Основной целью научного исследования на весь период проведения научных исследований является создание системного инструментария (информационно-технологические, управленческие, инфраструктурные и математические методы и модели) для мониторинга и анализа процессов технологической и социально-экономической трансформации в условиях энергетических переходов.

Основным фактором развития общества прошлого века, в первую очередь, в промышленно развитых странах, было развитие энергетики на невозобновляемых источниках (нефть, газ, уголь). В настоящее время многие страны мира вступают в эпоху возобновляемых источников энергии, которые постепенно будут вытеснять ископаемые виды топлива — газ, нефть, уголь. Справедливым является постановка вопроса о грядущем энергопереходе. Среди основных предпосылок можно выделить:

* технологический прогресс;
* политика стран, направленная на защиту экологии и уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу.

Феномен энергетического перехода впервые стал предметом широкого обсуждения в августе 1990 г., когда в Сундсвалле (Швеция) состоялось Первое совещание Межправительственной группы экспертов (Intergovernmental Panel on Climate Change) по изменению климата. С тех пор состоялось 27 подобных встреч (Conference of the Parties – United Nations – СОР). Последняя такая встреча состоялась в ноябре 2022 г в Шарм-эль Шейхе (Египет). Возникает вполне закономерный вопрос о том, насколько оказались эффективными с точки зрения глобального перехода к новой «зеленой» энергетике эти встречи и насколько реально изменился баланс энергопотребления в пользу возобновляемых источников энергии (ВИЭ) за последние 30 лет.

Анализ статистических данных показывает, что мировое потребление энергии значительно выросло за этот период – потребление нефти выросло на 42%, потребление газа удвоилось, а потребление угля выросло на 73%. При этом доля нефти в мировом энергопотреблении снизилась с 40% до примерно 31%, доля угля колебалась, но оставалась примерно постоянной, а доля потребления газа за тот же период увеличилась с 20 до 25%. Вклад ветряной и солнечной энергии, хотя и резко вырос после 2010 г., но пока не достиг и 5%. Если же анализировать совокупную долю всех низкоуглеродных видов энергии, то их доля в мировом энергобалансе с 1994 г. выросла всего на 4 процентных пункта и составляет в настоящее время 18%. Основная доля падает на два источника: гидроэнергетику и ядерную. Если предположить, что эти, прямо заметим, не очень высокие темпы роста «зеленой» энергетики сохранятся и в будущем, то в 2030 г. их совокупная доля не превысит 25% в мировом энергобалансе, а в 2050 году - 43,6%. Последний показатель ниже порога в 50%, установленного на политическом уровне для развитых стран Евросоюза к 2050 г. Расчеты, проведенные сотрудниками научной лаборатории «Междисциплинарные исследования и образование по технологическим и экономическим проблемам энергетического перехода» показали, что только к 2075 году доля возобновляемых источников энергии + атомная энергия может достичь 50% (изложено членом научного коллектива Девезасом Т.К. в 2010 г.) или же «великий энергетический переход» с достижением целей Парижского соглашения будет возможен только к 2060 г., когда доля возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе достигнет 40-50% (изложено членом научного коллектива Акаевым А.А. в 2021 г.).

Проведенный анализ показал, что имеется ряд причин замедленных темпов энергетического перехода. Среди них необходимо выделить технологическое развитие, особенно связанное с развитием технологий энергоэффективности. Приведем три эмпирических факта. Первый: снижение удельного энергопотребления (производство ВВП по ППС 2017 г. на один кг.н.э. возросло с 6,1 долл. в 1990 г. до 8,3 долл. в 2014 г., или на 36,3%) согласно данным Международного энергетического агентства и Всемирного банка (IEA, WB). Второй: снижение потребление топлива легковыми и грузовыми автомобилями, например, в США с 1966 г. по 2017 г., т.е. за 50 лет, расстояние пробега при сжигании 1 галлона топлива увеличилась с 13,5 миль до 22 миль. Третий: потребление керосина на пассажирских самолетах на одно пассажиро-место сократилось с 1950 г. по 2010 г. с 120% до 30%. Таким образом, определён первый стилизованный факт: **эффективные технологии энергосбережения ведут себя как «новый источник энергии», что приводит к значительной задержке внедрения возобновляемых источников энергии.**

Другая причина находится в плоскости материалов, которые широко используются для создания технологий зеленой энергетики. Для производства фотоэлектрических элементов, ветряных мельниц и массового использования аккумуляторов необходимо использовать ряд критически важных материалов, многие из которых, как, например, редкоземельные элементы, до сих пор не использовались в больших масштабах. Эти же материалы используются для производства цифровой техники. Вот некоторые из них: Li, Cd, Cu, Ga, Ge, As, Ag, In, Ta, Pt, а также редкоземельные элементы – Ce, Nd, Pr, Dy, Tb, Gd, Lu. Цифры, связанные с новыми потребностями в материалах для зеленой энергетике, впечатляют. Например, для производства килограмма ванадия требуется восемь с половиной тонн породы, пятьдесят тонн для эквивалента галлия и 1200 тонн для одного килограмма одного из самых редких редкоземельных элементов — лютеция. В случае автомобильных аккумуляторов: автомобильный аккумулятор для электромобиля весит около 500 кг. В нем содержится 12 кг лития, 30 кг никеля, 20 кг марганца, 15 кг кобальта, 100 кг меди, 200 кг алюминия (производство крайне энергоемкое), стали и пластика. Внутри 6831 литий-ионный аккумулятор. Чтобы сделать один автомобильный аккумулятор, нужно переработать 10 тонн рассола для производства лития, 15 тонн руды для получения кобальта, 2 тонны руды для никеля и 12 тонн руды для меди. Всего для производства одного автомобильного аккумулятора добывается 200 тонн земной породы. Если умножить эти 200 тонн на количество электромобилей в мире (например, предположим, что весь мировой парк автомобилей является электрическим, а это порядка 2 млрд. автомобилей), то получим цифры, намного превышающие мировые мощности по добыче и производству (400 миллиардов тонн или 250 миллиардов кубометров земной породы). При этом необходимо отметить, что переработка и производство некоторых из этих материалов чрезвычайно загрязняют окружающую среду и вредны для здоровья (например, случаи с литием и графитом).

**В обобщенном виде, можно констатировать наличие второго стилизованного факта: существует ряд недостатков в разработке технологий производства материалов для низкоуглеродной энергетики (солнечные панели, ветряные мельницы, аккумуляторы для автомобилей) – для их производства требуется много энергии (и до сих пор они в основном производятся с использованием ископаемого топлива), что значительно разрушает окружающую среду и требует массового использования ограниченных и редких природных ресурсов. Одним из возможных путей преодоления проблемы ограниченных и редких природных ресурсов может стать переход на принципы экономики замкнутого цикла (circular economy), в которой повторное использование материалов и отходов становится неотъемлемой составной частью технологических процессов, что снижает общее потребление первичной энергии.**

Два стилизованных факта, приведенных выше, обусловили необходимость критического изучения разработанных к настоящему времени подходов в части построения моделей и сценариев энергетического перехода. Исходя из этого ключевыми научно-исследовательскими задачами реализации проекта в 2022 г. в соответствии с Планом работ научного исследования обозначены следующие:

1. Определение целевых моделей экономики с учётом энергетического перехода (низкоуглеродной экономики);
2. Разработка, анализ и оценка сценария перехода к модели низкоуглеродной экономики;
3. Разработка сценариев декарбонизации производства и гармонизации социально-экономического ландшафта общества;
4. Исследование роли биомассы в энергопереходе.

Ниже приведено описание выполненных работ, проведенных научных исследований и полученных результатов по поставленным на 2022 г. задачам.

1. **Система целевых моделей экономики с учётом энергетического перехода (низкоуглеродной экономики)**

Число наиболее известных в экспертном сообществе сценариев энергетического перехода, уверенно приближается к нескольким десяткам. В рамках исследования проведён системный анализ основных сценариев энергетического перехода.

Как показал проведенный научным коллективом анализ, в основе всех этих сценариев положены те или иные модели декарбонизации экономики и энергетических переходов. Все эти модели начали разрабатываться около 30 лет назад и прошли определенный эволюционный путь, поэтому можно выделить следующие три направления, в которых эволюционировали эти аналитические инструменты. Необходимо отметить, что разработка всех этих аналитических инструментов стала возможной только благодаря тесной кооперации человеческих ресурсов из таких сегментов экономики как энергетические агентства, университеты и консалтинговые компании.

Первое. Это модели, разработанные под эгидой Мирового энергетического агентства (IEA). В 1993 года была разработана Модель мировой энергетики (WEM) — крупномасштабная имитационная модель, предназначенная для воспроизведения того, как функционируют энергетические рынки. Десять лет спустя была разработана модель «Перспективы энергетических технологий» (ETP) — для использования параллельно с WEM. В 2021 году Агентство впервые приняло новый гибридный подход к моделированию, основанный на сильных сторонах обеих моделей, для разработки первого в мире всестороннего исследования того, как к 2050 году перейти к энергетической системе с нулевыми выбросами CO2. С тех пор IEA работает над созданием новой интегрированной системы моделирования: Глобальной модели энергетики и климата (GEC). По состоянию на 2022 год эта модель является основным инструментом, используемым для создания подробных долгосрочных сценариев по секторам и регионам мира в публикациях IEA.

Второе. Система моделей, объединенных в концепцию Nexus, для тестирования путей перехода к ресурсоэффективной и низкоуглеродной Европе. На данный момент времени концепция Nexus реализована в 12 тематических исследованиях различного масштаба: региональном, национальном, трансграничном, европейском и глобальном. Основными составляющими концепции являются 7 моделей, охватывающих такие компоненты, как различные виды энергии, вода, почва, климат, производство сельхозпродукции и макроэкономические изменения: E3ME (Energy-Environment-Economy macro-econometric model); MAGNET (Modular Applied General Equilibrium Tool); CAPRI (Common Agricultural Policy Regional Impact Analysis); IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment); OSeMOSYS (Open Source Energy Modelling System); MAgPIE (Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment); SWIM (Soil and Water Integrated Model).

Третье. Модели, ориентированные на интегрированное изучение взаимовлияния экономической активности, энергетических рынков и экологических изменений. В хронологическом порядке, самыми первыми были разработаны модели распределения рынка, которые легли в основу структуры TIMES – генератора экономических моделей для локальных, национальных, межрегиональных и глобальных энергетических систем. Генератор моделей TIMES сочетает в себе два разных, но взаимодополняющих подхода к моделированию энергетики: инженерно-технический и экономический и направлен на исследования возможных вариантов развития энергетики на основе различных сценариев. К таким же целевым моделям экономики, учитывающим энергетические переходы, необходимо отнести: модель PRIMES для оценки инвестиционных стратегий в различных промышленных секторах Евросоюза; имитационную модель с высоким уровнем технологической детализации NEMS (США) для оценки инвестиционных решений в технологические кластеры для энергоемких отраслей; модель CIMS (Канада) для оценки энергоэффективности и перехода на альтернативные виды топлива; модель FORECAST (Германия), учитывающую технологические сценарии и потенциал энергоэффективности в основных отраслях промышленности Германии.

Результаты, полученные на основе использования энергетической модели PRIMES и макроэкономической модели общего равновесия GEM-E3 для стран ЕС, свидетельствуют, что чем ниже потребление первичной энергии, тем выше достигнутые макроэкономические показатели с точки зрения роста ВВП и занятости. Однако эти результаты были подвергнуты сомнению со стороны экспертного сообщества, поскольку существует потенциальный конфликт в отношении сокращения энергопотребления, достижения экологических целей и поддержания уровня занятости и отсутствует интеграция экономики с окружающей средой, особенно в отношении обратной связи «окружающая среда – энергосистема - экономический рост». Кроме того, эти модели практически не уделяют внимания вопросу доступности энергии. Это ярко подтверждается ситуацией на энергетических рынках Европы после украинских событий в феврале 2022 г. Поэтому для преодоления противоречия между прогнозами ER2050 и теми сомнениями, которые высказывает экспертное сообщество, было предложено учитывать доступность энергии в экономических процессах, и отказаться от нереалистичного предположения об общем равновесии. В этой связи была предложена новая парадигма моделирования, сочетающая теоретические основы экологической экономики (EE) и посткейнсианской экономики (PKE), с одной стороны, и системной динамики (SD) и методологии затраты-выпуск (IO) с другой. Данная идея реализована в виде экономического модуля Интегрированной модели оценки (IAM) MEDEAS-Europe. PKE обеспечивает основу для режима экономического роста, ориентированного на спрос, с учетом неравновесности, EE устанавливает биофизические границы, к которым должна адаптироваться экономика, то есть доступность энергии. IO обеспечивает системную и отраслевую дезагрегированную картину прямых и косвенных носителей экономического процесса. SD реализует методологию экономического анализа как с точки зрения традиционных, так и неортодоксальных подходов. Основное преимущество такого подхода состоит в его способности фиксировать сложность системы, что позволяет модели лучше отразить социальные и биофизические ограничения экономики посредством нелинейных, прямых, косвенных и разнонаправленных связей.

Таким образом, проведено системное исследование созданных к настоящему времени различных моделей, описывающих процессы энергетического перехода, и предложена низкоуглеродная модель взаимосвязи энергетического перехода и динамики ВВП. Основываясь на всестороннем анализе перечисленных выше направлений развития математического инструментария, научным коллективом разработаны теоретические основы для построения собственной низкоуглеродной математической модели энергетического перехода. Разработанная научным коллективом «Низкоуглеродная модель энергетического перехода и динамики ВВП» обладает следующими отличительными особенностями:

* нелинейный и динамический характер;
* принцип стабилизации мирового душевого энергопотребления;
* симбиоз использования ядерной, водородной энергетики и ВИЭ как наиболее реальный сценарий осуществления глобального энергетического перехода;
* учет демографического фактора, как одного из ключевых, при определении сценариев энергетического перехода;
* учет технологий энергоэффективности при формировании сценариев декарбонизации.

Результатами исследований по данной задаче являются:

* Теоретические основы для построения низкоуглеродной модели энергетического перехода и динамики ВВП;
* Новые стилизованные факты, влияющие на скорость и широту энергетического перехода:
	+ эффективные технологии энергосбережения ведут себя как «новый источник энергии», что приводит к значительной задержке внедрения возобновляемых источников энергии;
	+ существует ряд недостатков в разработке технологий производства материалов для низкоуглеродной энергетики (солнечные панели, ветряные мельницы, аккумуляторы для автомобилей): для их производства требуется много энергии (и до сих пор они в основном производятся с использованием ископаемого топлива), что значительно разрушает окружающую среду и требует массового использования ограниченных и редких природных ресурсов.

**2. Сценарии перехода к модели низкоуглеродной экономики**

 На основе предложенной модели («Низкоуглеродная модель энергетического перехода и динамики ВВП») проведены пилотные расчеты и определены различные сценарии перехода к модели низкоуглеродной экономики, включая планирование снижения выбросов СО2 на горизонте до 2100 года для пяти стран. Выбор стран для верификации разработанной модели был осуществлен исходя из следующих соображений:

* они должны представлять разные географические регионы и находиться в разной степени зависимости от поставок российских энергоносителей;
* каждая страна должна иметь свою собственную стратегию декарбонизации;
* в энергобалансе этих стран должна быть разная композиционная составляющая по первичным источникам энергии в энергетическом балансе;
* наличие разной регуляторной базы для реализации программ декарбонизации.

Исходя из выше изложенного, для верификации модели в 2022 г. были выбраны 5 стран – Дания, Португалия, Казахстан, Турция, Индия. Дания и Португалия, являясь членами Евросоюза, подчиняют свои стратегии декарбонизации генеральным решениям Евросоюза. Турция самостоятельно формирует свою энергетическую стратегию, но зависит от внешних поставок энергоносителей (Россия, Казахстан, Азербайджан). Индия не зависит от поставок российских энергоносителей, большую роль в первичном энергопотреблении играет биомасса, а вся электроэнергия производится за счет использования угля. Казахстан полностью обеспечен собственными источниками энергии, но около 75% электроэнергии производится за счет угля.

 В рамках предложенной модели также построены прогнозы:

* динамики численности населения. С 2022 г. по 2100 г. прогнозируется рост численности населения Дании на 17%, Казахстана – на 62%, снижение численности населения в Португалии на 15 %, в Индии - на 8%, в Турции – на 12% при использовании для расчета прогнозной модели с запаздыванием, коррелирующей со средним вариантом прогноза ООН;
* роста мощностей солнечной, ветряной и ядерной энергетики. Рассматриваемые страны планируют в 2-3 раза увеличить мощности солнечной и ветряной энергетики, тем самым, развивая источники энергии, альтернативные углеводородным видам топлива. При этом Дания и Португалия отказались от использования атомной энергетики. Турция только начинает развивать атомную энергетику. Индия планирует увеличить мощности атомной энергетики к 2050 году в 2 раза;
* траектории антропогенных выбросов углекислого газа. К 2100 г при амбициозном сценарии с учетом использования для расчета прогнозной модели численности населения с запаздыванием, коррелирующей со средним вариантом прогноза ООН, в Дании снижение уровня антропогенных выбросов углекислого газа планируется на 93%, в Португалии – на 100%, в Казахстане – на 78%, в Индии – на 33%, в Турции – на 75%.
* накопления антропогенного углерода в атмосфере. К 2100 г при амбициозном сценарии с учетом использования для расчета прогнозной модели численности населения с запаздыванием, коррелирующей со средним вариантом прогноза ООН, в Дании и Португалии не планируется повышение уровня накопления антропогенного углерода в атмосфере. В Казахстане прогнозируется рост накопления антропогенного углерода в атмосфере в 3 раза (на 200%), в Индии – в 6 раз (на 500%), в Турции – в 3 раза (на 200%).

 Предложенная низкоуглеродная модель позволила также рассчитать для упомянутых выше стран:

* траектории роста реального энергопотребления с учётом коэффициента энергоэффективности. В период с 2022 г. по 2100 г. реальное энергопотребление E\_wr^((a)) (t) при средней скорости повышения энергоэффективности в Дании сократится на 29%, в Португалии – на 51%; в Казахстане – на 52%, в Турции – на 49%; для Индии этот показатель возрастет на 85%;
* траектории снижения объёмов потребления ископаемых углеводородных видов топлива при двух сценариях: консервативном и наиболее реалистичном (амбициозном). При амбициозном сценарии объёмы потребления ископаемых углеводородных видов топлива в Дании снизятся с 13 млн. до 2 млн. т.у.т./год (на 85%), в Индии – с 1100 млн. до 1050 млн. т.у.т./год (на 5%), в Турции – со 170 млн. до 70 млн. т.у.т./год (на 59%). Португалия планирует отказаться от использования ископаемых углеводородных видов топлива к 2100 г. Для Казахстана уголь останется основным топливом, но его доля снизится до 30%.

В самом общем виде использование предложенной модели показало, что расчет предельных объемов накопления антропогенного углерода в атмосфере задает динамику снижения потребления углеводородных источников энергии в целом.

Подход к моделированию энергоперехода, а также разработанные на его основе сценарии для отдельных стран, предложенные научным коллективом проекта, были доложены и обсуждены на следующих мероприятиях:

* Совместном казахстанско-российском семинаре «Технологические и экономические барьеры декарбонизации экономики», 19-20 сентября 2022 г., Астана, Казахстан;
* Международной конференции «Модели, сценарии, материалы и технологии для зеленого перехода» (Green Transition Landscape: models, scenarios, materials and technologies) (GT-2022)), 13-14 декабря 2022 г., Санкт-Петербург, РФ;

а также обсуждены и уточнены со специалистами в вопросах энергоперехода в рамках прохождения обучения членами научного коллектива по теме «Технологические, социальные и экономические факторы развития энергетики в условиях энергетических переходов», 28 ноября – 9 декабря 2022 г.

Результатами исследований по данной задаче являются:

* теоретические основы для построения собственной низкоуглеродной математической модели энергетического перехода;
* «Низкоуглеродная модель энергетического перехода и динамики ВВП»;
* Пилотные расчеты и сценарии перехода к модели низкоуглеродной экономики, включая планирование снижение выбросов СО2 на горизонте до 2100 года для пяти стран (Дания, Португалия, Казахстан, Индия, Турция);
* Прогнозы на горизонте до 2100 года для пяти стран (Дания, Португалия, Казахстан, Индия, Турция):
	+ динамики численности населения;
	+ роста мощностей солнечной, ветряной и ядерной энергетики;
	+ динамики антропогенных выбросов углекислого газа;
	+ динамики накопления антропогенного углерода в атмосфере;
* Траектория роста реального энергопотребления с учётом коэффициента энергоэффективности на горизонте до 2100 года для пяти стран (Дания, Португалия, Казахстан, Индия, Турция);
* Траектория снижения объёмов потребления ископаемых углеводородных видов топлива при двух сценариях: консервативном и наиболее реалистичном (амбициозном) на горизонте до 2100 года для пяти стран (Дания, Португалия, Казахстан, Индия, Турция).

**3.Сценарии декарбонизации производства и гармонизации социально-экономического ландшафта общества**

Важной составной частью проведенных исследований стал анализ основных сценариев декарбонизации производства (снижения СО2) и последствий энергетического перехода на состояние социально-экономического ландшафта общества.

Основным антропогенным источником парниковых газов является сжигание ископаемого топлива для получения электроэнергии и тепла, а также при использовании транспорта. Россия является четвертым мировым эмитентом парниковых газов, после Китая, США и Индии.

Основные сценарии декарбонизации производства (снижения СО2) можно разделить на 2 группы:

1. Минимизация эмиссии СО2 за счет использования экологически чистых технологий, предотвращающие выбросы СО2: замена ископаемого топлива на биотопливо, при сжигании и добычи которого выбросы СО2 минимальны; развитие биоэнергетики; развитие водородной энергетики; замена дизельного и бензинового автотранспорта на электромобили, автомобили на водородном топливе; снижение образования отходов и их захоронение, т.к. при перегнивании отходов происходит выбросы СО2; снижение выбросов СО2 от жвачных животных за счет использования ферментов в пищу.

2. Декарбонизация (улавливание) выбросов СО2:

* Декарбонизация производства (абсорбционные методы поглощения СО2 в промышленности) – поглощение диоксида углерода водой; поглощение растворами щелочей (NaOH, KOH); поглощение диоксида углерода растворами карбонатов; поглощение СО2 органическими поглотителями; низкотемпературная очистка колошниковых газов ацетоном.
* Специальные методы очистки газовых смесей от СО2 – электрохимический метод («сульфатный цикл»); вымораживание диоксида углерода; использование твёрдых поглотителей; каталитическая очистка; сорбционная очистка СО2; обработка СО2 ферментами для перевода в бикарбонаты; очистка СО2 с использованием мембранных технологий.

Декарбонизация глобальной экономики невозможна без масштабной реализации проектов по улавливанию, утилизации и хранению углерода (Carbon Capture, Utilization and Storage — CCUS). Россия с колоссальным ресурсом природных хранилищ может значительно снизить свой углеродный след за счет внедрения различных технологий и получить средства для финансирования энергоперехода. Российский потенциал снижения выбросов от применения технологии CCUS оценивается в 1,1 Гт CO2 в год.

Технологии, предлагаемые в рамках CCUS: закачки углекислого газа в пласт; организация карбоновых полигонов (высадка дополнительных лесонасаждений); организация водных карбоновых полигонов (культивирование микроводорослей).

Отрасли, для которых актуально внедрение технологий CCUS и экономически эффективно – это энергетика, нефтегазохимия, металлургия. Многие крупные компании работают над внедрением проектов CCUS, но четкого решения по выбору наилучшей технологии пока нет. И спрогнозировать развитие данных технологий на 2030 год достаточно сложно.

Важной составной частью сценариев декарбонизации являются Программы углеродной отчетности. В мире существует множество различных программ углеродной отчётности и организаций, занимающихся разработкой и внедрением методологий расчёта выбросов, как на международном, так и на национальном уровне. В России к таким инструментам относятся Федеральный закон от 02.07.2021 г. №296-ФЗ, Приказ Минприроды РФ от 29.06.2015 г. №300, Приказ Минприроды РФ от 30.06.2015 г. №330, ГОСТ ИСО 14064-1:2006, ГОСТ ИСО 14064-2:200. На международном уровне основным мировым стандартом учета выбросов парниковых газов является Greenhouse Gas Protocol, разрабатываемый Институтом мировых ресурсов и Всемирным деловым советом по устойчивому развитию. Еще одним важным международным инструментом учета парниковых выбросов является международный стандарт ISO 14064

На современном этапе углеродная отчетность – это добровольная процедура, но для отдельных секторов и компаний в нескольких странах является обязательной. Существуют различные программы углеродной отчетности и организации, которые разрабатывают и внедряют свои методики расчета. Независимая международная добровольная углеродная отчетность представлена разными компаниями и организациями, которые осуществляют различные задачи.

Важным дополнительным элементом сценариев декарбонизации являются различные методы снижения личного карбонового следа. Так, средний показатель выбросов СО2 на одного жителя для развитых стран - 58,6 тонны CO2-эквивалента в год. Это весьма значительная цифра при учете численности населения. Поэтому необходимо учитывать не только декарбонизацию производства, но декарбонизацию личного карбонового следа.

Глобальное потепление, вызываемое в том числе выбросами CO2, оказывает как прямое, так и косвенное влияние на социально-экономическое развитие мира. Изменения мирового климата привели к тому, что такие разрушительные явления, как ураганы, лесные пожары, засухи, наводнения и др. стали более частыми. Все это приводит к разрушению инфраструктуры, потере сельскохозяйственной продукции и даже гибели людей. Другим последствием климатических изменений становится дефицит источников питьевой воды. Уже сейчас, по крайней мере, один месяц в году от нехватки воды страдают 4 миллиарда человек, то есть более половины населения Земли. В развивающихся странах дефицит финансовых средств на создание и развитие водной инфраструктуры составляет около 40 триллионов долларов. По прогнозам UNICEF, в 2025 году около 50% населения будет жить в районах, характеризующихся острой нехваткой воды. В качестве косвенного влияния климатических изменений можно отметить такие эффекты, как нарушение цепочки поставок, необходимость закупки нового оборудования и разработки новых технологий для адаптации к новым климатическим условиям и т.д. Глобальное потепление также влияет на физическое состояние инфраструктуры: новые инвестиции будут необходимы для увеличения срока службы дорог, трубопроводов и транспорта в новых климатических условиях.

Если нынешняя тенденция сохранится, то экономические потери в последнем десятилетии XXI века составят 3,8 триллиона долларов США, причем ущерб будет распределен неравномерно между развитыми и развивающимися странами. Развивающиеся страны пострадают сильнее.

Достаточно сложно сделать точные прогнозы последствий широкого использования возобновляемой энергии, но ее неисчерпаемость обещает существенно стабилизировать состояние мировой энергетики. Постоянный рост доли возобновляемой энергетики позволит избежать чрезмерной концентрации населения и образования новых мегаполисов. К процессам и последствиям энергетического перехода следует адаптироваться заранее, что возможно только на основе прогнозов, базирующихся на реальных факторах этих изменений.

Если в XIX и начале XX веков гармонизация общества рассматривалась как взаимосвязь социальных, политических и экономических аспектов, то в конце XX и в начале XXI веков обязательно рассматривается экологическое состояние окружающей среды. Заявление о невозможности раздельного решения экологических, экономических и социальных проблем впервые прозвучало на первой Конференции Организации объединенных наций (ООН) по окружающей среде и развитию в Стокгольме, 1972 год. На конференции был сделан вывод о необходимости разработки долгосрочной стратегии развития, учитывающей взаимосвязь и взаимообусловленность современных проблем. Для разработки стратегии развития в 1983 году была создана Международная комиссия по окружающей среде и развитию (МКОСР). В процессе ее работы был предложен термин "устойчивое развитие" (sustainable development). Устойчивое развитие – это такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего поколения, не ставя под угрозу возможность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Одной из целей устойчивого развития является переход на низкоуглеродные источники энергии.

Как показывает проведенный научным коллективом анализ, сценарии гармонизации социально-экономического ландшафта отдельных стран находятся во взаимозависимости с выбранным сценарием энергоперехода. Последний в значительной степени обуславливается особенностями географического положения, численности, структуры и размещения населения, наличием запасов природных ресурсов, текущей структурой экономики, энергетического сектора (включая энергетическую инфраструктуру), инвестиционным потенциалом и другими факторами. В зависимости от выбранного сценария энергоперехода будут определены ведущие факторы, на развитии и/или реформировании которых будут сосредоточены основные усилия по гармонизации социально-экономического ландшафта страны. В качестве подобных факторов можно выделить такие, как: отраслевая структура экономики и уровень занятости; мобильность населения и отвечающие её потребностям городские, региональные, национальные транспортные системы; культура разумного потребления и переработки отходов; доступность ключевых энергосберегающих технологий (технологии строительства, электромобили, энергосберегающая бытовая техника и электроника и пр.); особенности ведения сельского хозяйства и землепользования в целом и др.

Исследования научного коллектива в области определения инструментов гармонизации социально-экономического ландшафта в условиях энергетического перехода позволили выделить два ключевых положения, игнорирование которых сопряжено с большими социально-экономическими потерями:

1. Наличие потенциального конфликта между сокращением энергопотребления и поддержанием уровня занятости, если не будет принята широкая программа создания новых рабочих мест и обеспечения доступа к различным источникам энергии.

2. Страны с высоким уровнем душевого ВВП обладают более высокой эффективностью использования энергии. Страны с уровнем душевого ВВП ниже среднего обладают большим экономическим потенциалом, но производят огромные выбросы углерода. В этих условиях гармонизация глобального социально-экономического ландшафта возможна при условии передачи передовых технологий энергоэффективности развивающимся странам на принципах полной доступности и максимальной открытости.

В данном контексте научным коллективом решена конкретная прикладная задача гармонизации социально-экономического ландшафта: разработан математический инструментарий для определения кадастровой стоимости как оценки рыночной стоимости земельных участков для сельскохозяйственного производства и размещения объектов зеленой энергетики. Предложен нетрадиционный подход к массовой оценке земельных участков при условии, что основным источником информации являются геоинформационные системы. Предложенный подход может рассматриваться как новый метод альтернативных оценок землепользования в целях гармонизации социально-экономического ландшафта при широком переходе к использованию альтернативных (возобновляемых) источников энергии. По результатам исследований в этом направлении опубликована статья Ilin I., Laskin M., Logacheva I., Sarygulov A., Tick A. Land Plots Evaluation for Agriculture and Green Energy Projects: How to Overcome the Conflict Using Mathematics. Mathematics 2022, 10, 4376. https://doi.org/10.3390/math10224376 (WoS, Q1).

На наш взгляд, гармонизация социально-экономического ландшафта общества состоит не только в наличии технологий, позволяющих использовать альтернативные виды энергии и снизить углеродный след, но и в социальных возможностях всех слоев населения использовать данные инновации. Например, существующие марки электромобилей и автомобилей на водородном топливе, к сожалению, могут позволить не все социальные слои населений. Во многих развивающихся странах данный вид транспорта совсем недоступен, как по экономическим соображениям, так и инфраструктурным (отсутствие зарядных устройств и дорожного покрытия). На современном этапе альтернативные виды энергии зачастую дороже традиционных и не доступны рядовому потребителю. Поэтому для гармонизация социально-экономического ландшафта общества в условиях энергоперехода необходимы дотации и поддержки на уровне государства:

* льготные ипотеки на строительство экожилья, покупки электро- и водородных автомобилей;
* дотации при продаже солнечных панелей и ветряных станций;
* выделение средств на разработку новых экономически целесообразных и экологически чистых технологий.

Данные подходы гармонизации социально-экономического ландшафта учитывают долгосрочные перспективы и рассчитаны на максимальный эколого-экономический эффект в условиях перехода к низкоуглеродной экономике. Помимо просветительской функции государство должно взять на себя функции доступности новых экологически чистых технологий для всех слоев населения.

Энергопереход открывает новые социально-экономические возможности. Для этого необходимо проводить основополагающие реформы, обеспечивающие перспективы реализации инновационной стратегии развития экономической и социальной сферы. В разрезе национальных экономик это повысит конкурентоспособность стран на международных рынках. Для реализации этого необходима разработка и внедрение системы стандартизации, а также мониторинга по оценке выбросов, системы налогов на выбросы парниковых газов для формирования источников финансирования в области энергоперехода.

Результатами исследований по данной задаче являются:

* Разработан курс лекций, который читается по дисциплине «Основы и принципы экономики замкнутого цикла» у магистров, обучающихся по магистерской программе «Экологическая безопасность в промышленности» по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность»;
* Разработан блок лекций по теме «Снижение карбонового следа. Декарбонизация», который читается магистрантам и аспирантам СПбПУ Петра Великого;
* Определены ключевые положения, влияющие на гармонизацию социально-экономического ландшафта;
* Решена конкретная прикладная задача гармонизации социально-экономического ландшафта: разработан математический инструментарий для определения кадастровой стоимости как оценки рыночной стоимости земельных участков для сельскохозяйственного производства и размещения объектов зеленой энергетики;
* Опубликованы статьи:
	+ Ilin I., Laskin M., Logacheva I., Sarygulov A., Tick A. Land Plots Evaluation for Agriculture and Green Energy Projects: How to Overcome the Conflict Using Mathematics. Mathematics 2022, 10, 4376. https://doi.org/10.3390/math10224376 (WoS, Q1);
	+ New energy approaches to the use of waste biosorbents of microalgae Chlorella kessleri /[Politaeva, N.A.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57874100400), [Illin, I.V.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57963944900), [Oparina, A.M.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204321212), [Donetskova, A.S.](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57963763700) [Povolzhskii Ekologicheskii Zhurnalthis link is disabled](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57874100400#disabled), 2022, 2022(3), pp. 322–335 (WoS);
	+ Ilinskiy, A.; Vinogradov, D.; Politaeva, N.; Badenko, V.; Ilin, I. Features of the Phytoremediation by Agricultural Crops of Heavy Metal Contaminated Soils. Agronomy 2023, 13, 127. https://doi.org/10.3390/ agronomy13010127 (WoS, Q1).

**4. Описание роли биомассы в энергопереходе**

Дефицит энергоносителей и проблемы охраны окружающей среды обусловили формирование нового научно-технического направления – биоэнергетики (получение энергии из биомассы). На современном этапе роль биомассы в энергопереходе очень велика и значительна. В развитых странах топливо из биомассы используют для транспорта и производства электроэнергии, что позволяет предотвратить выбросы СО2 и исключить использование природных ископаемых. Биомасса преобразуется в энергию с помощью различных термических, химических и биологических процессов. При этом можно получить бионефть, биодизель, биогаз, метан, биоводород.

В поле зрения исследовательской группы также находились вопросы, связанные с новыми источниками энергии, использование которых ранее было невозможно в силу нерешенности ряда технологических задач. Одним из таких перспективных источников энергии является водород. Водородная энергетика относится к одному из стратегических направлений развития Российской экономики. Курс на развитие российской водородной энергетики закреплен в Энергетической стратегии Российской Федерации (распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523), плане мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» (распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.10.2020 № 2634-р) и Концепции развития водородной энергетики (распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р). В этой связи коллектив лаборатории провел исследования о перспективах использования водорода, как альтернативы существующим углеводородным источникам.

В настоящее время происходят существенные изменения на геополитической карте мира, энергетика становится одним из ключевых элементов этих изменений. Страны Западной Европы, как и США и Япония, а это наиболее технологически развитые страны мира, в течение 5-10 лет могут полностью отказаться от закупок российских энергоносителей. Это означает начало технологической гонки за промышленное освоение новых, возобновляемых источников энергии. И здесь следует ожидать, что роль водорода, как нового источника энергии, может кардинально изменится.

Мировой опыт развития ВИЭ за последние 25 лет дает нам определенные сигналы о том, что ожидает страны, претендующие на широкое использование водорода, как реальной альтернативы традиционным ископаемым источникам энергии. Прежде всего, это необходимость решения многих технологических задач. Во-вторых, неизбежны периоды, скорее всего очень длительные, по прямому субсидированию сектора водородной энергетики. В-третьих, становление рынка водородной энергетики займет несколько десятилетий, что означает значительную нагрузку на национальные бюджеты на длительных временных горизонтах. Очевидно, что это могут позволить себе только развитые страны. Надо также учитывать то, что в отличие от энергии солнца и ветра, которые сразу преобразовывались в электрическую, водород надо еще получить, т.е. здесь присутствует дополнительный технологический передел. Как показали проведенные нами расчеты, водородная энергетика, начиная с 2040-х годов будет играть заметную роль в мировой ТЭБ, а с 2060-х годов – важную роль и, наконец, с 2080-х годов – одну из ключевых ролей. Поэтому в предстоящей гонке Россия не может быть пассивным наблюдателем, поскольку речь идет не только о новом источнике энергии, но и широком комплексе промышленных технологий (от новых материалов до систем управления), которые могут дать существенные конкурентные преимущества тем, кто ими будет владеть.

По мнению научного коллектива, наиболее перспективным методом производства водорода является получения водорода из биомассы. Существует 3 основных способа получения биоводорода из биомассы:

* метод 1 – путем использования биогаза из биомассы органических отходов, с последующим получением биоводорода за счет риформера и очистки попутного СО2. Научной группой участников проекта разработана технологическая инструкция на получение биоводорода из биомассы органических отходов и экспериментально получены результаты по % содержанию биоводорода в смеси методом паровой конверсии биогазов из биомассы органических отходов;
* метод 2 – получение биоводорода при термофильном анаэробном сбраживании биомассы органических отходов;
* метод 3 – получения биоводорода из биомассы микроводорослей и создания замкнутой биокаталитической системы получения водорода за счет биофотолиза воды.

Все способы получения биоводорода в настоящее время находятся на стадиях разработок, но в странах Евросоюза, США, Японии проводятся работы по получению водорода из биогазов и его использования в электроснабжении мелких потребителей.

Научным коллективом на 2023-2024 год планируется разработать несколько технологий получения энергии из биомассы (биодизель, биогаз, биоводород) и провести их технико-экономическое обоснование. Биоводород планируется получать по методу 2 из биомассы органических отходов методом термофильного анаэробного сбраживания. Биогаз с высоким содержанием метана планируется получать из биомассы органических отходов и микроводорослей методом анаэробного сбраживания при мезофильных условиях.

На данном этапе разработана Технологическая инструкция получения биодизеля 3-го поколения из биомассы микроводорослей методом экстракции и проведен выбор наилучшего штамма микроводорослей для получения биодизеля по разработанной технологической инструкции. Снижение себестоимости получения биодизеля планируется за счет использования метода этерификации биомассы микроводорослей после очистки воздуха от СО2 и очистки промышленных сточных вод. Научным коллективом планируется разработать метод очистки промышленных выбросов СО2 биомассой микроводорослей рода Chlorella.

Для минимизации негативного воздействия выбросов СО2 и других антропогенных факторов необходимо обеспечить очистку загрязненных вод и почв. Для этих целей научным коллективом проекта разработаны способы биологической очистки сточных вод и почв биомассой.

Для очистки сточных вод использовалась биомасса микроводорослей с последующим использованием отработанной биомассы в качестве дополнительного источника энергии. Такой источник энергии позволит снизить углеродный след за счет двух факторов: 1-замены традиционных источников энергии на более экологичный источник; 2-за счет минимизации выбросов вредных веществ в окружающую среду. Результаты данного исследования опубликованы в статье: Politaeva, N.A., Illin, I.V., Oparina, A.M., Donetskova, A.S. New energy approaches to the use of waste biosorbents of microalgae Chlorella kessleri // Povolzhskii Ekologicheskii Zhurnal, 2022, 2022(3), pp. 322–335, (WoS), в которой показано:

1 – использование биомассы микроводоросли C. kessleri для очистки сточных вод промышленных предприятий является целесообразным, в виду высокого процента эффективности очистки по ионам меди – 87% (при начальной концентрации ионов Cu2+ = 97 мг/л).

2 – в результате термогравиметрического анализа установлено, что при разложении биомассы C. kessleri после очистки модельного раствора воды, в интервале температур 335 – 500 °С происходит сильный экзотермический эффект с максимум в 500 °С, что позволяет дать рекомендации для ее использования в качестве источника энергии. Термогравиметрический анализ также позволил сделать вывод о содержании извлеченной меди в биомассе C. kessleri.

3 – установлено, что удельная теплота сгорания остаточной биомассы C. kessleri составила 21 674 кДж/кг, что не уступает удельной теплоте сгорания классических видов топлива.

Для очистки почв была использована биомасса растений (фиторемедиантов), которые продемонстрировали высокую способность извлекать загрязняющие вещества.

Результаты данного исследования опубликованы в статье Ilinskiy, A.; Vinogradov, D.; Politaeva, N.; Badenko, V.; Ilin, I. Features of the Phytoremediation by Agricultural Crops of Heavy Metal Contaminated Soils. Agronomy 2023, 13, 127. https://doi.org/10.3390/ agronomy13010127 (WoS, Q1), в которой:

* получены эмпирические зависимости содержания меди, цинка, свинца и кадмия в фитомассе исследуемых сельскохозяйственных культур от значения суммарного показателя загрязнения почвы;
* созданы цифровые модели фитоэкстракции растениями ионов тяжелых металлов;
* показана возможность снижения негативного воздействия от комплекса ионов тяжелых металлов на почвы умеренно опасного загрязнения фитомассой растений- фиторемедиантов.

Результатами исследований по данной задаче являются:

* Разработаны теоретические основы использования биомассы в энергопереходе;
* Разработаны теоретические основы для создания экономически эффективной технологии получения биогаза при анаэробном сбраживании органических отходов;
* Разработана технологическая инструкция на получение биоводорода из биомассы органических отходов и экспериментально получены результаты по % содержанию биоводорода в смеси методом паровой конверсии биогазов из биомассы органических отходов;
* Разработана технологическая инструкция на получение липидов для биодизеля методом экстракции из биомассы микроводорослей Chlorella и проведен выбор наилучшего штамма микроводорослей для получения биодизеля по разработанной инструкции;
* Разработаны теоретические основы использования биомассы микроводорослей для декарбонизации;
* Опубликованы статьи:
	+ Ilinskiy, A.; Vinogradov, D.; Politaeva, N.; Badenko, V.; Ilin, I. Features of the Phytoremediation by Agricultural Crops of Heavy Metal Contaminated Soils. Agronomy 2023, 13, 127. https://doi.org/10.3390/ agronomy13010127 (WoS, Q1)
	+ Акаев А.А., Рудской А.И., Кораблёв В.В., Сарыгулов А.И. Технологические и экономические барьеры роста водородной энергетики // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 12. С. 1133-1144 (WoS);

**5. Мастер-класс ведущего учёного для научного коллектива на тему «Сценарное моделирование энергетического перехода»**

19.08.2022, в соответствии с пунктом плана 1.6 Проведение мастер-класса ведущего учёного для научного коллектива на тему «Сценарное моделирование энергетического перехода», ведущий ученый Кампос Девезас Тессалено во время своего пребывания в Санкт-Петербурге провёл очный мастер-класс для студентов, аспирантов, сотрудников лаборатории «Междисциплинарные исследования и образование по технологическим и экономическим проблемам энергетического перехода».

Ведущий ученый дал общую сводку основных понятий: что такое сценарии и сценарное моделирование, цели и задачи его применения, возможности сценарного анализа в том числе для вопросов изменения климата и энергоперехода.

В качестве практического задания исследователям была поставлена задача сбора данных по 5 странам (Дания, Португалия, Казахстан, Индия, Турция). Результаты использованием материалов мастер-класса были применены научным коллективом при анализе существующих и формировании собственных сценариев энергоперехода.

**6. Закупка оборудования для лаборатории**

Для реализации задач исследования был закуплен Специализированный комплекс обработки и визуализации информации, в составе:

* Рабочая станция ПК (Core i9, RTX6000, SSD 2Tb, 2x16 ОЗУ) – 2 единицы;
* Интерактивная доска EliteBoard LR-65UL4IA (65", 3840x2160, 16:9, 350 кд/м, 1200:1, по горизонтали: 178°, по вертикали: 178°, 8 мс, дополнительно: HDMI, USB, Ethernet (RJ-45), Wi-Fi, черный, 40.0 кг, LR-65UL4IA) – 1 единица;
* Системный интегратор на основе TECLAST G27 Air, 27", Intel Core i7 12700, 16ГБ, 512ГБ SSD, Intel UHD Graphics 770, Windows 11 trial, черный [g27, air 1270016g512ru] – 2 единицы;
* Видео-панель Hyndai H-LED75GU7005, Салют ТВ, 75", Ultra HD 4K, черный – 1 единица;
* Монитор Mi Desktop Monitor 27" RMMNT27NF (BHR4975EU) – 10 единиц;
* МФУ Kyocera Ecosys M8130cidn (лазерный, печать цветная, максимальный формат A3, скорость ч/б печати 30 стр./мин, разъемы и средства связи: Ethernet (RJ-45), USB 2,0, вес 79 кг.) – 1 единица.

Закупленное Оборудование представляет собой специализированный комплекс обработки и визуализации информации, индивидуально комплектуемый под заказ и необходимый для реализации задач моделирования, анализа и прогнозирования сценариев энергетического перехода стран мира, заявленных в плане работ по Соглашению. На последующих этапах реализации Соглашения предусматривается наращивание вычислительных мощностей комплекса и приобретение сервера для хранения формируемой в ходе исследования базы данных. Создаваемые математические модели для разработки сценариев энергетического перехода основаны на многомерных построениях и требуют обработки больших объёмов данных.

В целом проведённое исследование показывает, что основные задачи, поставленные перед научным коллективом на 2022 г., решены в полном объёме, и созданы предпосылки для успешной реализации проекта «Технологические вызовы и социально-экономическая трансформация в условиях энергетических переходов» в 2023 г.