газов. (Примеч. перев.)

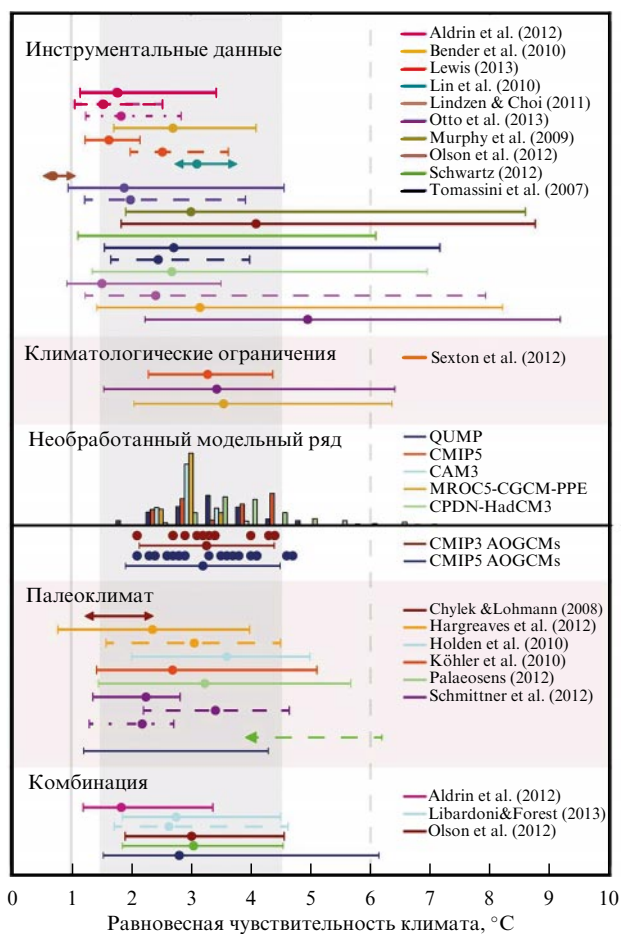


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Функции плотности вероятности, распределения и диапазоны для равновесной чувствительности климата. Серая затенённая область — вероятный диапазон от $1,5^\circ\text{C}$ до $4,5^\circ\text{C}$, серая сплошная линия — граница крайне маловероятных значений ниже 1°C , серая штриховая линия — граница весьма маловероятных значений выше 6°C . Источник: МГЭИК (2013) [8].

Влияние обратной связи за счёт облаков на чувствительность климата является наиболее неопределённым как для понимания, так и для измерения и моделирования. Однако есть и другие источники неопределённости. Во-первых, это быстрая обратная связь через содержание водяного пара, которое меняется с потеплением. Она связана с тем, что более тёплый воздух способен содержать больше влаги, как предсказывает закон Клаузиуса–Клапейрона [24]. Эволюция климата происходит при фиксированной относительной влажности и, следовательно, при увеличении абсолютной влажности. Во-вторых, быстрая обратная связь возникает из-за теплового градиента, который увеличивается в полярных регионах и уменьшается в тропиках. Наконец, есть медленные обратные связи, такие как изменение альбедо. Ледяные шапки и покрытые снегом поверхности имеют высокое альбедо, и если они сокращаются из-за глобального потепления, то более тёмные поверхности сильнее подвергаются воздействию солнечной радиации, что усиливает потепление. Наконец, глобальное потепление способствует таянию почв в районах вечной мерзлоты, в которых заключено 1700 Пг углерода, что почти вдвое превышает нынешнее количество углерода в атмосфере [25]. Неопределённость также связана с плохо изученным

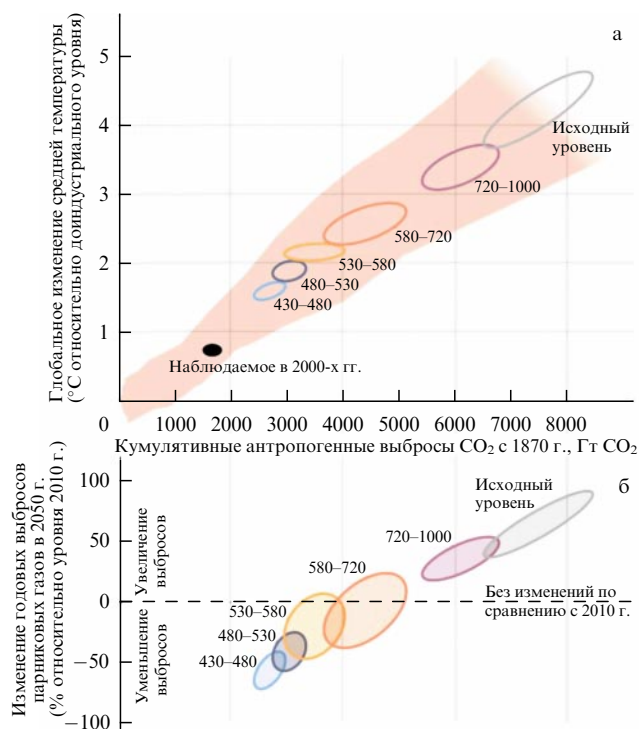


Рис. 4. (В цвете онлайн.) (а) Повышение средней глобальной приземной температуры при достижении глобальными выбросами CO_2 заданного кумулятивного значения в зависимости от этого значения по данным, полученным из нескольких источников. Цветная область показывает разброс прогнозов на прошлое и будущее, полученных с использованием различных моделей климата и углеродного цикла с учётом исторического ряда выбросов и четырёх RCP на весь период до 2100 г.; цвет исчезает по мере уменьшения количества доступных моделей. Эллипсы отображают соотношение между общим антропогенным потеплением в 2100 г. и совокупными выбросами CO_2 с 1870 по 2100 гг., полученное с помощью простой климатической модели (медианный отклик климата) в соответствии с категориями сценариев, используемых WG3. Что касается температуры, то малая ось эллипсов соответствует влиянию различных сценариев климатических факторов, отличных от CO_2 . Сплошной чёрный эллипс представляет выбросы, наблюдавшиеся до 2005 г., и температуры, наблюдавшиеся в течение десятилетия 2000–2009 гг., с соответствующими неопределённостями. (б) Связь между кумулятивными выбросами CO_2 по категориям сценариев и связанным с ними изменением годовых выбросов парниковых газов к 2050 г. по сравнению с 2010 г. Источник: МГЭИК (2013) [8].

охлаждением, вызванным аэрозолями [26]. По сравнению с CMIP5 большая часть моделей, задействованных в CMIP6, предсказывает значения, превышающие 5°C . Разница объясняется радиационными эффектами облаков, которые лучше учтены в этих моделях, но лежащий в основе физический механизм и, следовательно, степень реалистичности таких высоких значений чувствительности климата остаются неясными [27].

Необходимым условием для использования чувствительности климата при пересчёте реакции климатической системы на другое значение изменения CO_2 является пропорциональность изменения средней глобальной приземной температуры изменению количества CO_2 (линейность). Она показана на рис. 4а, который представляет изменение средней глобальной температуры как функцию концентрации CO_2 , накопленной с доиндустриальной эры [8]. Видна квазилинейная связь между двумя

переменными внутри затенённой области, ширина которой отражает неопределённость указанной связи между разными моделями CMIP5. Простота данного результата обманчива, поскольку здесь задействованы сильно нелинейные механизмы. Однако он отражает тот факт, что глобальное потепление почти линейно зависит от количества выделяемого углерода, а не от деталей конкретного сценария выбросов. Это связано с тем, что наиболее важным фактором глобального потепления является общее количество углерода, выброшенного с доиндустриальной эры, а не детализация уровня выбросов углерода в год. Например, несмотря на существенное сокращение выбросов CO_2 в 2020 г. из-за пандемии COVID-19 ($-6,4\%$ глобально с 2019 г.) [28, 29], ожидается лишь небольшое влияние пандемии COVID-19 на глобальные выбросы в 2030 г. и незначительное влияние в дальнейшем [30].

На рисунке 4б показано сокращение выбросов в период между 2010 и 2050 гг., необходимое для обеспечения совместимости со сценариями выбросов [8]. Рассмотрим предел "приемлемого" глобального потепления в 2°C , установленный в Копенгагене во время конференции COP15 в 2009 г. и находившийся в центре переговоров на COP21 в 2015 г., которые привели к Парижскому соглашению. Этот порог был частично мотивирован ссылкой на период в прошлом, когда такая средняя температура была достигнута с существующими, но ограниченными климатическими последствиями. Однако, поскольку эволюция климата не является линейной, нет уверенности в том, что за пределами глобального потепления на 2°C климат не выйдет из-под контроля в ответ на явления, всё ещё плохо поддающиеся оценке, такие как увеличение выбросов CO_2 и метана в атмосферу, вызванное таянием вечной мерзлоты или разрушением ледяных шапок Антарктики. Поэтому осторожность побуждает к соблюдению предела в 2°C , который не является абсолютным, но превышение которого увеличивает риск бифуркации с потенциально драматическими последствиями. Более того, в специальном отчёте МГЭИК о глобальном потеплении на $1,5^\circ\text{C}$ с большой уверенностью делается вывод о том, что «риски, связанные с климатом для природных и антропогенных систем, выше при глобальном потеплении на $1,5^\circ\text{C}$, чем в настоящее время, но ниже, чем при глобальном потеплении на 2°C » [31]. Таким образом, мотивация к ограничению глобального потепления величиной $1,5^\circ\text{C}$, а не 2°C , очень сильна, особенно для более уязвимых групп населения, таких как население островов. С учётом неопределённости кумулятивных выбросов CO_2 для каждого сценария представляется, что сценарии выбросов, позволяющие ограничить глобальное потепление до уровня менее 2°C в этом столетии, характеризуются сокращением глобальных выбросов парниковых газов на 40–70 % в 2050 г. по сравнению с 2010 г. Ожидается, что в 2100 г. эти уровни выбросов будут близки к нулю или ниже нуля.

Статья 2 Парижского соглашения [32] выражает обязательство сторон удерживать повышение средней глобальной температуры на уровне значительно ниже 2°C относительно доиндустриальных уровней и прилагать усилия по ограничению повышения температуры до $1,5^\circ\text{C}$ относительно доиндустриальных уровней, учитывая, что это значительно снизит риски и опасные последствия изменения климата. Для достижения долгосрочной цели по температуре, изложенной в статье 2, стороны стремятся в статье 4 как можно быстрее достичь глобального

максимума выбросов парниковых газов для последующего достижения баланса между источниками и поглотителями антропогенных выбросов во второй половине текущего века.

Чтобы сдерживать глобальное потепление на уровне ниже 2 °С, необходимо примерно на 50 % сократить выбросы CO₂ в период между 2010 и 2050 гг. (рис. 46) параллельно с сокращением выбросов других парниковых газов, таких как метан и окислы азота. Для анализа эволюции глобальных выбросов CO₂ в рамках политики смягчения последствий изменения климата можно применять уравнение Кайя, которое связывает антропогенные выбросы углекислого газа (CO₂) из-за использования энергии с демографическими, экономическими и энергетическими параметрами [33]. Общий уровень выбросов может быть выражен как произведение четырёх факторов: численности населения (POP), валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения (GDP/POP, где GDP — ВВП), энергоёмкости экономики (E/GDP, где E — потребление первичной энергии) и углеродного следа энергии (CO₂/E). Это уравнение используется для анализа или моделирования эволюции глобальных выбросов CO₂ в контексте технологической, рыночной и демографической политики по борьбе с глобальным потеплением. Заметим, что при подчёркивании роли содержания углерода в энергии и энергоэффективности возможность сокращения выбросов за счёт перехода к более разумному образу жизни, ведущему к сокращению потребления, скрыта в показателях ВВП на душу населения. Таким образом, приведённая ниже формулировка уравнения Кайя — один из инструментов рыночной экономики, в дополнение к которому могут использоваться другие меры повышения благосостояния:

$$\underbrace{\text{CO}_2}_{\text{Выбросы CO}_2} = \underbrace{\frac{\text{CO}_2}{E}}_{\text{Углеродный след энергии}} \times \underbrace{\frac{E}{\text{GDP}}}_{\text{Энергоёмкость экономики}} \times \underbrace{\frac{\text{GDP}}{\text{POP}}}_{\text{ВВП на душу населения}} \times \underbrace{\text{POP}}_{\text{Численность населения}}. \quad (1)$$

Чтобы сократить примерно на 50 % глобальные выбросы CO₂ от энергопотребления в период с 2010 до 2050 гг. с учётом прироста численности мирового населения на +35 % [34], среднегодового роста мирового ВВП на 3 % [35] и снижения энергоёмкости мировой экономики примерно на 10 % за десятилетие [36], углеродный след энергии необходимо снизить на 75 % за 40 лет. Поскольку результат зависит от успеха мер по снижению энергоёмкости и от декарбонизации неэнергетических видов деятельности, таких как землепользование, приведённое значение отражает масштаб проблемы, которую необходимо решить для осуществления энергетического перехода. Это означает радикальный переход к безуглеродному производству энергии, а также разделение бремени сокращения между другими членами уравнения Кайя. Если взять в качестве примера Западную Европу, то выбросы CO₂ связаны с тремя различными секторами экономики: производство электроэнергии, транспорт и отопление зданий. Большая часть того, что обсуждается ниже, касается производства электроэнергии — области, с которой, вероятно, связаны самые высокие ожидания и в которой уже происходят масштабные преобразования. Проблемным, однако, остаётся транспорт, поскольку существует не так много технологических решений для сокращения выбросов парниковых газов.

2. Пути перехода к низкоуглеродным технологиям производства электроэнергии

Как обсуждалось в разделе 1, политику сокращения выбросов, связанных с производством электроэнергии, можно разделить на три категории: сокращение углеродоёмкости, повышение энергоэффективности и сокращение потребления. В следующих разделах мы решили сосредоточиться на первой из них, потому что именно здесь можно многому научиться у метеорологии и наук о климате. В нашем решении отражены скорее предметные предпочтения, чем политический выбор.

Чтобы понять суть проблемы, важно помнить об углеродном следе производства энергии. В таблице 2 показан углеродный след систем энергоснабжения из пятого оценочного отчёта [37]. Он имеет более низкие значения для технологий, основанных на ископаемом топливе, чем в специальном отчёте МГЭИК о возобновляемых источниках энергии и смягчении последствий изменения климата [36], поскольку анализируются более современные технологии (например, распыление угля). Значения выражены в граммах CO₂э на киловатт-час (CO₂э, или CO₂-эквивалент, — мера совокупного выброса различных парниковых газов в течение эталонного времени 100 лет с учётом времени жизни этих газов в атмосфере и их относительной эффективности в поглощении испускаемого Землёй вторичного инфракрасного излучения). Низкоуглеродные технологии имеют гораздо меньший углеродный след, чем технологии, основанные на ископаемом топливе. Например, фотоэлектрические технологии дают в среднем почти в десять раз меньше выбросов, чем природный газ. Среди так называемых низкоуглеродных технологий ядерную энергию принято отличать от возобновляемых источников энергии, поскольку топливо, используемое в ядерной энергетике, не является возобновляемым.

Несмотря на неотложность перехода от экономики, основанной на ископаемом топливе, к экономике с нулевым выбросом углерода, очевидно, что при существующем энергопотреблении технологии, которые должны заменить применение ископаемого топлива, не полностью применимы в глобальном масштабе. Управляемый термоядерный синтез недоступен и неясно, будет ли реализован вообще. Использование обычного ядерного деления, включая реакторы четвёртого поколения с оптимизацией топливных циклов, встречает препятствия и трудности [38], но частично решает проблему, хотя, возможно, оно не станет выбором народов, так как главной проблемой остаются отработанные радиоактивные отходы, накопление которых может продолжаться более чем цивилизационную эпоху [39]. Плотины по всему миру производят много электроэнергии, но большая часть ресурса уже эксплуатируется [40], и их влияние на биосферу значительно [41]. Количество биомассы сильно ограничено скоростью возобновления лесов, поэтому её вряд ли можно считать углеродно-нейтральным источником [42]. Водород — всего лишь энергетический вектор, воздействие которого зависит от первичного источника энергии. Наконец, необходимо отметить впечатляющий прогресс в использовании энергии ветра и солнца с экспоненциальным снижением затрат, высокими темпами внедрения и роста производства электроэнергии [43]. Тем не менее бизнес-модель ветровой и солнечной энергетики по-прежнему зависит от благоприятной налоговой поли-

Таблица 2. CO₂-эквивалент полного цикла производства энергии по некоторым технологиям. Данные расположены в порядке убывания медианного значения (г CO₂ на кВт ч). Значения охватывают весь цикл производства энергии: материал, добычу топлива, строительство, собственно производство, утилизацию отходов. Повышение эффективности и результирующее сокращение CO₂ в период после публикации использованных данных не учтено. CCS (carbon capture and sequestration) — технология улавливания и связывания углерода. Источник: МГЭИК (2014) [37]

Технология	Мин.	Средн.	Макс.
Технологии, коммерчески доступные в настоящее время			
Уголь — распылённый уголь	740	820	910
Биомасса — сжигание вместе с углём	620	740	890
Газ — комбинированный цикл	410	490	650
Биомасса — специально предназначенная	130	230	420
Большие солнечные фотоэлектрические станции	18	48	180
Солнечные батареи на крышах	26	41	60
Геотермальные источники	6,0	38	79
Гелиоконцентраторы	8,8	27	63
Гидроэлектростанции	1,0	24	2200
Морские ветряные станции	8,0	12	35
АЭС	3,7	12	110
Наземные ветряные станции	7,0	11	56
Технологии на стадии внедрения			
CCS — уголь — распылённый уголь	190	220	250
CCS — уголь — комбинированный цикл газификации	170	200	230
CCS — газ — комбинированный цикл	94	170	340
CCS — уголь — сжигание в кислороде	100	160	200
Океан (приливы и волны)	5,6	17	28

тики или сложных субвенций. Здесь также имеются ограничения, для преодоления которых необходимы исследования. Среди этих ограничений — вариабельность и перемежаемость [44]. Действительно, при рассмотрении производства энергии основной проблемой является вариабельность коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), определяющего, как часто электростанция работает с установленной мощностью. В США в 2016 г. ядерная энергетика имела самый высокий КИУМ среди всех источников энергии (92 %). Это вдвое больше, чем у угольных (48 %) или газовых (57 %) электростанций и почти в 3 раза выше, чем у ветряных (35 %) и солнечных (25 %) [45]. В то время как у традиционных технологий КИУМ зависит от энергетических рынков, а также от ограничений, связанных с эксплуатацией и техническим обслуживанием, КИУМ ветровых и солнечных технологий в основном определяется изменениями метеорологических условий. В силу этих причин средний коэффициент использования установленной мощности получается намного ниже 100 %, а его дисперсия становится большой. Изменчивость и непостоянство возобновляемых источников энергии являются серьёзной проблемой для их массового внедрения и интеграции в сети [46].

Буфером для защиты от краткосрочных колебаний выработки из возобновляемых источников служат системы хранения энергии. Например, по сравнению с фотоэлектрическими солнечными электростанциями солнечные концентраторы включают в свой состав аккумуляторы тепла, удваивающие КИУМ [45]. Таким образом, использование буферизованных возобновляемых источников с системами хранения энергии — один из путей, который необходимо исследовать как с технологической, так и с экономической точки зрения [47]. Однако проблема хранения электроэнергии не может быть решена только с помощью батарей, даже если забыть о необходимости огромного их количества. Одна из причин этого — сильно различающиеся временные масштабы, требуе-

мые для хранения электричества, от часа до года, а другая — опасения, связанные с возможностями вторичной переработки батарей. Кроме того, по сравнению с классическими (ископаемыми и ядерными) источниками энергии на 1 кВт ч электроэнергии, произведённой из энергии солнца и ветра, требуется гораздо больше стали и бетона (только ветер), редких металлов, таких как медь или серебро (только солнечная энергия), не говоря уже о редкоземельных элементах для ветряных турбин [48]. Наконец, площадь, необходимая для выработки 1 кВт ч, также на несколько порядков больше по сравнению с используемой в классических методах производства электроэнергии [49]. Это вызывает беспокойство, поскольку известно, что изменение землепользования является одной из основных причин утраты биологического разнообразия [50].

Риски связаны также с влиянием изменения климата на возобновляемые источники энергии и самим низкоуглеродным энергоснабжением [51]. В настоящее время гидроэнергетика и тепловые станции вместе обеспечивают 98 % мирового производства электроэнергии [52]. Указанные технологии производства электроэнергии сильно зависят от наличия воды, причём температура воды для охлаждения также играет важную роль для выработки термоэлектрической энергии. Поэтому изменение климата и связанные с этим изменения в водных ресурсах повлияют на производство электроэнергии, в то время как потребности в энергии продолжают расти по мере экономического развития и роста населения. Во всём мире в период 2040–2069 гг. прогнозируется сокращение полезной мощности 61–74 % гидроэлектростанций и 81–86 % теплоэлектростанций [53]. Спрос на энергию для отопления и охлаждения зданий также меняется с глобальным потеплением. Во всех континентальных регионах тенденции спроса на энергию для отопления и охлаждения были слабыми (менее 10 %) с 1941–1960 по 1981–2000 гг. и усилились (более 10 %) с 1981–2000 по 2021–2040 гг. Тенденции к увеличению спроса на энер-

гию для охлаждения более выражены, чем тенденции к снижению для отопления [54]. Однако количественная оценка воздействия глобального потепления на будущий спрос на энергию всё ещё весьма неопределённая, а она является ключом к точному энергетическому планированию. Что касается энергии ветра и солнца, воздействие должно быть минимальным, если глобальное потепление не превысит 2 °C (потери менее 5 %), однако за пределами 2 °C быстрое ухудшение в некоторых регионах может быть значительным [55].

3. Изменчивость климата и интеграция возобновляемых источников энергии

3.1. Фазы и проблемы интеграции переменных возобновляемых источников энергии

Ряд стран устанавливает целевые показатели использования возобновляемых источников энергии для своего электроснабжения по причинам, включающим ограничение углеродного следа. Поскольку солнечная энергия и ветер имеют тенденцию быть более изменчивыми и неопределёнными, чем традиционные источники, достижение указанных целей требует изменений в планировании и эксплуатации энергосистем. Интеграция энергосистемы — это практика разработки эффективных способов доставки переменной возобновляемой энергии в сеть. Надёжные методы интеграции максимизируют рентабельность включения возобновляемых источников энергии в энергосистему при сохранении или повышении её стабильности и надёжности. Интеграция в сеть охватывает множество вопросов, включая [56 – 58]

- новое производство возобновляемой энергии;
- новые способы передачи энергии;
- повышенную гибкость системы;
- планирование будущего с высоким уровнем использования возобновляемых источников энергии.

Увеличить переменную часть производимой энергии в сети непросто. Адаптацию сети к интеграции возобновляемых источников энергии можно грубо разделить на шесть этапов в зависимости от доли переменного производства энергии в сети [59]. На этапе 1 низкий уровень внедрения возобновляемых источников энергии не создаёт проблем для сети. На этапе 2 обычных систем управления, таких как существующие в тепло- и гидроэнергетике, достаточно для интеграции переменных источников энергии без необходимости преобразования самой сети. Начиная с этапа 3 необходимы инвестиции в преобразование сети, чтобы сделать её более умной и гибкой для управления балансом спроса и предложения при гораздо более высокой вариабельности спроса на энергию. Гибкость означает усиление возможностей хранения энергии, исключение или сокращение потребления. Она также достигается за счёт массового сбора данных о производстве и потреблении энергии и обработки этих данных более сложной системой управления энергопотреблением в режиме реального времени. Две другие фазы (фазы 5 и 6) — необходимые шаги на пути к стопроцентному использованию возобновляемых источников энергии. Фаза 5 подразумевает появление структурных излишков и актуальность электрификации других секторов. Фаза 6 предполагает преодоление периодов сезонного дефицита и поставку приложений, не связанных с электричеством, а также появление синтетического

топлива. Ресурсы гибкости могут смягчить проблемы, связанные с интеграцией возобновляемых источников энергии на разных этапах, и позволят системе интегрировать больше возобновляемых источников энергии.

Основные проблемы, связанные с интеграцией высокой доли фотоэлектрической и ветровой энергии в энергетические системы, связаны с изменчивым, неопределённым и зависящим от местоположения характером производства возобновляемой энергии и необходимостью постоянно поддерживать баланс спроса и предложения. Это приводит к "интеграционным затратам" или к дополнительным системным затратам, которые не отражаются маргинальной стоимостью возобновляемых источников энергии [60]. Для систем, которые исторически рассчитаны, чтобы противостоять только изменчивости спроса, вариабельность производства возобновляемой энергии может привести к локальному дефициту электроэнергии из-за низкого кредита мощности возобновляемых источников энергии или, напротив, к увеличению перегрузок при передаче и перепроизводству энергии, ведущему к сокращению спроса. Сегодня краткосрочные проблемы балансирования могут быть частично сглажены точными прогнозами спроса и предложения энергии на различных временных горизонтах [61 – 65] и должны всегда компенсироваться за счёт дополнительных услуг в широком диапазоне частот [66, 67], например, за счёт повышенной гибкости традиционных систем генерации, таких как угольные электростанции или газовые турбины с комбинированным циклом [68, 69]. Можно использовать также компенсацию за переменное энергоснабжение через механизмы ответа на запрос [70]. С другой стороны, повышенная вариабельность приводит к более высокой нестабильности цен наряду со снижением оптовых цен. В долгосрочной перспективе падение цен, связанное с низкой маргинальной стоимостью возобновляемых источников энергии, может "подорвать" прибыль как возобновляемых, так и традиционных производителей, вытесняя последних с рынка. Последние, однако, необходимы для сглаживания колебаний выработки возобновляемой энергии и обеспечения стабильности системы, если не основанные на ископаемых источниках гибкие решения возьмут верх. Таким образом, возможности для будущего широкомасштабного внедрения возобновляемых источников энергии всё ещё остаются спорными [71 – 73].

3.2. Детальное рассмотрение проблемы вариабельности производства энергии из возобновляемых источников

Чтобы оценить потребности и жизнеспособность решений, в ряде исследований анализируется изменчивость производства возобновляемой энергии для различных временных и пространственных масштабов, местоположений и возобновляемых источников энергии [74, 75]. Проиллюстрируем роль, которую играет изменчивость производства энергии из возобновляемых источников, с помощью следующего подхода к анализу среднего отклонения. Введём понятие риска, связанного с изменчивостью таких показателей, как объём производства возобновляемой энергии, затраты на производство или цены на электроэнергию. Преимущество такого упрощённого подхода заключается в том, что он позволяет проводить перспективные исследования чувствительности инвестиций, избегая при этом моделирования традиционной задачи планирования [76]. Обратной стороной

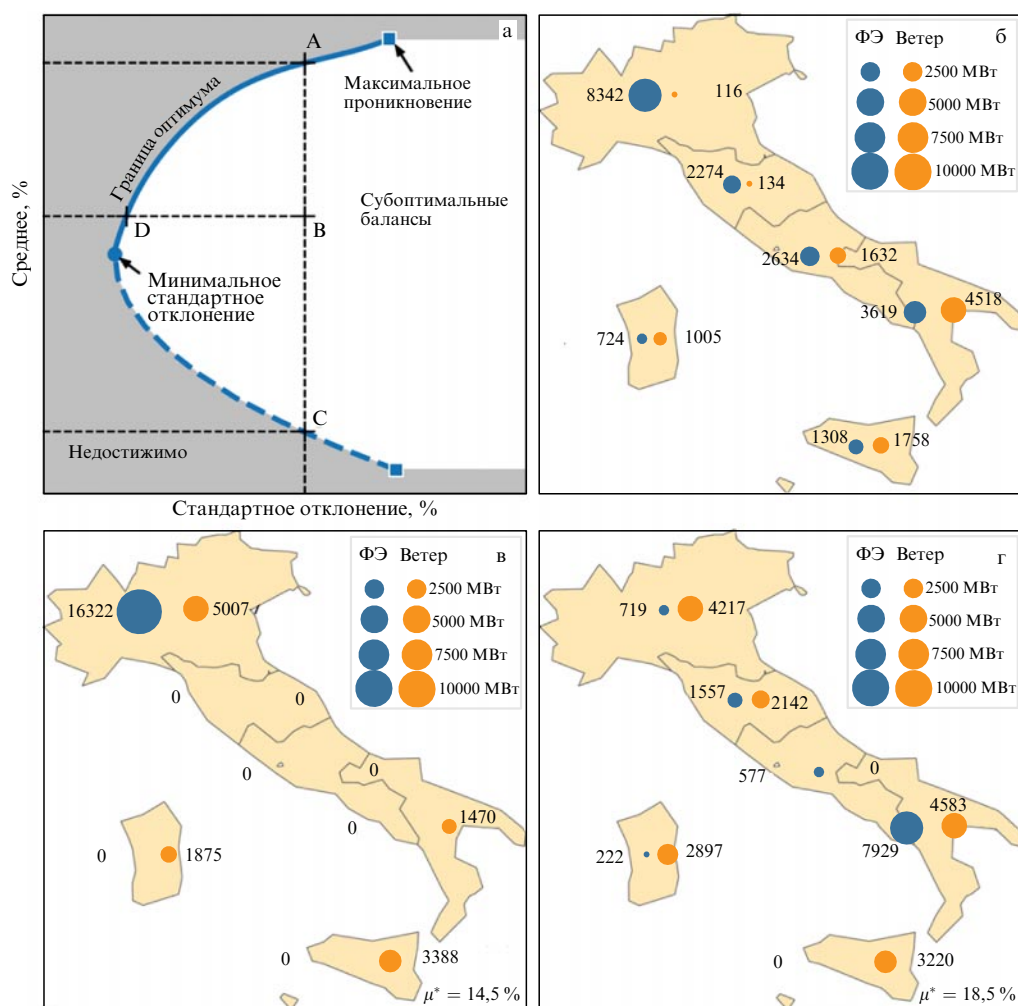


Рис. 5. (В цвете онлайн.) (а) Пример оптимальной границы для задачи оптимизации средней дисперсии (сплошная синяя линия). Снизу она ограничена оптимальным балансом, соответствующим минимальной дисперсии (синяя точка), ниже которого дисперсия может только увеличиваться. Сверху она ограничена оптимальным балансом, соответствующим максимальному проникновению на рынок, балансы с более высоким проникновением нереализуемы из-за ограничений задачи. Точка В является примером субоптимального баланса, поскольку более высокое среднее проникновение достигается при той же дисперсии (точка А), а более низкая дисперсия достигается для того же среднего проникновения (точка D). Штриховая синяя линия получена путём минимизации дисперсии для диапазона целевых средних значений проникновения на рынок. Эти решения не являются оптимальными по Парето, поскольку точка С даёт такую же дисперсию, что и точка А, но обеспечивает более низкое среднее проникновение на рынок. Таким образом, А "доминирует" над С. (б) Установленная мощность ветровых (оранжевые круги) и фотоэлектрических (синие круги) электростанций в 2015 г. в Италии. (в) Сценарий минимального стандартного отклонения от E4Clim. (г) Сценарий высокого проникновения на рынок от E4Clim. (По материалам [76].)

является сложность установления связи между стоимостью системы и оптимизированным энергетическим балансом. Тем не менее данный подход помогает подчеркнуть влияние изменчивости возобновляемых источников энергии на оптимальный энергетический баланс. Текущий энергетический баланс Италии 2015 г. (рис. 5б), соответствующий европейской директиве 2020 г. и рассчитанный на 6 лет вперёд, пересматривается. Необходимо преследовать две цели. Первая направлена на максимизацию среднего проникновения на рынок (отношения среднего производства к среднему спросу) переменных возобновляемых источников как одного из путей сокращения углеродного следа при производстве энергии. Вторая цель — минимизировать изменчивость проникновения, чтобы предотвратить дисбаланс в сети и минимизировать затраты, связанные с вводом в эксплуатацию включаемых по требованию систем производства энергии, таких как тепловые электростанции. Кроме

того, при рассмотрении возврата к существующему балансу добавляется ограничение на общую мощность (или, альтернативно, на общие переменные затраты на возобновляемую энергию). Результатом является набор оптимальных по Парето энергетических балансов для возобновляемых источников, который можно представить в виде двумерной диаграммы среднего отклонения.

Пример приведён на рис. 5а для Италии [76]. Точки ниже или справа от границы по определению неоптимальны. Район выше или слева от границы недоступен. Граница показывает, что существует компромисс между максимальным проникновением возобновляемой энергии на рынок и минимизацией дисперсии производства возобновляемой энергии. Чем более дисперсия возобновляемой энергии проблематична для энергетической системы, тем больший вес следует придавать задаче минимизации дисперсии, таким образом ограничивая проникновение на рынок переменной возобновляемой энер-

гии. В зависимости от веса дисперсии получаемые в результате вариативные балансы возобновляемых источников энергии сильно различаются. Это иллюстрируется двумя оптимальными балансами, представленными на рис. 5в и 5г. Первый из них — оптимальный баланс, при котором больший вес придаётся дисперсии, что способствует развитию технологий в регионах, для которых КИУМ меняется мало. Второй увеличивает проникновение и делает упор на технологии и регионы с высокими в среднем значениями КИУМ. Несмотря на то что фактическая структура энергопотребления Италии (рис. 5б) является неоптимальной с точки зрения границы эффективности, она представляется компромиссом между двумя смоделированными сценариями. Подробное описание анализа в рамках модели средней дисперсии приведено в работе [76] с различными приложениями в [77, 78]. Согласно обзору [60], стремясь разработать оптимальные энергетические балансы с точным учётом затрат на энергетические системы с высокой долей переменных возобновляемых источников энергии, авторы экономических исследований пытаются минимизировать затраты или максимизировать благосостояние, хотя остаётся проблемой, как объединить проблему долгосрочных инвестиций с проблемой краткосрочного планирования с учётом гибкости, балансировки и инвестиций в энергосистему.

Существенным моментом является то, что указанная изменчивость может быть частично сглажена путём агрегирования продукции как от разных элементов одной производственной площадки, так и от площадок, расположенных в разных местах (пространственная диверсификация), или за счёт использования взаимодополняемости между источниками энергии (технологическая диверсификация). Пространственная диверсификация более эффективна, если между различными производственными площадками существует слабая или отрицательная корреляция. В средних широтах мезомасштабные погодные условия связаны с относительно быстрым снижением корреляций в скорости ветра с увеличением расстояния, но синоптические погодные системы и устойчивые атмосферные режимы отвечают за корреляции в синоптических масштабах около 1000 км или более [79, 80]. С другой стороны, большая часть изменчивости солнечного ресурса связана с суточным и сезонным циклами и, таким образом, сильно коррелирована в пространстве. Однако часть изменчивости солнечных ресурсов связана с облаками и быстро декоррелирует с увеличением расстояния [81]. Таким образом, пространственная диверсификация применима только в достаточно больших масштабах, когда вариативность возобновляемых источников энергии достаточна [82–86]. Преимущества пространственной диверсификации для использования солнечной энергии также оцениваются рядом авторов [74, 75, 87, 88], в то время как авторы [89] изучают совместное сглаживание распределения энергии ветра и солнца в Европе. Технологическая взаимная дополняемость также может помочь уменьшить изменчивость производства возобновляемой энергии. В Европе, например, производства энергии с использованием ветра и солнца имеют отрицательно коррелированные сезонные циклы [90–95]. Большинство упомянутых до сих пор исследований основаны на существующем или равномерном распределении мощностей возобновляемых источников энергии. Но сочетание возобновляемых источников энергии может быть оптимизировано с использованием более слабых корреляций

между производственными площадками так, чтобы минимизировать изменчивость несоответствия производства и спроса после агрегирования объединяющей сетью. С этой целью распределение мощностей возобновляемой энергии может быть оптимизировано технологически, географически или обоими способами. Наконец, поскольку моделирование полной задачи диспетчеризации электростанций избегают, указанный анализ методом средней дисперсии не способен заменить моделирование сопряжённой проблемы долгосрочных инвестиций в возобновляемые мощности (и изъятия инвестиций из традиционных электростанций) и краткосрочного регулирования управляемого производства (включая диспетчеризуемые возобновляемые источники энергии). Тем не менее они отражают влияние изменчивости возобновляемых источников энергии концептуально и вычислительно простым способом, который позволяет проводить многосценарные исследования чувствительности с упором на роль этой изменчивости.

4. Выводы и предстоящие задачи

Антропогенные выбросы парниковых газов ответственны за изменение климата, оказывающее влияние на жизнь и население, которое мы уже наблюдаем и которое будет продолжать расти, если ничего не будет сделано для его смягчения путём сокращения выбросов и восстановления поглотителей углерода, таких как леса. Вместе с мерами разумного потребления и повышения эффективности сокращение содержания углерода в первичной энергии, потребляемой нами, является одним из способов сокращения выбросов парниковых газов. Это означает замену большинства ископаемых видов топлива источниками энергии с низким содержанием углерода, такими как энергия ветра, солнца или ядерная энергия. Хотя как ядерная энергия, так и возобновляемые источники энергии выделяют меньше парниковых газов по сравнению с ископаемым топливом, увеличение их использования порождает ряд проблем. Сосредоточение внимания на переменных возобновляемых источниках энергии, таких как ветряные и солнечные источники энергии, создаёт серьёзную проблему, связанную с их изменчивостью, которая затрудняет обеспечение адекватности энергетической системы и способности в любое время уравнивать спрос и производство энергии.

В настоящей статье не рассматриваются управляемые возобновляемые источники энергии, такие как гидроэнергетика, геотермальная энергия или биомасса, для производства как электрической, так и тепловой энергии, поскольку они не создают проблем при интеграции. Однако, фокусируясь на сокращении выбросов парниковых газов за счёт интеграции переменных возобновляемых источников энергии в конкретном регионе, мы рискуем упустить общую картину. Чтобы действительно решить вопрос о жизнеспособности энергетического перехода в глобальном масштабе, нам необходимо реально учитывать ограничения, связанные с энергией, материальными ресурсами, воздействием на окружающую среду и общество. Например, возможность массового перехода к низкоуглеродным источникам энергии, таким как энергия ветра и солнца, при продолжающемся увеличении глобального энергопотребления вызывает сомнения, связанные с наличием необходимого сырья [96]. Реки, пе-

рекрытые плотинами для гидроэнергетики, претерпевают физические, химические и биологические изменения [97–99]. Производство биомассы в промышленных масштабах приводит к расширению сельскохозяйственных площадей или к изменению использования уже существующих, что приводит к увеличению цен на продукты питания и корма, а также вызывает деградацию окружающей среды (например, из-за потребления водных ресурсов и уменьшения биологического разнообразия) [100, 101]. С другой стороны, движение по пути энергетического перехода поможет улучшить социальное благосостояние [102] и будет способствовать созданию рабочих мест, наряду с другими положительными внешними факторами [103]. Региональная интеграция и сотрудничество на энергетическом рынке необходимы для смягчения последствий изменения климата с минимальными затратами. Трансграничное регулирование требует сближения национальных правил для эффективного функционирования межсетевых соединений.

Работа проводилась в рамках Междисциплинарного центра Energy4Climate (E4C) Политехнического института Парижа и Национальной школы мостов и дорог Парижского технологического института при поддержке 3-й Программы инвестиций в будущее [ANR-18-EUR-0006-02].

Перевод с английского: В.Л. Дербов

Список литературы

- Knutson T R et al. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **99** S11 (2018)
- Wang C et al., in *Coral Reefs of the Eastern Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment* (Eds P W Glynn, D P Manzello, I C Enochs) (Dordrecht: Springer, 2016) p. 85
- Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, in *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact* (Geophysical Monograph, Vol. 134, Eds J W Hurrell et al.) (Washington, DC: American Geophysical Union, 2003) p. 1
- Bellouin N et al. *Earth Syst. Sci. Data* **12** 1649 (2020)
- Smith C J et al. *Atmos. Chem. Phys.* **20** 9591 (2020)
- Houghton J T et al. (Eds) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001) 881 pp.
- Solomon S et al. (Eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007)
- Stocker T F et al. (Eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013)
- Knutson T R, Zeng F, Wittenberg A T J. *Climate* **26** 8709 (2013)
- Kam J et al. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **97** S4 (2016)
- Thorne P W et al. *J. Geophys. Res.* **110** D18105 (2005)
- Haimberger L, Tavalato C, Sperka S J. *Climate* **25** 8108 (2012)
- Free M et al. *J. Geophys. Res.* **110** D22101 (2005)
- Christy J R et al. *J. Atmos. Ocean Technol.* **20** 613 (2003)
- Mears C A, Wentz F J J. *Atmos. Ocean Technol.* **26** 1040 (2009)
- Mears C A, Wentz F J J. *Atmos. Ocean Technol.* **26** 1493 (2009)
- Zou C Z, Wang W H J. *Geophys. Res.* **116** D23113 (2011)
- Ningombam S S, Vemareddy P, Song H J. *Atmos. Res.* **232** (2020)
- van Vuuren D P et al. *Climatic Change* **109** 5 (2011)
- Nakicenovic N, Swart R (Eds) *Emissions Scenarios* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000)
- Moss R H et al. *Nature* **463** 747 (2010)
- Fuss S et al. *Nat. Clim. Change* **4** 850 (2014)
- Knutti R, Hegerl G C. *Nat. Geosci.* **1** 735 (2008)
- Held I M, Soden B J J. *Clim.* **19** 5686 (2006)
- MacDougall A, Avis C, Weaver A. *Nat. Geosci.* **5** 719 (2012)
- Jiménez-de-la-Cuesta D, Mauritsen T. *Nat. Geosci.* **12** 902 (2019)
- Björndal J et al. *Nat. Geosci.* **13** 718 (2020)
- Liu Z et al. *Nat. Commun.* **11** 5172 (2020)
- Tollefson J. *Nature* **589** 343 (2021)
- Reilly J M, Chen Y H H, Jacoby H D. *Humanit. Soc. Sci. Commun.* **8** 16 (2021)
- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (Eds V Masson-Delmotte et al.) (Geneva: World Meteorological Organization, 2018)
- United Nations Climate Change, Paris Agreement (2015)
- Kaya Y, Yokobori K (Eds) *Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability* (Tokyo: United Nations Univ. Press, 1997)
- "World Population Prospects 2019: Highlights", ST/ESA/SER.A/423 Report (New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019)
- Guillemette Y, Turner D "The Long View: Scenarios for the World Economy to 2060", OECD Economic Policy Papers, No. 22 (Paris: OECD, 2018) p. 51, <https://doi.org/10.1787/b4f4e03e-en>
- Edenhofer O et al. (Eds) *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011)
- Edenhofer O et al. (Eds) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014)
- Ли Н. *УФН* **192** 1231 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039082>; Li N. *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.08.039082>
- Таджима Т и др. *УФН* **192** 1280 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039052>; Tajima T et al. *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039052>
- Grill G et al. *Nature* **569** 215 (2019)
- Poff N L et al. *BioScience* **47** 769 (1997)
- Sterman J D, Siegel L, Rooney-Varga N. *Environ. Res. Lett.* **13** 015007 (2018)
- REN21, Renewables 2020. Global Status Report, REN21 Ed. (2020) p. 367
- Suchet D et al. *Energies* **13** 3366 (2020)
- IEA, in *Monthly Energy Review* (U.S. Energy Information Administration, 2020)
- Kumar G V B et al. *Energies* **12** 1996 (2019)
- Abrell J, Rausch S, Streitberger C. *Energy Economics* **84** 104463 (2019)
- DOE, Quadrennial Technology Review 2015 (Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2015) p. 504
- van Zalk J, Behrens P. *Energy Policy* **123** 83 (2018)
- Hassan R, Scholes R, Ash N (Eds) *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment* (Washington, DC: Island Press, 2005) p. 47
- Solaun K, Cerdá E. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **116** 109415 (2019)
- International Energy Statistics, U.S. Energy Information Administration (2015)
- van Vliet M T H et al. *Nat. Clim. Change* **6** 375 (2016)
- Deroubaix A et al. *Nat. Commun.*, submitted
- Drobinski P et al., in *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin. Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report* (Eds W Cramer, J Guiot, K Marini) (Marseille: Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, 2020) p. 265
- Cochran J et al., Technical Report NREL/TP-6A20-62607 (Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, NREL, 2015) p. 30
- Alboaouh K A, Mohagheghi S. *J. Renewable Energy* **2020** 2314 (2020)
- Heptonstall P J, Gross R J K. *Nat. Energy* **6** 72 (2021)

59. World Energy Outlook 2018 (U.S. Energy Information Administration, IEA, 2018) p. 661, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
60. Sijm J P M, ECN–E-14-022 Report (Petten: ECN, 2014) p. 52
61. Roulston M S et al. *Renew. Energy* **28** 585 (2003)
62. Usaolola J et al. *Wind Eng.* **28** 119 (2004)
63. Pinson P, Chevallier C, Kariniotakis G N *IEEE Trans. Power Syst.* **22** 1148 (2007)
64. Dupré A et al. *Energies* **13** 5266 (2020)
65. Alonzo B et al. *Energies* **13** 4888 (2020)
66. Apt J J. *Power Sources* **169** 369 (2007)
67. Frunt J, Kling W L, van den Bosch P P J *Electric Power Syst. Res.* **80** 1528 (2010)
68. Huber M, Dimkova D, Hamacher T *Energy* **69** 236 (2014)
69. van Stiphout A, Vos K D, Deconinck G *IEEE Trans. Power Syst.* **32** 378 (2017)
70. U.S. Electric Utility Demand-Side Management 2000 (IEA, U.S. Energy Information Administration, DOE/EIA-0589(00), 2020) p. 17
71. Spiecker S, Weber C *Energy Policy* **65** 185 (2014)
72. Heard B P et al. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **76** 1122 (2017)
73. Hansen K, Breyer C, Lund H *Energy* **175** 471 (2019)
74. Widén J et al. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **44** 356 (2015)
75. Graabak I, Korpås M *Energies* **9** 449 (2016)
76. Tantet A et al. *Energies* **12** 4299 (2019)
77. Bouramdane A A et al. *Energies* **13** 5087 (2020)
78. Maimó-Far A et al. *Energies* **13** 5132 (2020)
79. James I N *Introduction to Circulating Atmospheres* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994)
80. Holton J R *An Introduction to Dynamic Meteorology* (Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2004)
81. Duffie J, Beckman W A, in *Solar Engineering of Thermal Processes* (Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2013)
82. Holttinen H *Wind Energy* **8** 173 (2005)
83. Giebel G *Wind Energy* **10** 69 (2007)
84. Kempton W et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107** 7240 (2010)
85. Katzenstein W, Fertig E, Apt J *Energy Policy* **38** 4400 (2010)
86. Tarroja B et al. *Renew. Energy* **36** 3424 (2011)
87. Gueymard C A, Wilcox S M *Solar Energy* **85** 1068 (2011)
88. Marcos J et al. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **20** 226 (2012)
89. Buttler A et al. *Energy* **106** 147 (2016)
90. Heide D et al. *Renew. Energy* **35** 2483 (2010)
91. Bett P E, Thornton H E *Renew. Energy* **87** 96 (2016)
92. Coker P et al. *Renew. Energy* **53** 111 (2013)
93. Widén J *IEEE Trans. Sustain. Energy* **2** 177 (2011)
94. Miglietta M M, Huld T, Monforti-Ferrario F J. *Appl. Meteorol. Climatol.* **56** 217 (2016)
95. Santos-Alamillos F J et al. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **51** 2005 (2012)
96. Carrara S et al. "Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system", EUR 30095 EN Report (Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2020) <https://doi.org/10.2760/160859>
97. Vörösmarty C J et al. *Global Planet. Change* **39** 169 (2003)
98. Zarfl C et al. *Aquat. Sci.* **77** 161 (2015)
99. Winemiller K O et al. *Science* **351** 128 (2016)
100. Armaroli N, Balzani V *Angew. Chem. Int. Ed.* **46** 52 (2006)
101. Naylor R L et al. *Environment Sci. Policy Sustainable Development* **49** 30 (2007)
102. von Möllendorff C, Welsch H "Measuring renewal, SOEP papers on Multidisciplinary Panel Data Research, No. 779 (Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, DIW, 2015); <http://hdl.handle.net/10419/115874>
103. Bulavskaya T, Reynès F *Renewable Energy* **119** 528 (2018)

Integration of climate variability and climate change in renewable energy planning

P. Drobinski^(*), A. Tantet

Laboratoire de Météorologie Dynamique — Institut Pierre Simon Laplace;
Ecole polytechnique — IP Paris, ENS — PSL Université, Sorbonne Université, CNRS, France
E-mail: ^(*) philippe.drobinski@lmd.ipsl.fr

The trajectory outlined in the Paris Agreement to keep global warming below 2 °C dictates not only the timing but also the speed at which the transformation of our energy system must take place to decarbonize energy production. Complying with the Paris Agreement requires reducing the carbon content of energy by about 75% and therefore making a rapid transition from fossil production to production based on low-carbon technologies. Among these technologies are those based on renewable energies. The variability of the climate itself induces a fluctuating or even an intermittent production of variable renewable energy (solar, wind, marine), challenging the balance of the electricity grid. In this context, to speak of energy transition is to face the problem of increasing the penetration of low-carbon energy production while limiting the variability so as to ensure the socio-technical feasibility and economic viability. The problem is not simple, and the delicate balance between urgency (drastically reducing emissions) and utopia (choosing a strategy for low carbon energies and analyzing opportunities and obstacles) needs to be clearly defined.

Keywords: climate change, climate change mitigation, energy transition, renewable energies, renewable energy integration

PACS numbers: **88.40. – j, 88.50. – k, 92.60.Ry**

Bibliography — 103 references

Received 30 May 2021

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (11) 1191–1202 (2022)

Physics – Uspekhi **65** (11) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039080>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039080>