

И.Ю. Жилина*

ИННОВАЦИИ В БОРЬБЕ С ГЛОБАЛЬНЫМ ПОТЕПЛЕНИЕМ

Аннотация. Рассматриваются пути смягчения и адаптации к глобальным климатическим изменениям, административные и экономические инструменты сдерживания потепления климата, особенности климатических инноваций, перспективные направления сокращения выбросов парниковых газов. Отмечается, что в последние годы проблема климатических изменений выходит на первый план в мировой политике. Глобальное потепление воспринимается как одна из основных угроз существованию человеческой цивилизации.

Ключевые слова: климатические изменения; антропогенные воздействия; декарбонизация экономики; углеродный налог; системы торговли выбросами; возобновляемая энергетика; хранение углерода.

I.Yu. Zhilina

Innovations in the fight against global warming

Abstract. Ways of mitigating and adapting to global climate change, administrative and economic instruments to curb climate warming, features of climate innovation, and promising directions for reducing greenhouse gas emissions are examined. It is noted that in recent years, the problem of climate

* **Жилина Ирина Юрьевна**, канд. истор. наук, старший научный сотрудник Отдела экономики ИНИОН РАН.

Zhilina Irina, PhD (Hist. Sci.), senior researcher of the Department of economics at the Institute of Scientific Information for Social Sciences of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).

change has come to the fore in world politics. Global warming is perceived as one of the main threats to the existence of human civilization

Keywords: climate change; human impacts; decarbonization of the economy; carbon tax; emissions trading systems; renewable energy; carbon storage.

Введение

В последние десятилетия климат на Земле заметно меняется: одни страны страдают от аномальной жары, другие от нетипично холодных или слишком теплых зим. Изменение климата, носящее глобальный характер, выражается в увеличении средней годовой температуры на Земле, что приводит к разбалансировке всех природных систем: изменению режима выпадения осадков, температурным аномалиям, росту частоты экстремальных явлений (ураганов, наводнений, засух). Среди специалистов преобладает мнение о том, что причиной климатических изменений является постоянный рост концентрации в атмосфере парниковых газов (ПГ)¹. Основным долгоживущим антропогенным ПГ является углекислый газ (CO₂). По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) (World Meteorological Organization, WMO), в 2018 г. его концентрация достигла 407,8 части на миллион, что составляет 147% от уровня 1750 г.

Ежегодный индекс выбросов ПГ, определяемый Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (National oceanic and atmospheric administration, NOAA), показывает, что с 1990 по 2018 г. радиационное воздействие долгоживущих парниковых газов увеличилось на 43%, причем на долю CO₂ приходится около 80% этого увеличения. В последний раз сравнимая концентрация CO₂ на Земле имела место 3–5 миллионов лет назад. Тогда температура была выше на 2–3 градуса, а уровень моря превышал современный на 10–20 метров, подчеркивает Генеральный секретарь ВМО П. Таалас [Greenhouse gas concentrations..., 2019].

Значительная доля выбросов вызвана сжиганием ископаемого топлива, на долю которого в промышленности приходится более 50% выбросов; на технологические процессы, связанные с производством цемента, – около 15%. В сельском хозяйстве примерно равные доли (более 30%) приходятся на удобрения и жи-

¹ К парниковым газам относятся углекислый газ (CO₂), метан (CH₄), оксид азота (N₂O), водяной пар, фторсодержащие газы (F-газы).

вотноводство. В секторе транспорта около 75% занимают автомобильные выбросы, примерно 12% – авиационные, источником остальных выбросов является железнодорожный и водный транспорт [Риски реализации Парижского..., 2016, с. 12].

Последствия изменения климата

С 1980 г. каждое десятилетие было теплее предыдущего, причем за последние пять лет (2015–2019) признаки и последствия климатических изменений значительно усилились. Эти годы стали самыми теплыми за всю историю наблюдений по сравнению с прошлыми пятилетками, несмотря на попытки международного сообщества остановить рост температуры атмосферы, ее среднее значение повысилось на 1,1 °C с начала доиндустриального периода и на 0,2 °C по сравнению с периодом 2011–2015 гг. [Синоптики сообщили об..., 2019].

В 2020 г. впервые в 10-летнем прогнозе Всемирного экономического форума первые пять строчек наиболее вероятных глобальных рисков заняли те, которые, так или иначе, обусловлены климатическими изменениями. К ним относятся экстремальные погодные явления, наносящие значительный ущерб недвижимости и инфраструктурам¹, и приводящие к гибели людей; отсутствие мер смягчения (mitigation)² изменений климата и адаптации к его последствиям³ со стороны правительств и корпораций; антропогенный экологический ущерб и катастрофы, включая экологические преступления (разливы нефти и радиоактивное загрязнение); значительная утрата биоразнообразия и разрушение наземных и морских экосистем⁴ с необратимыми последствиями для окру-

¹ В 2018 г. только застрахованные убытки составляли 80 млрд долл., что вдвое превышает среднюю величину, скорректированную с учетом инфляции, за последние 30 лет [Карни, 2019, с. 12].

² Смягчение последствий изменения климата – действия, предпринимаемые в целях снижения количества выбрасываемых в атмосферу ПГ или удаления их из атмосферы.

³ Адаптация к глобальному изменению климата – приспособляемость естественных или антропогенных систем к реальным или ожидаемым климатическим изменениям, позволяющая снизить их собственную уязвимость и использовать благоприятные условия.

⁴ Человеческая деятельность уже привела к потере 83% всех диких млекопитающих и половины растений, являющихся основой систем питания и здоровья населения планеты [La planète en feu..., 2020].

жающей среды (ОС), которые приводят к серьезному истощению ресурсов, необходимых для жизнедеятельности человечества и промышленности; крупные стихийные бедствия (землетрясения, цунами, извержения вулканов и геомагнитные грозы) [La planète en feu..., 2020].

Таким образом, явления, когда-то считавшиеся маловероятными или редкими (как с точки зрения интенсивности, так и частоты), становятся частью «новой нормы». Повторяющиеся рекорды (самое жаркое лето, самая продолжительная засуха или самый большой лесной пожар в истории) становятся характерной чертой дискурса об изменении климата. Эти экстремальные ситуации влияют на общество в самых разнообразных формах, включая рост цен на продовольствие из-за неурожаев, воздействие на здоровье, вспышки болезней, прямой ущерб имуществу и т.д. И даже при проведении политики, которая считается совместимой с целью ограничения повышения температуры на Земле, в некоторых регионах риски экстремальных погодных явлений, опасных для экосистем и обществ уровней, в ближайшие десятилетия будут увеличиваться [Future Earth..., 2019].

Действия международного сообщества по предотвращению изменения климата

Основным документом международного сотрудничества в области климата является Рамочная конвенция ООН об изменении климата 1992 г., цель которой состоит в предотвращении антропогенного воздействия на климатическую систему планеты. Участниками конвенции к настоящему моменту являются 197 государств мира.

Первой попыткой урегулирования климатической проблемы на глобальном уровне является Киотский протокол (КП), вступивший в силу 16 февраля 2005 г. Целью КП являлось уменьшение загрязнения ОС за счет сокращения выбросов ПГ в атмосферу. КП определил конкретные обязательства развитых стран и стран с переходной экономикой по ограничению или стабилизации выбросов ПГ в 2008–2012 гг. и снижению общих выбросов ПГ в атмосферу на 5,2% по сравнению с уровнем 1990 г. КП также явился первым международным соглашением об охране ОС, включавшим рыночные инструменты, побуждающие предприятия и государства принимать программы по снижению выбросов ПГ. В соответствии с предусмотренными в КП механизмами гибкости его участники

получили возможность передавать друг другу часть национальной квоты на выбросы ПГ (торговля квотами) или приобретать единицы выбросов, сокращенных в рамках механизмов чистого развития и проектов совместного осуществления. Хотя согласно официально подведенным ООН итогам первого периода действия КП участники соглашения уменьшили выбросы ПГ более чем на 20%, в целом заявленные в КП цели не были достигнуты: общемировые выбросы ПГ за этот период выросли почти в 1,5 раза [Риски реализации Парижского..., 2016, с. 21].

Второй попыткой международного сообщества предотвратить изменения климата является Парижское соглашение по климату (ПС), заключенное в 2015 г. Посредством механизмов выполнения обязательств и обеспечения климатически устойчивого низкоуглеродного развития предполагается сдержать рост средней глобальной температуры атмосферы в XXI в. в пределах 1,5–2 °C от доиндустриального уровня. На сегодняшний день ПС ратифицировали 187 стран и ЕС. Россия приняла на себя обязательства по ПС в сентябре 2019 г. Практическая реализация ПС должна начаться после 2020 г.

Международные инициативы по радикальному сокращению выбросов ПГ (на 50–80% к 2050 г.), а также смягчению и адаптации к последствиям климатических изменений свидетельствуют о пересмотре приоритетов технологического развития и подразумевают ускорение перехода к низкоуглеродной экономике. Эта тенденция ярко проявилась в подготовленном в 2018 г. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК – Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) специальном докладе, посвященном удержанию глобального потепления в рамках 1,5 °C.

В докладе впервые проведен сравнительный анализ влияния глобального потепления до 1,5 °C по сравнению с предусмотренными ПС двумя градусами; рассмотрены пути ограничения потепления до 1,5 °C и усиления глобального ответа на климатические изменения, включая предотвращение будущих климатических изменений за счет сокращения эмиссии ПГ и адаптации к уже произошедшим или будущим климатическим изменениям, связанным с настоящими или прошлыми выбросами ПГ. В докладе также проводится мысль о связи защиты от климатических изменений с устойчивым развитием и усилиями по искоренению

бедности в соответствии с целями в области устойчивого развития (ЦУР)¹ [Understanding the IPCC..., 2018, p. 3].

Проведенный экспертами МГЭИК анализ показал, что климатические риски для природных систем и человека при глобальном потеплении до 1,5 °C выше, чем в настоящее время, но ниже, чем при повышении среднемировой температуры до 2 °C. Они зависят от величины и темпов повышения температуры, географического положения региона, уровня его развития и уязвимости, а также выбора мер по смягчению и адаптации к климатическим изменениям.

В целом повышение глобальной температуры до 1,5 °C окажет на совокупный экономический рост, перспективы устойчивого развития, снижения бедности и неравенства менее сильное влияние, чем при ее повышении до 2 °C. Тем не менее тропические и субтропические страны и при первом варианте столкнутся с определенными трудностями в результате недостатка воды, вызванного засухами в Африке и на Ближнем Востоке, что может привести к снижению ВВП этих регионов. При повышении глобальной температуры до 2 °C наибольшие экономические потери понесут страны и регионы со средним и низким уровнем дохода (Африканский континент, Юго-Восточная Азия, Индия, Бразилия и Мексика). Эксперты МГЭИК приходят к выводу, что ограничение глобального потепления именно полутора градусами позволит избежать еще более серьезных и разрушительных, а в некоторых случаях необратимых последствий для жизни на планете, а также предоставит людям и экосистемам дополнительные возможности для адаптации и существования [Пресс-релиз МГЭИК..., 2018, с. 2]. В докладе подчеркивается, что при немедленном сокращении антропогенных выбросов до нуля, дальнейшее повышение температуры на планете за пределы уже достигнутого не превысит 0,5 °C в течение следующих 20–30, а возможно, и 100 лет, тогда как при сохранении их нынешней интенсивности глобальная температура поднимется на 1,5 °C в промежутке между 2030 и 2052 гг. [Technical Summary..., 2018].

¹ Цели в области устойчивого развития (ЦУР) (Sustainable Development Goals (SDGs)) – набор целей для международного сотрудничества в 2016–2030 гг., которые пришли на смену Целям развития тысячелетия. Итоговый документ «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», принятый членами ООН в конце 2015 г., содержит 17 глобальных целей и 169 соответствующих задач.

Повышение среднемировой температуры, сверх $1,5^{\circ}\text{C}$ относительно доиндустриальных уровней, приведет к катастрофическим последствиям, которые начнут проявляться уже к 2040 г. Ситуация усугубляется тем, что «определяемые на национальном уровне вклады» (NDC), т.е. обязательства по снижению выбросов, добровольно взятые на себя странами, подписавшими ПС, совершенно недостаточны. Даже если они будут выполнены, среднемировая температура вырастет к 2100 г. более чем на 3°C и продолжит повышаться [Osampo, 2018].

Многие специалисты считают, что возможность удержать повышение температуры на допустимом уровне пока сохраняется, но для этого от мирового сообщества потребуются беспрецедентные усилия. По оценкам экспертов МГЭИК, единственным действенным способом борьбы с потеплением является сокращение к 2030 г. выбросов CO_2 на 45% по сравнению с 2010 г., а к 2050 г. сведение к нулю чистого баланса между объемом антропогенных выбросов ПГ и поглотительной способностью земной экосистемы [Global Warming of $1.5^{\circ}\text{C}...$, 2018].

Чтобы добиться этого результата, мировое сообщество должно незамедлительно провести масштабную декарбонизацию мировой экономики. В первую очередь это означает резкое сокращение сжигания ископаемого топлива, замену его возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) и атомной энергией, а также развитие технологий улавливания и захоронения углерода. По расчетам МГЭИК, для достижения этой цели к 2050 г. доля ВИЭ (включая био-, гидро-, ветряную и солнечную энергии) в предложении первичной энергии должна увеличиться до 49–67%, тогда как доля угля, нефти и природного газа снизиться соответственно до 1–7%, 32–74, 13–60% [Technical Summary..., 2018]. Переход к «нулевым выбросам» к 2050 г. потребует кардинального пересмотра принципов землепользования, сельского хозяйства, градостроительства и промышленности в целом, разработки и внедрения новых технологий в самых разных сферах жизнедеятельности человека.

Предполагается, что для трансформации энергетической системы в 2016–2035 гг. ежегодно потребуется в среднем 2,4 трлн долл. в ценах 2010 г. (2,5% мирового ВВП) [Global Warming of $1.5^{\circ}\text{C}...$, 2018]. В то же время, по оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), для перехода к низкоуглеродной экономике могут потребоваться инвестиции в энергетику в размере 3,5 трлн долл. ежегодно в течение десятилетий, что вдвое

больше нынешнего объема. Согласно сценарию агентства, для того чтобы к 2050 г. выбросы углерода стабилизировались, почти 95% электроснабжения должно быть низкоуглеродным, 70% новых автомобилей – электрическими, а интенсивность выбросов CO₂ строительной отрасли должна снизиться на 80% [Карни, 2019, с. 12].

Инструмент борьбы с глобальным потеплением

В научной литературе и в документах различных международных организаций, в частности ОЭСР, неоднократно отмечалось, что формирование новых моделей роста, к которым, безусловно, можно отнести модель низкоуглеродного роста, в значительной степени зависит от инноваций.

Уместно в связи с этим упомянуть работы основоположника теории инноваций Й. Шумпетера, в которых широко популяризировалась концепция созидательного разрушения. Согласно этой концепции, инновации, порождая новых предпринимателей и новые идеи, способствуют появлению новых бизнес-моделей, но уничтожают устаревшие инновации и технологии.

Инновационный процесс происходит на конкурентном рынке, где роль сигнала играет цена. При отсутствии четкого сигнала, позволяющего оценить долгосрочную прибыльность инноваций, компании могут отказаться от инвестиций в их развитие. В этих условиях вмешательство государства оправдано «зависимостью от пути» (path dependency). Эта концепция отражает идею о том, что динамика развития любых новых явлений или процессов в определенной степени зависит от прошлых событий, что в какой-то мере ограничивает возможные перспективы. Поскольку одной из причин такой зависимости являются затраты на накопление капитала и знаний, резкое изменение технологии или направления развития может оказаться слишком дорогим для участников.

Стимулы, создаваемые рынком для смягчения и адаптации к изменениям климата, с одной стороны, приводят к малому количеству климатических инноваций, с другой – к большому объему исследований и разработок в области загрязняющих технологий. «Эти рыночные сбои в значительной степени обусловлены низким уровнем учета социальных издержек для общества, связанных с выбросами ПГ. В частности, НИОКР в большей степени ориентированы на совершенствование существующих технологий (таких, как оптимизация двигателей с использованием ископаемых видов

энергии), а не на перспективное развитие совершенно новых технологий» [Michallet, 2016].

Государство может скорректировать эти провалы рынка и инициировать новые пути развития, как за счет финансирования фундаментальных исследований, так и с помощью корректировки рыночного ценового сигнала для соответствующего стимулирования компаний в рамках проводимой государством климатической политики.

Государство также может использовать административные инструменты, в первую очередь технологические стандарты, которые фактически запрещают особенно грязные технологии или, напротив, устанавливают обязательность применять какие-либо чистые технологии. Однако перечни таких технологий необходимо постоянно обновлять, поскольку при появлении новых технологий некоторые ранее считавшиеся чистыми технологии переходят в разряд грязных. Регуляторы также часто составляют справочники наилучших доступных технологий в разных отраслях, которые постепенно становятся обязательными для всех компаний.

Другим административным инструментом являются так называемые нормативы эффективности, например стандарт потребления автомобильного топлива на 100 километров пробега. Производители продукта, для которого установлены какие-либо нормативы, могут использовать любые технологии при условии, что они обеспечивают соответствие продукции установленным требованиям, содержащимся в нормативах.

Однако в целом считается, что основным инструментом регулирования объема выбросов CO_2 в атмосферу являются экономические инструменты – углеродный налог и система торговли выбросами (СТВ). Идею введения углеродного налога на мировом уровне активно продвигают Всемирный банк (ВБ) и Международный валютный фонд (МВФ). По их мнению, даже успешная реализация участниками ПС своих обязательств позволит сократить глобальные выбросы ПГ лишь на треть от показателя, необходимого для стабилизации климата.

Опираясь на результаты исследования результативности разных уровней углеродных налогов, эксперты МВФ сделали вывод о том, что налог в размере 35 долл. за тонну CO_2 обеспечит выполнение общих обязательств стран G20, а также позволит сократить выбросы странам, активно использующим уголь (таким, как Индия, Китай и Южная Африка). В других случаях, например Канады и некоторых европейских стран, углеродный налог даже на уровне

70 долл. за тонну не обеспечивает необходимого снижения выбросов, что отчасти объясняется более строгими обязательствами, принятыми этими странами.

В связи с этим МВФ предлагает группе стран с крупными выбросами договориться об установлении минимальной платы за выбросы углерода, которая гарантирует определенный уровень усилий по смягчению последствий изменения климата, а также служит некоторой гарантией от потерь конкурентоспособности. Примером такого подхода служит Канада, провинции и территории которой должны поэтапно вводить минимальную плату за выбросы углерода, которая к 2022 г. достигнет 50 канадских долл. (38 долл. США) за тонну. Кроме того, страны с развитой экономикой могут взять на себя большую ответственность за смягчение последствий изменений климата в форме более высокого норматива минимальной платы. Режим можно гибко менять, адаптируя к системам торговли квотами на выбросы и прочими мерами [Перри, 2019(б), с. 55].

МВФ выдвигает в пользу углеродного налога следующие аргументы. Во-первых, углеродный налог является эффективным средством для достижения национальных обязательств по сокращению выбросов ПГ в рамках ПС. Углеродными налогами, взимаемыми с угля, нефтепродуктов и природного газа пропорционально содержанию в них углерода, можно облагать поставщиков топлива, которые, в свою очередь, переложат этот налог на потребителей в форме повышения цен на электроэнергию, бензин, мазут и т.д., а также на зависящие от них товары и услуги. Это создает стимулы к сокращению энергопотребления как производителями, так и потребителями, и их переходу на низкоуглеродное топливо и возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Так, в 2030 г. налог в 35 долл. на тонну выбросов CO₂ в целом повысит цены на уголь, электроэнергию и бензин соответственно примерно на 100%, 25 и 10% [Перри, 2019(а), с. 16]. Углеродный налог также создает очевидный стимул для переориентации инвестиций в энергетику на низкоуглеродные технологии.

Во-вторых, углеродный налог в том же размере в 2030 г. может обеспечить государству доход порядка 1–2% от ВВП [Перри, 2019(а), с. 17], который можно направлять на противодействие экономическому ущербу, причиненному ростом цен на топливо. Так, правительства могут использовать доходы от углеродного налога для облегчения налогового бремени работников, снижая подоходный налог с физических лиц и налог на фонд заработной

платы компаний. Наряду с этим за счет доходов от налога на выбросы ПГ можно финансировать инвестиции для достижения целей ООН в области устойчивого развития, в частности сокращения голода, бедности, неравенства и деградации ОС.

В-третьих, страны могут получить от введения углеродного налога значительные выгоды. С его помощью решаются проблемы не только изменения климата, но и улучшения состояния ОС и здоровья людей (за счет снижения преждевременной смертности, связанной с загрязнением воздуха, которое вызывает сжигание ископаемого топлива). Кроме того, углеродный налог легко администрировать – взимать вместе с действующими налогами на топливо, которые большинство стран легко собирают. Наконец, можно включить углеродный налог в роялти, уплачиваемые угле-, нефте- и газодобывающими компаниями.

Альтернативный способ тарификации углеродных выбросов – использование систем торговли квотами (СТВ) на выбросы. В этом случае государство определяет максимально допустимый объем выбросов в экономике, который затем распределяется (бесплатно или на аукционах) между эмитентами, на которых распространяется регулирование, т.е. устанавливает потолок выбросов для каждого предприятия. При превышении допустимого объема выбросов компании докупают недостающие разрешения на рынке, а при их снижении ниже допустимого уровня могут продавать излишки на рынке. Таким образом, в рамках СТВ формируется рыночная цена на выбросы. Пока, однако, применение СТВ ограничено в основном электроэнергетикой и крупной промышленностью, что, по оценкам экспертов МВФ, снижает положительный эффект от сокращения выбросов CO₂ на 20–50% по сравнению с углеродным налогом [Перри, 2019(а), с. 17].

Учитывая, что на введение платы за выбросы углерода могут влиять политические факторы, эксперты МВФ рекомендуют вводить его постепенно, с предоставлением адресной помощи домашним хозяйствам с низкими доходами, а также отраслям, зависящим от торговли, и уязвимым работникам; четко информировать общественность об основаниях для реформ и использовании доходов. Возможно, потребуются и другие инструменты. Один из потенциально перспективных подходов, позволяющих избежать повышения цен на топливо, – введение налоговых субсидий для усиления стимулов к производству экологически чистой энергии, переходу на экологически чистые транспортные средства и повышению энергоэффективности устройств.

В настоящее время на национальном, субнациональном и региональном уровнях действует 60 систем углеродного налога и СТВ, средняя общемировая цена выбросов равняется всего 2 долл. за тонну, что составляет лишь небольшую часть от необходимого уровня [Перри, 2019(а), с. 17].

В 2017 г. в целом объем выбросов, регулируемый СТВ и углеродным налогом, составлял 8 млрд т эквивалента CO_2 ($\text{tCO}_2\text{-э}$), т.е. около 14,6% мировых выбросов ПГ. Совокупный стоимостной объем инициатив по установлению цен на углерод (СТВ и углеродные налоги) составил, по оценке ВБ, 52 млрд долл. [Carbon Pricing Dashboard, 2017]. При этом цена углерода в разных регионах мира варьируется от 1 долл. за $\text{tCO}_2\text{-э}$ (на некоторых пилотных углеродных рынках Китая) до 130 долл. за $\text{tCO}_2\text{-э}$ (углеродный налог в Финляндии) [Prix du carbone..., 2017]. Несмотря на активную пропаганду рыночных инструментов борьбы с глобальным потеплением, международному сообществу пока не удалось добиться существенных успехов в этой сфере.

Экономические и административные инструменты регулирования выбросов имеют ряд недостатков. Основным недостатком углеродного налога является неопределенность будущего уровня выбросов, а слабостью СТВ – неопределенность издержек их сокращения. Кроме того, устанавливая некоторую цену за единицу выбросов, регулятор не ограничивает эмитентов в выборе способов их сокращения (инвестиции в ВИЭ, повышение КПД систем генерации энергии, сокращение производства и т.д.). При этом компании предпочитают платить за выбросы, если издержки их сокращения превышают налог или стоимость разрешений на выбросы [Макаров, Степанов, 2017, с. 10–11].

Опыт применения углеродного налога также показал, что он является эффективным инструментом управления спросом и пополнения бюджета, но не вносит существенных изменений в отраслевую структуру. Этот налог в наибольшей степени подходит для регулирования большого числа однородных источников выбросов, но требует эффективного администрирования и корректировки налогового законодательства в зависимости от экономической ситуации и приоритетов социально-экономической политики той или иной страны [Буквич, Петрович, 2017, с. 6, 12].

Довольно осторожно оценивает возможность всеобщей тарификации углерода и комиссия во главе с Дж. Стиглицем и Н. Стерном. В подготовленном комиссией докладе отмечается, что разные страны могут использовать различные инструменты

климатической политики и определять цену углерода в зависимости от национальных и локальных условий [Rapport de la Commission..., 2017, p. 4]. Ориентация только на тарификацию углерода может и не обеспечить быстрое и масштабное снижение выбросов ПГ. Эффективнее и привлекательнее представляется сочетание различных инструментов климатической политики, включая инвестиции в инфраструктуру и транспорт, городское планирование, поддержку производства электроэнергии на основе ВИЭ, нормы энергетической эффективности, управления землями и лесами, открытие новых процессов и технологий, а также финансовые инструменты для снижения рисков и, следовательно, стоимости инвестированного капитала [Rapport de la Commission..., 2017, p. 3].

Резко отрицательно относятся к тарификации углерода и некоторые представители экологического движения. Так, председатель международной организации «Общество друзей Земли» (Friends of the Earth) К. Нансон считает, что схемы торговли квотами целесообразно вводить богатым странам, корпорациям (на долю только 100 корпораций приходится 71% выбросов ПГ) и элитам (самые богатые 10% людей ответственны за около 50% выбросов парниковых газов, в то время как самые бедные 50% производят 10% выбросов), поскольку разыгрываемый ими технологический спектакль позволяет продолжать извлекать выгоду из созданного ими же климатического кризиса [Nansen, 2019].

Тем не менее, например, повышение цен на автомобильное топливо в результате введения углеродного налога изменяет стимулы для автопроизводителей, поскольку потребители при покупке учитывают эксплуатационные расходы, что побуждает компании к внедрению чистых технологий [Michallet, 2016].

Климатические инновации

МВФ, делая упор на экономические методы регулирования выбросов ПГ и рассматривая НИОКР и порождаемые ими инновации в области чистых технологий всего лишь как важное дополнение к углеродному налогу [Fiscal policies for..., 2019, p. 17], не учитывает тот факт, что в конечном счете (если исключить импульсы краткосрочной конъюнктуры) цены определяются структурой реального сектора экономики. Долгосрочные тенденции ценовых изменений в значительной мере зависят от распространения научно-технических инноваций. Особенно заметно это проявляется

в энергетике. Смены базового источника энергии (дрова – уголь – нефть) были главным фактором перестройки реального сектора и, соответственно, системы цен (хотя каждая такая смена имеет комплексный характер и основным ее двигателем не обязательно служит энергетика) [Данилов-Данильян, 2019].

Очередная смена происходит в настоящее время: уже не вызывает сомнений, что углеводороды в качестве источника энергии уступают главную роль ВИЭ, хотя еще четверть века назад это мало кому казалось возможным. Ускорение этого процесса в значительной мере вызвано осознанием опасности климатических изменений и стремлением к экологизации хозяйства. Одновременно со сменой главного источника энергии происходит массовое распространение во всех сферах производства и управления технологий искусственного интеллекта (ИИ), что способствует повышению эффективности использования природных ресурсов и, как следствие, сокращению антропогенного давления на биосферу.

Происходящий радикальный сдвиг в структуре реального сектора экономики определяет тенденции общественного развития не менее чем на два-три десятилетия. Поэтому анализ характеристик производства и потребления энергии в натуральном (физическом) выражении – валовых и особенно в разрезе энергоисточников позволяет оценить показатель – объем антропогенных выбросов ПГ в атмосферу – и время, необходимое для достижения значения, обеспечивающего прирост среднеглобальной приземной температуры не более чем на 1,5 °C [Данилов-Данильян, 2019].

Обзор существующих климатических инноваций свидетельствует о разнообразии проектов во всех секторах, но особенно в таких наиболее грязных, как энергетика, транспорт, строительство и сельское хозяйство. Многие инновации относятся также к секторам, связанным с управлением водными ресурсами, здоровьем и страховыми услугами. Большинство климатических инноваций являются технологическими, хотя определенная их часть, способствующая созданию новых форм сотрудничества, необходимых в декарбонизированной и экологизированной экономике, относится к организационным, институциональным и социальным.

Некоторые инновации являются инкрементальными (усовершенствующими), как, например, повышение КПД двигателя автомобиля. Другие более радикальны, в частности создание на местном уровне совместного производства из альтернативных источников энергии. Некоторые инновации появляются в результате

научных исследований, другие создаются предприятиями, ассоциациями пользователей или потребителей [Touzard, 2017, p. 6].

Климатические инновации обычно отражают компромисс между многими целями, в первую очередь между адаптацией к изменению климата и смягчением его последствий и защитой ОС или здоровья граждан. С этой точки зрения они являются продолжением инноваций в области устойчивого развития. В силу локального характера влияния климатических изменений и затрагиваемых ими ресурсов, а также возможностей сотрудничества в процессе адаптации к климатическим изменениям, многообещающим полем для климатических инноваций являются территориальные и пространственные стратегии. Инновации часто служат альтернативой «климатической релокализации» деятельности, в частности в сельском хозяйстве.

Многие климатические инновации связаны с изменениями поведения пользователей: более активным использованием общественного и совместного транспорта, дистанционным управлением использования энергии, сокращением потребления продуктов животного происхождения, выявлением климатических рисков. Следование климатическим целям способствует развитию совместных инноваций, т.е. вовлечению пользователей в процесс их создания.

По сравнению с классическими видами инноваций климатические инновации имеют определенную специфику, что позволяет превратить их в особое поле для анализа и исследований. Речь идет об учете долгосрочного характера и неопределенностей, связанных с климатом, а также об особенностях инвестиций, видах мобилизуемых знаний, выходе за традиционные рамки управления предприятиями или использовании прогностического анализа и стратегического планирования [Touzard, 2017, p. 7].

Характерной чертой климатических инноваций являются особые связи с территориальными стратегиями, изменениями поведения, а также политическими и гражданскими инициативами. Проблема изменения климата требует согласованных усилий национальных правительств и широкого круга негосударственных и субнациональных субъектов (городов, предпринимательского сообщества и гражданского общества). Негосударственные и субнациональные климатические инициативы необходимы для достижения национальных целей по смягчению последствий климатических изменений – с их помощью можно добиться более высоких результатов в этом процессе. Для эффективной реализа-

ции индивидуальных и совместных инициатив в инновационный процесс необходимо интегрировать разнообразные негосударственные и субнациональные субъекты (города, штаты, провинции и регионы) для реализации не только индивидуальных, но и совместных инициатив¹.

Понимание того, как негосударственные и субнациональные действия вписываются в общие национальные цели и политику, может помочь построению более реалистичных прогнозов выбросов ПГ [Non-State and..., 2019, p. 3–4]. Необходимость системных действий для сокращения выбросов ПГ и смягчения и адаптации к изменениям климата предполагает включение результатов этих инициатив в решения в области климата. Так, 15 февраля 2020 г. на крупнейшей онлайн-платформе Non-State Actor Zone for Climate Action (NAZCA) 17 284 негосударственных субъекта из 191 страны зарегистрировали 26 тыс. индивидуальных и совместных инициатив в сфере землепользования, водных ресурсов, энергетики, промышленности и т.д.², что практически вдвое превышает количество инициатив на август 2018 г.: тогда на платформе было зарегистрировано немногим более 12,5 тыс. обязательств [Bridging the emissions gap..., 2018, p. 7].

В докладе «Глобальные климатические действия городов, регионов и предприятий» (2019) (Global Climate Action from Cities, Regions and Businesses), подготовленном к Саммиту ООН по климатическим действиям, были названы международные партнерства с наиболее высоким потенциалом сокращения выбросов ПГ. К ним относятся: Коалиция Under2³, которая может обеспечить сокращение выбросов от 4,6 до 5,0 ГтCO₂-э в год к 2030 г.,

¹ Под совместными инициативами понимается совместная деятельность различных субъектов, в которой могут участвовать и правительственные органы, в том числе на национальном уровне. Международные совместные инициативы привлекают акторов из разных стран.

² NAZCA Global Climate Action. – 2019. – Режим доступа: <https://climateaction.unfccc.int/views/terms.html> (дата обращения: 15.02.2020).

³ Созданная в 2015 г. коалиция «Ниже 2» (Under2 Coalition) объединяет субнациональные образования, которые намерены сократить выбросы парниковых газов к 2050 г. на 80–95% по сравнению с 1990 г. или до уровня не более 2 тCO₂-э на душу населения. Сегодня в коалицию входит 205 субнациональных образований из 43 стран. Вместе они представляют 16% населения Земли (1,3 млрд человек) и 40% глобального ВВП (30 трлн долл.). – Юлкин М. Парижское соглашение: трудности перевода // Plus-one. – 2018. – 22.02. – Режим доступа: <https://plus-one.ru/ecology/parizhskoe-soglasenie-trudnosti-perevoda>

что превышает нынешние ежегодные выбросы ЕС; инициативы RE100¹ по сокращению выбросов к 2030 г., масштабы которых оцениваются в 1,9–4,0 ГтСО₂-э в год.

В целом 17 высокоэффективных международных партнерств, включая коалицию Under2 и RE100, могут сократить к 2030 г. выбросы ПГ на 18–21 ГтСО₂-э в год дополнительно к обязательствам, взятым участниками ПС, что составляет почти треть глобальных выбросов ПГ. Это позволит удержать повышение температуры в пределах 2 °С, а не 3 °С или более, которое может произойти при нынешнем уровне национальных обязательств в рамках ПС [Sub-national actors..., 2019].

Рассматривая роль государства в климатическом переходе на территориальном уровне, в связи с развитием гражданских инициатив, сотрудники Лувенского католического университета (Université catholique de Louvain, UCL) подчеркивают, что в современных условиях сферы «ответственности» между государством и рынком разделены. В то время как экономические субъекты стремятся к максимизации прибылей, роль государства заключается в том, чтобы направлять экономические действия с помощью регулирования; создавать условия для конкуренции, не искаженной внешними факторами; обеспечивать перераспределение доходов для уменьшения неравенства между социальными группами; предоставлять общественные блага, включая нерыночные услуги.

Вместе с тем современные гражданские инициативы (в частности, в рамках социальной и солидарной экономики), в той или иной степени наделенные полномочиями по отношению к капиталистической частной сфере и по отношению к государственному сектору, свидетельствуют о необходимости отказаться от представлений о дихотомии между государством и рынком и признать разнообразие институциональных механизмов.

Государство может создать благоприятный климат для развертывания инициатив «снизу» при изменении условий взаимодействия правительства, предприятий и гражданского общества. Оно также может выступить «посредником» или партнером коллективных действий граждан или субъектов гражданского общества, способствующих коллективному обучению, переходу от нор-

¹ RE100 – организация, включающая более 100 наиболее влиятельных компаний США, Европы, Индии и Китая, которые поставили своей целью использовать только ВИЭ и соблюдать полную климатическую защиту // Возобновляемая энергия и ресурсы. – Режим доступа: <http://renewnews.ru/re100/>

мативно-правового регулирования к политике поддержки инициатив и преобразованию социальных норм, ускоряющих переход к просоциальному и проэкологическому образу жизни. Таким образом, государство и общество будут взаимодополнять друг друга в процессе эколого-климатического перехода [Construire la transition par..., 2016, p. 5–6].

Современный бизнес также выражает озабоченность состоянием климата и заинтересованность в развитии низкоуглеродной экономики, о чем свидетельствует доклад Комиссии по энергетическим переходам (Energy Transitions Commission (ETC)), объединяющей представителей энергетического сектора, отраслей тяжелой промышленности, некоммерческих организаций, университетов из развитых и развивающихся стран. В докладе представлена система мер, обеспечивающих декарбонизацию ряда энергоемких и «грязных» отраслей тяжелой промышленности (цементной, сталелитейной, алюминиевой, производства пластмасс), а также наземного, морского и воздушного грузового транспорта. В настоящее время на эти сектора приходится 10 Гт (30%) глобальных выбросов CO₂. При сохранении существующей тенденции к 2050 г. они могут достичь 16 Гт [Mission Possible..., 2018, p. 5].

По оценке авторов доклада, с технической точки зрения декарбонизацию указанных секторов экономики можно провести к 2050 г. в развитых и к 2060 г. – в развивающихся странах, затратив менее 0,5% мирового ВВП. Однако для этого необходимо соблюдение следующих условий: ограничение роста спроса на первичные ресурсы; повышение энергоэффективности; применение технологий декарбонизации. К 2050 г. за счет повышения эффективности использования сырья и распространения циркулярной экономики (*économie circulaire*) глобальные выбросы CO₂ четырех перечисленных отраслей промышленности в целом могут сократиться на 40%, а в развитых странах – на 56% [Mission Possible..., 2018, p. 7].

Основными способами декарбонизации производства являются: использование водорода в качестве источника тепла или восстановителя; электрификация промышленных процессов; использование биомассы в качестве источника энергии для производства тепла, восстановителя (в производстве стали) или в качестве сырья (производство пластика); улавливание углерода в сочетании с его использованием или хранением. Выбор зависит от цены продажи безуглеродной энергии на местном уровне.

Затраты на декарбонизацию могут значительно сократиться за счет снижения затрат на ВИЭ; более широкого использования рециркуляции и повторного использования материалов в сочетании с оптимизацией логистических цепочек; эффекта обучения и экономии на масштабах будущих технологий.

Влияние декарбонизации на цены потребительских товаров будет отличаться от сектора к сектору, но в целом будет ограниченным. Декарбонизация увеличит цену автомобиля примерно на 160 евро, а цену литровой пластиковой бутылки – на 0,08 евро. В наибольшей степени стоимость для конечного потребителя повысится на воздушном транспорте [Mission Possible..., 2018, p. 15].

Оптимальный путь к нулевой углеродной экономике требует использования всех способов декарбонизации при доминирующей роли электрификации. К середине века электроэнергия составит почти 65% конечного спроса на энергию. Она также будет использоваться для получения значительной части водорода. Почти 85–90% электроэнергии будут поступать из ВИЭ или других нуль-углеродных источников, 10–15% – из биомассы или ископаемого топлива с улавливанием углерода [Mission Possible..., 2018, p. 18]. Однако в ходе декарбонизации отрасли и государства столкнутся с рядом технических, экономических и институциональных проблем. Поскольку большинство вариантов декарбонизации связаны с накладными расходами, рыночные силы не будут в достаточной мере стимулировать прогресс в этом направлении. Поэтому для создания стимулов для быстрой декарбонизации необходима политика, сочетающая меры регулирования и поддержки декарбонизации.

Перспективные климатические технологии

В конце 2019 г. по инициативе журнала Scientific American и Всемирного экономического форума группа ведущих экспертов в области технологий и инноваций определила десять наиболее значимых исследований 2019 г. Технологии оценивались по их потенциалу, социальной значимости и экономическим перспективам. Все десять разработок, вошедших в этот список, находятся на ранних этапах исследования. Три из этих технологий могут способствовать снижению выбросов ПГ и улучшению состояния ОС, в том числе следующие.

1. Производство биоразлагаемых пластиков¹ из целлюлозы или лигнина (сухого вещества растений), получаемых из непищевых растений (гигантского тростника, растущего на землях, не пригодных для выращивания пищевых культур, отходов древесины и побочных сельскохозяйственных продуктов), которые расщепляются под действием новых генно-инженерных ферментов. Биоразлагаемые пластики могут облегчить решение многих проблем, способствуя формированию циркулярной малоотходной экономики, в которой пластмасса извлекается из биомассы и вновь в нее преобразуется.

2. Разработка так называемых аварийно-стойких топлив для атомных реакторов, которые менее подвержены перегреву, а при перегреве не производят или производят очень мало водорода², а также новых систем «пассивной» безопасности; моделей «четвертого поколения» энергоблоков с использованием жидкого натрия или расплавленной соли вместо воды, что также устраняет возможность появления водорода. Ряд компаний уже начали внутреннее тестирование новых видов топлива. Усовершенствование топлива может помочь АЭС работать более эффективно и конкурировать с более дешевым природным газом и ВИЭ. Важной частью возрождения атомной энергетики является также развитие производства малых реакторов.

3. Накопители энергии. По прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), ветровые, солнечные и другие негидроэлектрические ВИЭ будут наиболее быстро растущим сегментом электроэнергетики в течение следующих двух лет. Но прерывистый характер действия этих источников вызывает растущий интерес к технологиям электроэнергетики, хранения, в частности к

¹ По данным Всемирного экономического форума, к 2050 г. производство пластика достигнет 1 млрд т. В настоящее время перерабатывается только 15% пластика. Большая часть оставшегося сжигается, оседает на свалках или просто выбрасывается и сохраняется в ОС сотни лет. Загрязнение океанов пластиковыми обломками также вызывает множество проблем – от гибели диких животных до высвобождения токсичных соединений [Top 10 Emerging Technologies, 2019].

² В настоящее время в атомной энергетике используются гранулы диоксида урана, уложенные внутри длинных цилиндрических стержней из сплава циркония, погруженных в воду. При перегревании цирконий может вступать в реакцию с водой, в результате чего выделяется водород, который может взорваться. Именно взрыв водорода послужил причиной аварии АЭС на острове Три-Майл в США в 1979 г. и в Фукусиме в Японии в 2011 г. [Top 10 Emerging Technologies, 2019].

литийионным батареям, которые в настоящее время могут работать в течение 2–4 часов. Применение литийионных аккумуляторов, вероятно, будет доминирующей технологией в течение следующих 5–10 лет. Их усовершенствование позволит хранить энергию от четырех до восьми часов, т.е. достаточно долго, чтобы, например, переместить использование солнечной энергии на вечерний пик спроса.

В будущем потребуются более эффективные накопители энергии. Потенциальные кандидаты – проточные батареи, перекачивающие жидкие электролиты, водородные топливные элементы и гравитационные накопители. Такие накопители работают по принципу, применяемому на гидроэлектростанциях, только вместо воды используются твердые материалы. Устройство накопителя поднимает грузы (бетонные блоки) на высоту (зарядка накопителя) и «сбрасывает» их вниз (преобразование потенциальной и кинетической энергии в электрическую) [Top 10 Emerging Technologies, 2019]. Помимо перечисленных, эффективным способом существенно снизить объем выбросов грязных предприятий сторонники геоинжиниринга¹ считают критически важными технологии улавливания и захоронения углерода (carbon capture and storage technology CCS).

В настоящее время в атмосферу ежегодно выбрасывает 50 млрд т ПГ, из которых 37 млрд т приходится на CO₂, а остальное в основном на метан. Чтобы избежать климатической катастрофы, к середине века потребуется ежегодно удалять из атмосферы около 10 млрд тонн выбросов CO₂. Это предполагается достичь за счет сокращения выбросов и использования технологий с отрицательными выбросами (negative-emissions technologies, NETs). При наличии достаточных инвестиций в НИОКР и соответствующей политической базы NETs могут стать мощным рычагом компенсации будущих выбросов. Microsoft планирует к 2030 г. стать полностью «углерод-отрицательной» компанией, а к 2050 г. удалить из ОС весь углерод, который выбросила с момента своего основания в 1975 г. либо напрямую, либо путем потребления электроэнергии. Финансирование этого проекта предполагается за счет повышения внутренней платы за выбросы углерода, использование электроэнергии и авиаперевозки. По словам президента компании Брэда Смита, эти планы «потребуют к 2030 г. создать тех-

¹ Геоинжиниринг – масштабные спланированные вмешательства в климатическую систему Земли. – *Прим. авт.*

нологии, которых сегодня не существует». К 2050 г. центры обработки данных Microsoft, офисы, кампусы и другие объекты инфраструктуры будут использовать полностью возобновляемые источники энергии. Программа также предусматривает создание фонда климатических инноваций, который направит 1 млрд долл. в течение следующих четырех лет на разработку технологии удаления углерода из атмосферы [Азарова, 2020].

В настоящее время уже применяются технологии захвата углерода из относительно концентрированных источников. Улавливание CO_2 на электростанции или другом точечном источнике обходится в 50–100 долл. за тонну. Но концентрация CO_2 в атмосфере на порядки ниже, чем выбросы из дымовой трубы электростанции. Поэтому при использовании этой технологии для извлечения CO_2 из атмосферы предполагаемые затраты составляют от 600 до 1000 долл. за тонну. Над увеличением мощности и снижением затрат на атмосферные системы извлечения CO_2 , называемые прямым захватом воздуха, чтобы сделать их коммерчески оправданными, работает целый ряд компаний, в частности Carbon Engineering, Climeworks и Global Thermostat. Climeworks, базирующаяся в Швейцарии, использует захваченный CO_2 в теплицах для ускорения роста овощей и других растений.

Другая технология семейства NETs – биоэнергетика, т.е. сжигание новых видов топлива. Крупнейшая электростанция Великобритании Drax мощностью 3900 МВт в Северном Йоркшире преобразовала четыре из шести энергоблоков для производства электроэнергии из биомассы вместо угля и начинает улавливать и связывать углерод на месте. Биоэнергетические системы используют недавно выращенную биомассу в качестве исходного сырья для производства электричества и тепла, сохраняя полученный углекислый газ навечно под землей.

Важно отметить, что сырье (древесина, энергетические культуры, такие как слоновая трава и травостой, сельскохозяйственные отходы или другие источники биомассы) выращено недавно. Это означает, что в нем сконцентрирован «новый» углерод из современной ОС. Сжигание новой биомассы в сочетании с улавливанием и поглощением выбросов делает биоэнергетический подход чистым, потому что он захватывает углерод дважды: сначала через фотосинтез, а затем через соответствующую технологию.

Ископаемые виды топлива, напротив, не включают современный углерод, даже если выбросы улавливаются¹.

Но недостаточно просто захватить CO_2 . Его необходимо где-то хранить. Хранение CO_2 под землей включает в себя сжатие его в сверхкритическую жидкость, а затем транспортировку в нагнетательную скважину. Сжатие газа позволяет переносить и выделять больше CO_2 , чем если бы он оставался в газообразной форме. В скважине CO_2 закачивается в непроницаемую геологическую формацию глубиной в 1 км или больше, где CO_2 остается в сверхкритической форме. Для хранения CO_2 подходят пористые и проницаемые породы-резервуары, такие как песчаник, известняк, доломит или смеси этих пород. Как правило, пластовые породы перекрываются непроницаемыми породами, такими как сланцы.

Учитывая, что глубокие геологические образования с необходимыми горными породами разбросаны по всему земному шару, в них в общей сложности можно хранить более 2 трлн т CO_2 . Этого вполне достаточно для существенного вклада в стратегии смягчения последствий выбросов ПГ. Улавливание углерода в сочетании с подземной секвестрацией может способствовать примерно 14%-ному сокращению выбросов CO_2 , необходимых для ограничения повышения температуры на 2 °C.

Широкое внедрение данного процесса связывания углерода таким способом тормозится необходимостью создания соответствующей масштабной инфраструктуры связывания и решения вопросов финансовой и юридической ответственности.

Нефтяная промышленность в течение многих лет использует аналогичный процесс, в ходе которого CO_2 впрыскивается в почти истощенные нефтяные месторождения для вытеснения остаточной нефти и природного газа на поверхность для переработки. В настоящее время в ходе процесса повышения нефтеотдачи пластов ежегодно закачивается около 64 млн т CO_2 . Около одной трети

¹ Противники этой технологии подчеркивают, что, несмотря на всю ее привлекательность, ее масштабное применение потребует примерно 3 млрд гектаров, что вдвое превышает площадь обрабатываемых в настоящее время земель на Земле. Следовательно, попытка реализации этой технологии невозможна без массового обезлесения и деградации почв тропического пояса южного полушария, где производится наиболее быстро растущая биомасса. Кроме того, по мере перевода сельскохозяйственных угодий на производство биомассы могут возрасти цены на продовольствие, что приведет к голоду и недоеданию, а разрушение жизненно важных экосистем лишит местные общины и коренные народы средств к существованию.

CO₂, используемого для впрыска, поступает из улавливаемых выбросов от таких источников, как электростанции и предприятия по переработке природного газа. Остальное поступает из природных источников. Поскольку часть CO₂, используемого для извлечения нефти, изолируется на нефтяных месторождениях, этот процесс считается успешным методом хранения CO₂. Но спрос на CO₂ для повышения нефтеотдачи слишком мал, чтобы остановить глобальное потепление.

Другим способом хранения углерода является его минерализация. Это новая технология NETs, которая вытягивает углекислый газ из воздуха и сохраняет его в постоянной форме карбонатных минералов, таких как кальцит или магнезит.

Углерод можно изолировать посредством минерализации тремя путями. Один из них, называемый *ex situ Carbon mineralization*, включает транспортировку горных пород к месту захвата CO₂ и последующую реакцию, которая может быть описана законами механики жидкостей. Другой процесс включает в себя взаимодействие CO₂-несущей жидкости или газа с отходами шахт, щелочными промышленными отходами или осадочными образованиями, богатыми реактивными фрагментами горных пород. Третий метод предполагает циркуляцию CO₂-содержащих газов через соответствующие реактивные горные породы под поверхностью Земли.

Такое предприятие работает в Исландии, вводя в литосферу CO₂, удаленный из атмосферы. Конечно, производительность таких систем не очень велика, но с течением времени они могут применяться в большем количестве регионов, что будет снижать концентрацию углекислого газа [Johson J., 2019].

NETs не избавляют мир от необходимости сокращать выбросы и, вероятно, всегда будут дороже, чем их ограничение. Однако они могут облегчить путь к достижению нуля выбросов к 2050 г., что необходимо для удержания глобального потепления менее чем 2 °C [Johson, 2019].

Еще одним из актуальных направлений трансформации экономики, способствующих ограничению изменений климата, становится переход на водородные технологии. Потенциал их распространения связан с такими особенностями, как отсутствие прямых выбросов ПГ и возможность получения водорода из низкоуглеродных источников энергии. В настоящее время в мире приняты около 50 госпрограмм и других документов, направленных на расширение использования водорода, в основном на транспорте. В соответствии с «водородной экономикой» будущее связано с

решением технических вопросов безопасного хранения в этой форме [Водородная экономика..., 2019, с. 2].

Существенный вклад в борьбу с изменением климата может внести машинное обучение в таких областях, как энергетика, транспорт, НИОКР, мониторинг выбросов CO₂.

Использование ВИЭ зависит от погоды и времени года, в связи с чем их трудно интегрировать в постоянно действующую сеть, обеспечивающую удовлетворение спроса на энергию. Обработывая в режиме реального времени данные о погоде, информацию о загрязнении или видеопотоки областей вокруг солнечных панелей, алгоритмы машинного обучения позволяют быстро предсказывать объем энергии, который будет сгенерирован. Кроме того, алгоритмы способны программировать и распределять производство энергии между различными электростанциями.

Сокращению загрязнения также способствует оптимизация деятельности транспорта, например, путем устранения излишних поездок или сокращения трафика. Уже сейчас алгоритмы, используемые Uber, позволяют оптимально «сводить» водителей и пассажиров. Эту же технологию можно использовать в интересах ОС, в том числе облегчая совместное пользование автомобилями.

В области НИОКР машинное обучение можно применять для прогнозирования поведения материалов на основе физических моделей и экспериментальных данных. Данная технология может привести к открытию новых материалов для производства более гибких и эффективных солнечных панелей, термоэлектрических материалов, а также способных превращать потерянное тепло в электричество, и абсорбирующих материалов для CO₂.

В следующем десятилетии ЕС готовится к развертыванию мониторинга CO₂ с помощью спутников, анализ данных с этих спутников с помощью технологии машинного обучения может обеспечить независимое и объективное измерение выбросов. Это не только предотвратит мошенничество с данными о выбросах, но и позволит странам определить «слабые места» борьбы с загрязнением. Кроме того, алгоритмы машинного обучения могут устанавливать корреляции между спутниковыми данными и источниками загрязнения.

В настоящее время, чтобы понять, как изменение климата повлияет на различные регионы в будущем, используются климатические модели. Совершенствование этих моделей с помощью нейронных сетей, способных устанавливать связи между несколь-

кими переменными, и анализа больших объемов данных позволит лучше понимать и представлять климатические процессы.

Страны, наиболее уязвимые к изменению климата, одновременно являются и самыми бедными. Технологии и машинное обучение позволит этим странам лучше реагировать на стихийные бедствия, анализируя в режиме реального времени аэрофотоснимки, спутниковые данные или даже публикации в социальных сетях. В свою очередь спасатели смогут узнать, где их помощь больше всего нужна [Bastien, 2019].

Заключение

Предотвращение повышения глобальной температуры на Земле более чем на полтора градуса от достигнутого уровня, безусловно, требует согласованных усилий всех стран. Один из наиболее очевидных и действенных путей решения этой проблемы – ускорение декарбонизации экономики за счет максимально быстрого перехода от традиционных методов производства энергии, связанных со сжиганием углеродного сырья, к возобновляемым источникам энергии (солнечным батареям, ветряным, приливным, геотермальным электростанциям и др.), а также развитие атомной энергетики.

Прилагаемые мировым сообществом усилия в этом направлении уже принесли определенные результаты: благодаря инновациям доля энергии солнца, ветра и приливов в европейском энергопотреблении выросла с 1,1% в 1980 г. до 5,2% в 1999 г. и 17% в 2016 г. В Швеции этот показатель уже превысил 50%, значительно повысилась эффективность традиционных технологий, выросло производство электро- и гибридных автомобилей. За последние 30 лет потребление топлива средним новым европейским автомобилем на 100 км пробега сократилось на треть, а потребление нефти и угля в ЕС упало с 1990 по 2018 г. на 9,2% и 48,4% соответственно при росте совокупного ВВП стран-участниц более чем в 2,7 раза [Иноземцев, 2019].

Конечно, это не значит, что проблема потепления решена, но направления движения определенно решаются. Хотя переход к модели низкоуглеродного роста требует преодоления множества трудностей технического, экономического, юридического и этического характера.

Список литературы

- Азарова М. Microsoft инвестирует миллиард долларов на очистку атмосферы от углерода // Naked science. – 2020. – 17.01. – Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/media/microsoft-investiruet-milliard-dollarov-na-ochistku-atmosfery-ot-ugleroda> (дата обращения: 11.01.2020).
- Буквич Р.М., Петрович Д.Р. Парниковый эффект и рыночные механизмы киотского протокола // MPRA. – Munich, 2017. – 27.01. – Paper N 76451. – Режим доступа: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/76451/1/MPRA_paper_76451.pdf (дата обращения: 11.01.2020).
- Водородная экономика: новые надежды на успех // Энергетический бюллетень. – Москва: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2019. – № 73. – Режим доступа: <https://nangs.org/analytics/analiticheskij-tsentr-pri-pravitelstve-rf-vodorodnaya-ekonomika-novye-nadezhdy-na-uspekhi-iyun-2019-pdf> (дата обращения: 30.12.2019).
- Данилов-Данильян В.И. Глобальная климатическая проблема и возможности прогнозирования // Век глобализации. – 2019. – № 4 (32). – Режим доступа: <http://www.intelros.ru/readroom/vek-globalizacii/> (дата обращения: 30.12.2019).
- Иноземцев В. Логика климата: почему глобальное потепление победят не экоктивисты // РБК. – 2019. – 08.10. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/opinions/society/08/10/2019/5d9b1afe9a79472b5252d614> (дата обращения: 30.12.2019).
- Карни М. Пятьдесят оттенков зеленого // Финансы и развитие. – Вашингтон: МВФ, 2019. – Декабрь. – С. 12–15. – Режим доступа: <https://www.imf.org/external/russian/pubs/ft/fandd/2019/12/pdf/a-new-sustainable-financial-system-to-stop-climate-change-carney.pdf> (дата обращения: 30.12.2019).
- Макаров И.А., Степанов И.А. Углеродное регулирование: варианты и вызовы для России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 6: Экономика. – Москва, 2017. – № 6. – С. 3–22. – Режим доступа: <https://www.econ.msu.ru/sys/raw.php?o=44759&p=attachment> (дата обращения: 30.12.2019).
- Перри И. Как оценить стоимость загрязнения окружающей среды? // Финансы и развитие. – Вашингтон: МВФ, 2019 а. – Декабрь. – С. 16–19. – Режим доступа: <https://www.imf.org/external/russian/pubs/ft/fandd/2019/12/pdf/fd1219r.pdf> (дата обращения: 30.12.2019).
- Перри И. Что такое взимание платы за выбросы углерода? // Финансы и развитие. – Вашингтон: МВФ, 2019 б. – Июнь. – С. 54–55. – Режим доступа: <https://www.imf.org/external/russian/pubs/ft/fandd/2019/06/pdf/fd0619r.pdf> (дата обращения: 30.12.2019).
- Пресс-релиз МГЭИК 2018/24/PR / МГЭИК. – 2018. – 08.10. – 5 с. – Режим доступа: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_ru.pdf (дата обращения: 30.12.2019).
- Риски реализации Парижского климатического соглашения для экономики и национальной безопасности России: Аналитический доклад. – Москва: ИПЕМ,

2016. – 114 с. – Режим доступа: http://www.ipem.ru/files/files/other/doklad_riski_realizacii_parizhskogo_klimaticheskogo_soglasheniya_dlya_ekonomiki_i_nacionalnoy_bezopasnosti_rossii.pdf (дата обращения: 07.01.2020).
- Синоптики сообщили об усилении признаков изменения климата // РБК. – 2019. – 23.09. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/rbcfreeneews/5d8801e79a794724724d5e9e> (дата обращения: 07.01.2020).
- Bastien L. Comment le Machine Learning lutte contre le réchauffement climatique // LeBigData. – 2019. – 25 juillet. – Mode of access: <https://www.lebigdata.fr/machine-learning-vs-changement-climatique> (дата обращения: 07.01.2020).
- Bridging the emissions gap – The role of nonstate and subnational actors: Pre-release version of a chapter of the forthcoming UN Environment Emissions Gap Report 2018. – Nairobi, 2018. – 27 p. – Mode of access: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26093/NonState_Emissions_Gap.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (дата обращения: 07.01.2020).
- Carbon Pricing Dashboard // Map & Data / World Bank. – 2017. – 01.12. – Mode of access: http://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data (дата обращения: 07.01.2020).
- Construire la transition par l'innovation locale: le cas de la Vallée de la Drôme. – 2016. – 30 p. – (LPTransition Working Paper; 11.01). – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/322724677_Construire_la_transition_par_l'innovation_locale_le_cas_de_la_Vallee_de_la_Drome (дата обращения: 07.01.2020).
- Fiscal policies for Paris climate strategies – From principle to practice // Climate Science 2019. IMF policy paper. – 2019. – May. – 105 p. – Mode of access: <https://www.imf.org/en/Publications/Policy-Papers/Issues/2019/05/01/Fiscal-Policies-for-Paris-Climate-Strategies-from-Principle-to-Practice-46826> (дата обращения: 08.01.2020).
- Future Earth & The Earth League / Pihl E., Martin M.A., Blome T., Hebden S., Jarzebski M.P.; Climate Science 2019. – Stockholm, 2019. – 40 p. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/339302927_10_New_Insights_in (дата обращения: 07.01.2020).
- Global Warming of 1.5 °C // IPCC special report. – 2019. – Mode of access: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (дата обращения: 08.01.2020).
- Greenhouse gas concentrations in atmosphere reach yet another high // WMO. – 2019. – 25.11. – Mode of access: https://www.chathamhouse.org/expert/comment/hitting-1.5-c-stark-climate-choices-governments?gclid=EAlaIqObChMivOe0woP55wIVQaQYCh18BQG2EAMYASAAEgLwhfD_BwE (дата обращения: 08.01.2020).
- Johson J. Capturing carbon: Can it save us? // Chemical & Engineering News. – 2019. – 25.02. – Mode of access: <https://cen.acs.org/environment/greenhouse-gases/Capturing-carbon-save-us/97/i8> (дата обращения: 08.01.2020).
- La planète en feu: Des incendies climatiques aux conflits politiques // WEF. – 2020. – 15.01. – Mode of access: <https://www.weforum.org/press/2020/01/burning-planet-climate-fires-and-political-flame-wars-rage> (дата обращения: 08.01.2020).

- Michallet B. Innovations et changement climatique: quel rôle pour les États? // BSI economics. – 2016. – 29.03. – Mode of access: <http://www.bsi-economics.org/606-innovations-et-changement-climatique-quel-role-pour-les-etats> (дата обращения: 08.01.2020).
- Mission Possible: Atteindre la neutralité carbone dans les secteurs difficiles à décarboner d'ici le milieu du siècle // Energy Transitions Commission. – 2018. – Novembre. – 46 p. – Mode of access: http://www.energy-transitions.org/sites/default/files/MissionPossible_report_summary_French.pdf (дата обращения: 08.01.2020).
- Nansen K. Who Benefits from False Climate Solutions? // Project syndicate. – 2019. – 13.09. – Mode of access: <https://www.project-syndicate.org/commentary/climate-change-geoengineering-false-solution-by-karin-nansen-2019-09> (дата обращения: 13.01.2020).
- Non-State and Subnational Action Guide // Initiative for Climate action transparency. – 2019. – June. – 143 p. – Mode of access: <https://climateactiontransparency.org/wp-content/uploads/2019/06/ICAT-Non-State-and-Subnational-Action-Guide-June-2019.pdf> (дата обращения: 13.01.2020).
- Ocampo J.A. L'économie de la crise climatique // Project syndicate. – 2018. – 19.10. – Mode of access: <https://www.project-syndicate.org/commentary/economics-of-climate-crisis-by-jose-antonio-ocampo-2018-10/french> (дата обращения: 13.01.2020).
- Prix du carbone: marchés et taxes, où en est-on? // Connaissance des énergies (электронный ресурс). – 2017. – 21.06. – Mode of access: <https://www.connaissancedesenergies.org/prix-du-carbone-marches-et-taxes-ou-en-est-170721> (дата обращения: 13.01.2020).
- Rapport de la Commission de Haut Niveau sur les Prix du Carbone. – 2017. – 10 p. – Mode of access: https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/rapport_prixducARBONE_final_29mai.pdf (дата обращения: 13.01.2020).
- Subnational actors show significant potential to close the emissions gap // The climate group. – 2019. – 18.09. – Mode of access: <https://www.theclimategroup.org/news/subnational-actors-show-significant-potential-close-emissions-gap> (дата обращения: 13.01.2020).
- Technical Summary. Report // IPCC. – 2018. – 25 p. – Mode of access: http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_ts.pdf (дата обращения: 13.01.2020).
- Top 10 Emerging Technologies of 2019 // Scientific American. – 2019. – 01.12. – Mode of access: <https://www.scientificamerican.com/article/top-10-emerging-technologies-of-2019/> (дата обращения: 13.01.2020).
- Touzard J.-M. Innover face au changement climatique // Innovations. – 2017. – N 54. – P. 5–13. – Mode of access: <https://www.cairn.info/revue-innovations-2017-3.htm> (дата обращения: 14.01.2020).
- Understanding the IPCC Special Report on 1.5 °C / World Meteorological Organization. – Geneva, 2018. – 12 p. – Mode of access: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5188 (дата обращения: 14.01.2020).