

УДК 911.9,338.001.36,574.4

ПОДХОДЫ К СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА В КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ

© 2023 г. С. А. Некрасов^а, *^аЦентральный экономико-математический институт РАН, Нахимовский просп., д. 47, Москва, 117418 Россия

*E-mail: san693@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2021 г.

После доработки 07.10.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

Проекты, направленные на достижение углеродной нейтральности, будут все в большей степени определять направление развития мировой экономики. Их реализация вызовет не только увеличение стоимости энергоснабжения, но и приведет к дополнительной добыче природных ископаемых и к росту спроса на электроэнергию. В этих условиях Российской Федерации следует скорректировать вектор своего развития и использовать природные ресурсы с учетом накопленного опыта решения сложных задач на основе системного подхода. Переход от фрагментарного подхода к комплексному использованию секвестрационной возможности лесоразведения и лесовосстановления является путем сохранения структурной устойчивости отечественной экономики. Показано, что результатом лесовосстановления и лесоразведения на территориях, эквивалентных занятым водохранилищами каскада Волжско-Камских ГЭС, станет увеличение поглощения углекислого газа по сравнению со снижением выбросов при замещении генерации газовых тепловых электростанций на гидроэнергию. Приведены численные оценки увеличения поглощения CO₂ при лесовосстановлении на территории древнего озера, находившегося в значительной части Молого-Шекснинской низины в конце ледникового периода, при изменении уровня Рыбинского водохранилища.

Ключевые слова: климатическая нейтральность, секвестрация парниковых газов, системный подход, лесовосстановление и лесоразведение, гидроэнергетика, солнечная и ветровая энергетика, Волжско-Камский каскад ГЭС.

DOI: 10.31857/S0024114823060050, EDN: EKFMVY

Изменение климата — одна из наиболее масштабных проблем, требующая объединения усилий всего человечества (IPCC, 2018; IEA, 2019). Актуальность ее решения возрастает с каждым годом. 2020 г. стал самым теплым за период наблюдений и для России, и в целом для суши земного шара. На территории России температура превысила норму (среднюю за базовый период 1961–1990 гг.) на 3.2°C¹. Несмотря на отсутствие единой точки зрения в мировом сообществе на причины изменения климата, официальная позиция ООН и большинства стран связывает этот вопрос с сокращением антропогенной эмиссии парниковых газов (Макаров, 2008).

Основой международного правового режима в сфере климата является Парижское соглашение. В этом документе сформулированы взаимоувязанные цели: удержать рост средней температуры на планете в пределах 2°C; обеспечить переход на

низкоуглеродный путь развития; переформатировать мировые финансы с тем, чтобы их распределение служило целям декарбонизации; пройти пик выбросов парниковых газов и приступить к их абсолютному сокращению с тем, чтобы во второй половине века выйти на баланс между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением из атмосферы. Более 120 стран заявили о том, что видят главной целью своей деятельности в климатической сфере полную декарбонизацию, “то есть ноль по выбросам за вычетом поглощения”². Достижение “климатической нейтральности” является целью не только государств и их союзов (Европейского союза, Японии — достижение “климатической нейтральности” к 2050 г., Китая — к 2060 г.), но и мировых корпораций Maersk, Volkswagen, в том числе таких нефтяных компаний, как Shell, Total, BP, Лукойл.

¹ Климатические особенности 2020 г. Новости Института глобального климата и экологии, январь 2021. [Электронный ресурс] <http://www.igce.ru/2021/01/климатические-особенности-2020-года-пре/> (дата обращения 19.11.21).

² Глобальная перестройка: мировое сообщество готовится обнулить вредное воздействие на климат. 22.01.21 НИУ ВШЭ [Электронный ресурс] <https://www.hse.ru/news/science/436158523.html> (дата обращения 19.11.21).

В 2021 г. в США начала использоваться принципиально новая лексика: изменение климата названо “экзистенциальной угрозой”, провозглашен общегосударственный подход к тому, чтобы поставить изменение климата в центр национальной безопасности и внешней политики, тем самым климатической повестке дан сверхвысокий статус и приоритет над остальными направлениями деятельности администрации США (Рогинко, 2021). Примером влияния задачи декарбонизации на мировую экономику является практически синхронная корректировка в различных странах исследований в области получения, транспортировки и использования водорода с целью замещения потребления органических энергоносителей. После утверждения водородной стратегии 2017 г. Японии, дорожной карты водородной экономики 2019 г. Южной Кореи, Национальной водородной стратегии 2019 г. Австралии были приняты Национальная водородная стратегия 2020 г. Германии, Национальная стратегия развития чистого водорода 2020 г. Франции, Государственная стратегия по водороду 2020 г. Голландии, водородная стратегия 2020 г. Норвегии, Национальная водородная стратегия 2020 г. Португалии и т.д. Водород предполагается получать паровой и парокислородной конверсией природного газа, газификацией угля, дополняя эти процессы утилизацией образующегося углекислого газа, электролизом воды. Несмотря на отсутствие единой точки зрения по вопросу наиболее эффективной технологии получения водорода, принятые программы объединяет комплексный подход: они предполагают замещение потребления ископаемых видов топлива не только в энергетике, но и в промышленности, на транспорте, в домохозяйствах. Реализация предусмотренных в них задач не только полностью преобразит сектор потребления энергетических ресурсов, но и потребует качественных изменений в энергомашиностроении, двигателестроении, изменит спрос на редкие и цветные металлы и т.д. В России в 2020 г. был утвержден План мероприятий (дорожная карта) по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г. Одной из его задач является “формирование в зарубежных странах репутации Российской Федерации как поставщика экологичного водорода, произведенного без выбросов двуокиси углерода” (План мероприятий, 2020). В результате информационная поддержка экологичности производства и минимизации негативного антропогенного влияния на окружающую среду будет основополагающим принципом экспортных поставок произведенного в России водорода.

Ускорение развития водородной энергетики дополняется не менее синхронным стартом достаточно капиталоемких проектов по секвестрации углекислого газа. Наименее затратной технологией улавливания CO_2 является его химическая

абсорбция из уходящих газов в энергетике. Удельные затраты секвестрации углекислого газа составляют более 50 долл./т без учета издержек на транспортировку (4 долл./т 1000 км) и захоронение CO_2 (8–23 долл./т) (Ключевые социально-экономические аспекты, 2019). Суммарные затраты на улавливание и захоронение CO_2 в пределах 70 долл./т для тепловых электростанций эквивалентны удорожанию природного газа на 130 долл./тыс. м^3 . Применение систем улавливания CO_2 уходящих газов парогазовых (ПГУ) энергоблоков, ПГУ с газификацией угля, угольных энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами позволит снизить выбросы CO_2 на 75–90%, но приведет к увеличению удельных капиталовложений на 50–90% и снижению на 6–8% КПД установок. В результате стоимость производства электроэнергии на этих электростанциях повысится на 30–65 долл./МВт ч (IEA, 2012). При улавливании 90% CO_2 на ПГУ его стоимость составит 53–56 долл./т. Эти показатели не включают в себя издержки на транспортировку (4 долл./т 1000 км) и захоронение CO_2 (8–23 долл./т) (Ключевые социально-экономические аспекты, 2019). Затраты на улавливание CO_2 в промышленности выше, чем в электроэнергетике, и составляют более 60–80 долл./т (Tan, 2009; Stéphenne, 2014; LEILAC, 2017; Paoluzzi et al., 2019).

Рыночным механизмом стимулирования оснащения производственных процессов промышленности и энергетики системами улавливания углекислого газа является повышение оплаты выбросов. Джозеф Стиглиц, Нобелевский лауреат по экономике 2001 г., предлагает повышение ставки углеродного налога в ближайшие 10 лет до 80 долл./т CO_2 (Strategy for International Climate Negotiations). Согласно докладу МГЭИК на Конференции ООН по климату в Катовице (декабрь 2018 г.), правительствам необходимо будет ввести эффективные цены на углерод от 135 до 5500 долл./т CO_2 к 2030 г., чтобы общее глобальное потепление было ниже 1.5°C (Рогинко, 2019). С призывом установить общий минимальный стандарт для определения цен на эмиссию парниковых газов к участникам Всемирного климатического саммита под эгидой ООН (COP26) 02.11.2021 обратился премьер-министр Канады Джастин Трюдо и предложил повысить к 2030 г. в Канаде платы за выброс 1 т парниковых газов до 170 канадских долларов, а также последовать ее примеру остальные страны³.

³ (Ввести единый стандарт платы за эмиссию парниковых газов предложил премьер Канады [Электронный ресурс] <https://www.hse.ru/news/science/436158523.html> https://oil-capital.ru/news/markets/02-11-2021/vvesti-edinyy-standart-platy-za-emissiyu-parnikovyh-gazov-predlozhit-premier-kanady?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop) (дата обращения 19.04.2021).

Но улавливания CO_2 только на промышленных и энергетических предприятиях не будет достаточным для компенсации антропогенного воздействия на окружающую среду. Для предотвращения дальнейшего роста концентрации углекислого газа в атмосфере в США рассматривается проект создания системы по улавливанию 36 млрд т CO_2 в год. Она будет состоять из 30000 станций прямого захвата (Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)) углекислого газа. Капитальные затраты строительства одной станции производительностью 1.2 млн т CO_2 в год достигнут 500 млн долл. На первоначальном этапе удельные затраты улавливания составят 94 долл. т/ CO_2 ⁴. Сравнительный анализ показал, что предложенная технология улавливания CO_2 , основанная на двухконтурной гидроксидно-карбонатной системе (Keith et al., 2018), является наименее капиталоемкой из множества способов прямого захвата углекислого газа из атмосферы (Realmonte et al., 2019). Лимитирующим фактором создания такой системы являются не затраты, а темпы, с которыми суммарная мощность DACCS может быть увеличена: максимальная скорость масштабирования DACCS составляет в среднем 1.5 млрд т CO_2 /год. Важным ограничивающим фактором являются имеющиеся мировые мощности по производству гидроксида калия. Уже на первоначальном этапе при запуске системы производительностью 10 млрд т CO_2 /год потребуется в 1.5 раза увеличить его производство в мире. Итогом реализации проектов по снижению негативного антропогенного влияния на окружающую среду станет не столько снижение этого влияния, но и формирование платежеспособного спроса на добычу калийных солей и их последующий электролиз для получения необходимых химических реагентов. В дополнение к наращиванию энергоемкого производства гидроксида калия для эксплуатации системы улавливания CO_2 в объеме 36 млрд т/год к 2100 г. потребуется около 50 ЭДЖ/год электроэнергии, что составляет более половины сегодняшнего общего объема ее производства. Помимо обеспечения процесса улавливания энергией и реагентами остается открытым вопрос надежности захоронения подобных объемов CO_2 и вероятности последующего его возврата в атмосферу. Несмотря на декларируемые цели, такой подход приведет к увеличению негативного экологического воздействия на окружающую среду.

Таким образом, все более настойчиво предлагаемые международным сообществом пути решения проблемы секвестрации парниковых газов подразумевают выполнение крайне капиталоем-

ких решений. В случае их реализации результатом некоторых из них станут негативные побочные эффекты, противоположные ожидаемому результату — снижению негативного антропогенного воздействия. Итоговым результатом движения в этом направлении станет перенаправление совокупности ресурсов в целый ряд проектов, позволяющих крупным финансово-промышленным структурам получить ожидаемые дивиденды от их реализации, а также существенное замедление социально-экономического развития в первую очередь тех стран, экономика которых ориентирована на увеличение товарного производства, а не на развитие сферы услуг.

Например, исходя из предлагаемых ограничений на выбросы парниковых газов, не менее 25% газовых и 70% угольных российских электростанций к 2050 г. должны быть оснащены системами улавливания CO_2 (Лагерева, Ханаева, 2010). Результатом следования в предлагаемом международной повесткой векторе станет удорожание энергоснабжения, что вызовет снижение структурной устойчивости отечественной экономики (Nekrasov, Grachev, 2020; Nekrasov, 2021). В этой связи следует отметить, что системный подход, предусматривающий взаимоувязку развития отраслей экономики, был характерной особенностью российской энергетики. При всей значимости энергетики ее доля в структуре сметы первого общенационального плана развития экономики — плана ГОЭЛРО — не была доминирующей. Доля капитальных затрат на электростанции и электросети составляла 7% (затраты на транспорт — 47%, обрабатывающую индустрию — 29% и добывающие отрасли — 17%) (Гвоздецкий, 2001). Это значение следует сопоставить со структурой затрат при развитии электроэнергетики в России в конце XIX века. Вложения в энергоустановки “Обществом электрического освещения 1886 г.” составляли 80%. К 1896 г. этой компанией было построено 12 наиболее крупных из 35 действовавших электростанций (Симонов, 2017). Технологические решения основного оборудования тепловых электростанций конца XIX и начала XX веков изменились незначительно. И более чем десятикратное различие соотношений в структуре капитальных затрат предприятия, основной задачей которого являлось получение прибыли и плана ГОЭЛРО, свидетельствует о направленности последнего на развитие народного хозяйства как единого целого.

В 1990-е гг. системное развитие экономики трансформировалось в максимизацию результатов экономической деятельности, получивших самостоятельность в результате приватизации новых экономических объектов. Отечественная экономика стала фрагментарной. Фрагментарность экономики ограничивает конкуренцию и провоцирует инфляцию. Для фрагментированной экономики

⁴ The device that reverses CO2 emissions. 12.03.21. [Электронный ресурс] <https://www.bbc.com/future/article/20210310-the-trillion-dollar-plan-to-capture-co2> (дата обращения 20.11.21).

характерны и низкий уровень взаимного доверия агентов, и вытекающая отсюда несклонность к долговременным инвестициям. В такой экономике низка эффективность использования всех видов ресурсов, поскольку фрагментарность препятствует их перетоку в точку наивысшего спроса (Клейнер, 2016). По истечении 30 лет проведения следующих друг за другом реформ, по мнению разработчика принципов построения и функционирования автоматизированной системы плановых расчетов, создаваемой в Госплане СССР⁵, а в последующем экс-министра экономики и заместителя председателя правления РАО «ЕЭС России» Я.М. Уринсона, необходима разработка нового целевого видения развития не только энергетики, но и связанных с потреблением электроэнергии областей (Уринсон и др., 2020). И сегодня системный подход в неменьшей мере необходим для снижения негативного антропогенного влияния на окружающую среду.

Россия обладает значительным природным потенциалом, квалифицированная реализация которого способна в значительной степени компенсировать негативное антропогенное воздействие. Естественные природные процессы ведут к изменению содержания парниковых газов. И научно обоснованное использование территорий для поглощения CO₂ должно стать дополнительным фактором в принятии решений о реализации новых проектов и о продолжении функционирования действующих предприятий.

Целью статьи является обоснование целесообразности перехода к системному подходу использования способности секвестрации углекислого газа территорий для дальнейшего развития лесоводства и энергетики, направленного на снижение издержек перехода России к климатической нейтральности.

Координация развития энергетики и лесоводства обладает значительным потенциалом повышения эффективности использования природного потенциала по поглощению углекислого газа, так как источником более 80% эмиссии парниковых газов являются предприятия энергетики, а доминирующая доля в регулировании наземного углеродного баланса приходится на леса. Они содержат 86% углерода Земли, а лесные почвы включают в себя 73% углерода, имеющегося во всех почвах планеты. В биомассе лесов содержится в 1.5 раза, а в лесном гумусе в 4 раза больше углерода, чем в атмосфере (Одум, 1975). Особенностью последних десятилетий является сокращение площади лесов. Этот негативный процесс происходит не только в развивающихся, но и в развитых странах. Например, в Северной Амери-

ке, где в 2001–2014 гг. только в Северной Каролине более 160 км² территории в результате продвижения вглубь материка береговой линии океана изменилось от прибрежного леса к переходнопризрачному лесу, характеризующемуся солеустойчивыми кустарниками и травянистыми растениями (Fabio, 2020). Согласно отчету (Глобальная оценка лесных ресурсов, 2021), общая площадь лесов в мире продолжает сокращаться, и в 1990–2020 гг. мир потерял более 4.38% лесов (178 млн га). В итоге от обезлесения мир теряет экологических услуг на сумму 2–5 трлн долл. в год (Бобылев, Захаров, 2015).

В отличие от уменьшения площади лесов в мире, в России ежегодная абсорбция парниковых газов, связанных с землепользованием и лесным хозяйством (ЗИЗЛХ), повысилась в 1990–2017 гг. на 500 млн т CO₂ (Четвертый двухгодичный доклад, 2019). Но эта оценка не учитывает вклад ряда происходящих процессов. Например, леса на сельскохозяйственных землях в Национальном кадастре парниковых газов относятся к сельскохозяйственным угодьям и повышение поглощения ими не относится к разделу лесов. Но при этом происходит возрастание поглощающей емкости парниковых газов в результате естественного лесовосстановления на заброшенных сельскохозяйственных землях (Kurganova et al., 2015). Начиная с 1990 г. 38 млн га пахотных земель России было выведено из сельскохозяйственного оборота. На этих территориях восстанавливается естественный зональный тип почвообразования с последовательной сменой биогеоценозов в ряду: агроценоз—залежь—лес (Таллер и др., 2019). В то же время противоположный процесс — уничтожение лесов с последующим использованием освобожденных территорий для сельского хозяйства и увеличения городских агломераций — является значимым фактором снижения площади лесов в мире. Не менее дискуссионным является вопрос разграничения вклада в изменение поглощения углекислого газа в результате самозарастания территории, в том числе ранее используемой в сельскохозяйственном обороте, лесом и за счет искусственного лесовосстановления (Коротков и др., 2021).

Но наиболее значимой причиной роста объемов поглощения CO₂ является повышение аккумуляющей способности уже существующих лесов, в том числе в результате снижения объемов рубок после 1990 г. Расчеты, выполненные на основе информации государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) и государственного лесного реестра Российской Федерации (ГЛР), показывают, что с 1990 по 2008 г. чистая продуктивность (разность между чистой первичной продуктивностью растений и гетеротрофным дыханием) лесов России ежегодно росла на 0.48% (Федоров, 2014).

⁵ Уринсон Я.М. Совершенствование технологии народнохозяйственного планирования. М.: Экономика, 1986. 197 с.

Аналогичная динамика наблюдается и в Беларуси. Согласно Национальному плану действий по увеличению абсорбции парниковых газов поглотителями (леса, болота) на период до 2030 г., в 1945–2017 гг. увеличилась общая площадь лесного фонда в 1.55 раза, продуктивность (средний запас насаждений) – в 3.1 раза (с 70 до 215 м³/га⁻¹) (Национальный план действий, 2019).

Одна из проблем ЗИЗЛХ России заключается в том, что, несмотря на ведение расчетов изменений поглощающей способности парниковых газов на основе данных государственного лесного реестра (ГЛР), среднеквадратическая ошибка определения запаса древесины в материалах лесоустройства составляет от ± 15 до $\pm 30\%$, а систематические ошибки допускаются до $\pm 10\%$ (Филипчук и др., 2020). Например, в Хабаровском крае в 2020 г. средний запас древесины, по данным государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), составил 126.2 м³/га⁻¹, по данным ГЛР, – 98.9 м³/га⁻¹. (Филипчук, Малышева, 2020). При столь высоких погрешностях исходных данных любой расчет изменений объемов связывания CO₂ за несколько лет является практически недоказуемым. Результатом этого противоречия является невозможность монетизации Россией своих естественных природных возможностей. За 1990–2019 гг. известно незначительное число прецедентов монетизации Российской Федерацией своего вклада в снижение негативного антропогенного воздействия, например, продажа ПАО “Газпром нефть” японским компаниям Mitsubishi и Nippon Oil углеродных квот на сумму около 3.5 млн евро в 2010 г.⁶ Сам факт существования решения данной задачи с получением итогового финансового результата свидетельствует о потенциальной возможности привлечения в отечественную экономику финансовых ресурсов в рамках предлагаемого международного подхода. Но столь незначительные объемы за прошедшее тридцатилетие свидетельствуют о практической блокировке коммерческих инициатив, исходящих от действующих хозяйствующих субъектов.

Поэтому наряду с продолжением работы по гармонизации российской и международной систем учета состояния ЗИЗЛХ необходимо реализовывать локальные проекты лесонасаждения и лесовосстановления. Согласно прогнозам Ассоциации ответственного инвестирования (United Nations Principles for Responsible Investment (UNPRI)), проекты лесонасаждения и лесовосстановления к 2050 г. достигнут в мире 350 млн га, а связанные с лесами природные решения обеспечат к 2050 г. ежегодный доход в размере 800 млрд долл. (UNPRI, 2019). Восстановлению лесов как меха-

низму сдерживания роста концентрации углекислого газа посвящены исследования Bastin et al. (2019), Lewis et al. (2019).

По данным Люри с соавторами (Люри и др., 2010), на суглинистых почвах южной тайги России следует ожидать примерно к 2030 г. после начала восстановления леса стабилизации общих запасов углерода в экосистеме на уровне примерно 35 кг С/м². Максимальная скорость накопления углерода приходится на время активного формирования древесного яруса и колеблется в пределах 0.22–0.26 кг С/м² в год. Через 80–100 лет накопление углерода составляет 27.6 кг С/м² (Рыжкова и др., 2015). Таким образом, поглощающая способность проектов восстановления лесов на суглинистых почвах в пересчете на углекислый газ на протяжении 80–100 лет равна 0.81–0.95 кг/м² в год. Этот показатель изменяется для различных климатических зон, но в первом приближении на него можно ориентироваться при получении оценок изменения поглощающей способности территорий южной тайги при реализации на ней проектов лесоразведения и лесовосстановления.

Проведем сопоставление данной величины с удельными показателями производственной деятельности безуглеродной энергетики: солнечных, ветровых электростанций (СЭС, ВЭС) (табл. 1) и ГЭС (табл. 2). Вклад в снижение эмиссии парниковых газов, считающихся безуглеродными источниками, будем оценивать из предположения, что они замещают природный газ. Его сжигание при производстве электроэнергии без последующей секвестрации углекислого газа на тепловых электростанциях (ТЭС) приводит к выбросу 462 г CO₂/кВт ч (Черняховская, 2017).

Поглощение CO₂ лесами, расположенными на эквивалентной с занимаемой СЭС территории, составляет не более 3% и в некоторых случаях не превышает 2.5% по сравнению со снижением эмиссии углекислого газа в результате замещения на солнечную энергетику генерации газовых ТЭС. Для ВЭС диапазон этих значений составляет 8–10%.

Можно видеть, что ГЭС производят значительно меньше электроэнергии на единицу площади по сравнению с СЭС и ВЭС. Только стечение совокупности природных факторов, как правило, в горных районах обеспечивает гидроэнергетике сопоставимое с СЭС удельное производство электроэнергии. Одним из таких уникальных мест является ГЭС “Три ущелья” в КНР (табл. 2). Помимо задействования гидравлического потенциала столь редких природных мест, перспективным является строительство деривационных ГЭС. С плотинными электростанциями равнинных рек и связанной с ними территорий затопления ситуация качественно иная. Так, поглощающая способность территории водохранилищ Волжско-Камского каскада ГЭС в случае гипотетического за-

⁶ На пути к чистым доходам: что несет России Парижское соглашение. АКРА. 18.11.19. [Электронный ресурс] URL: <https://www.acra-ratings.ru/research/1518>.

Таблица 1. Снижение выбросов CO₂ в результате замещения солнечными и ветровыми электростанциями сжигания природного газа на ТЭС

Название электростанции (год строительства)	Годовой объем производства электроэнергии, млн кВт ч	Площадь электростанции, км ²	Удельное производство электроэнергии, кВт ч/м ² в год	Снижение выбросов CO ₂ в результате замещения сжигания природного газа, кг CO ₂ /м ² в год
Перовская СЭС, Крым (2011 г.)	132.5	2.1	63.1	29.2
Copper Mountain Solar Facility СЭС, США (2016 г.)	1291	16.2	79.7	36.8
Адыгейская ВЭС (2019 г.)	354	16.4	21.6	10.0
Shepherds Flat ВЭС, США (2009 г.)	1740	78	22.3	10.3

Примечание. Составлено по данным открытых источников.

Таблица 2. Снижение выбросов CO₂ в результате замещения гидроэнергетикой сжигания природного газа на ТЭС

Название электростанции год ввода плотины ГЭС	Производство электроэнергии, млн кВт ч в год	Площадь водохранилища, км ²	Удельное производство электроэнергии, кВт ч/м ² в год	Снижение выбросов CO ₂ в результате замещения сжигания природного газа, кг CO ₂ /м ² в год
Угличская ГЭС (1940 г.)	240	249	0.96	0.45
Рыбинская ГЭС (1941 г.)	935	4580	0.20	0.09
Нижегородская ГЭС (1955 г.)	1513	1590	0.95	0.44
Чебоксарская ГЭС (1980 г.)	2100	2190	0.96	0.44
Камская ГЭС (1954 г.)	1700	1910	0.89	0.41
Воткинская ГЭС (1961 г.)	2280	1120	2.04	0.94
Нижекамская ГЭС (1979 г.)	1280	1370	0.93	0.43
Жигулевская ГЭС (1955 г.)	10370	6450	1.61	0.74
Саратовская ГЭС (1967 г.)	5400	1831	2.95	1.36
Волжская ГЭС (1958 г.)	11500	3117	3.69	1.70
Итого по Волжско-Камскому каскаду ГЭС	37318	24407	1.53	0.71
Крапивинская ГЭС (начало строительства 1976 г.)	1895	670	2.83	1.31
Братская ГЭС (1961 г.)	22600	5480	4.12	1.91
Бурейская ГЭС (2003 г.)	7100	750	9.47	4.37
Три ущелья ГЭС, Китай (2003 г.)	98800	1045	94.55	43.68

Примечание. Составлено на основе данных открытых источников. Курсивом выделены показатели, не превышающие значения поглощающей способности проектов лесоразведения и лесовосстановления.

нения ее лесами будет по меньшей мере не ниже, чем сокращение эмиссии углекислого газа в результате производства электроэнергии на каскаде ГЭС, эквивалентного генерации газовых ТЭС. Сопоставление удельных результатов производственной деятельности ГЭС Волги и Камы, расположенных выше плотины Жигулевского водохранилища, с поглощающей способностью проектов лесовосстановления и лесоразведения на эквивалентной территории указывает на возрас-

тание значимости замещения равнинных водохранилищ на новые леса по мере роста цен на единицу выбросов парниковых газов.

Переход от использования территории для производства гидроэнергии к разведению и восстановлению на ней леса с учетом обязательств, следующих из вступления России в Парижское соглашение, по сути является продолжением системного подхода к развитию страны. Альтернативой капиталоемким проектам секвестрации уг-

лекислового газа в промышленности и энергетике, результатом реализации которых в случае движения в предлагаемом мейнстриме станет удорожание энергоснабжения, является концентрация усилий на проектах лесовосстановления и лесоразведения. Данное утверждение особенно актуально для Российской Федерации в связи с высокой энергоемкостью ее экономики и более высокими затратами на энергообеспечение в силу климатических особенностей. Поэтому для сохранения структурной устойчивости отечественной экономики (способности функционировать при изменении внешних воздействий) необходимо использовать альтернативные способы выполнения обязательств по достижению климатической нейтральности.

Одним из следствий полученного вывода является переосмысление оценки проектов лесовосстановления и лесоразведения на различных территориях, в том числе и на освобождаемых при снижении уровня водохранилищ. Результативность использования их территории для производства электроэнергии приводит к выводу о необходимости пересмотра как завершения проектов строительства ГЭС, например, Крапивинской ГЭС в Кемеровской области, так и дальнейшей эксплуатации действующих станций, например, проведения сравнения двух вариантов: продолжения функционирования Рыбинской ГЭС при нормальном подпорном уровне (НПУ) 102 м и в новом режиме на отметке 98 м.

Снижение уровня Рыбинского водохранилища приведет к сокращению его площади на 2380 км² и уменьшению среднегодового производства электроэнергии на 340 млн кВт ч/год. Уровень 98 м был первоначально выбран при проектировании Рыбинского гидроузла. Он был на 3 м выше максимального уровня паводков, предполагал затопление 2500 км² и обеспечивал создание энергетической базы для интенсификации индустриального развития центральных и частично отдаленных районов СССР, гарантированный глубоководный транспортный путь, соединяющий пять морей, улучшение водоснабжения населения и промышленности, использование водных ресурсов для ирригации засушливых сельскохозяйственных угодий (Бурдин, 2011). Решение о повышении НПУ до 102 м было принято с целью увеличения производства электроэнергии. Сегодня значимость производства электроэнергии на Рыбинской ГЭС существенно снизилась по сравнению с 1940–1970 гг., и годовые изменения генерации ТЭС, расположенных вблизи Рыбинского водохранилища, сопоставимы со среднегодовой генерацией Рыбинской ГЭС, а эффективность использования их установленной мощности ниже среднероссийского уровня. Например, в 2020 г. снижение выработки на Костромской ГРЭС составило 5648 млн кВт ч. В

2020 г. на этой станции было произведено 9635 млн кВт ч, в 2019 г. — 15283 млн кВт ч, в 2018 г. — 13210 млн кВт. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) Костромской ГРЭС составил в 2018 г. — 41.9%, в 2019 г. — 48.5%, в 2020 г. — 30.5%⁷, а КИУМ Череповецкой ГРЭС в 2018 г. — 33.2%, в 2019 г. — 35.5%, в 2020 г. — 30%⁸.

Результатом снижения НПУ Рыбинского водохранилища станет естественное восстановление лесов на территории в 2380 км², как это и произошло при исчезновении древнего озера, находившегося в значительной части Молого-Шекснинской низины в конце ледникового периода. Связывание углерода лесами на этой территории составит 84 млн т, в том числе 66 млн т к 100 году. Процесс будет происходить со скоростью 0.66 млн т углерода в год или в пересчете на CO₂ — 2.4 млн т в год. При цене 58 евро/т CO₂ по состоянию на 30.10.21 возможные ежегодные платежи за поглощение углекислого газа (139 млн евро/год) более чем в 15 раз будут превышать сокращение выручки на оптовом рынке электрической энергии и мощности от уменьшения производства электроэнергии на Рыбинской ГЭС.

Снижение производства электроэнергии ГЭС приведет к замещению генерации на ТЭС, росту использования газа и увеличению выбросов CO₂. Подобного сценария можно избежать при учете альтернативных возможностей экологически чистого производства электроэнергии. Сопоставление удельных показателей производственной деятельности ветровых электростанций как на территории России, так и в США с удельными показателями сокращения производства электроэнергии на Рыбинском гидроузле при снижении НПУ водохранилища со 102 до 98 м показывает, что производство экологически чистой электроэнергии на эквивалентной площади может быть повышено более чем в 100 раз (табл. 1 и табл. 2). Более значимого результата можно достичь путем развития солнечной энергетики в регионах с высокой инсоляцией, например, в Краснодарском и Забайкальском крае, в Калмыкии, Дагестане, Крыму и Адыгее, Читинской и Астраханской областях с занятием СЭС площади, эквивалентной освобожденным территориям при изменении НПУ Рыбинского водохранилища. В этом случае производство электроэнергии увеличится с 0.2 до 63–79 кВт ч/м² в год или с сегодняшнего значения 0.03% (изменение генерации

⁷ Годовой отчет ПАО «ИнтерРАО» за 2020 г. с. 89. [Электронный ресурс] https://www.interrao.ru/upload/InterRAO_AR2020_RUSF_2.pdf (дата обращения 19.11.21).

⁸ Годовой отчет ПАО «ОГК-2» за 2020 г. с. 56. [Электронный ресурс] <https://www.ogk2.ru/upload/iblock/184/184aa05ccd9621739947919414cafb2a.pdf> (дата обращения 11.11.21).

Рыбинской ГЭС за счет снижения НПУ) до 13% от совокупного производства электроэнергии в Российской Федерации. Приведенная оценка выполнена исходя из производственных показателей уже функционирующих солнечных электростанций. С учетом непрерывно происходящего повышения их эффективности следует ожидать, что к 2030 г. приведенные оценки будут скорректированы в сторону преимуществ СЭС на 20–30%.

Таким образом, размещение СЭС в регионах европейской части России и в Забайкалье с высокой инсоляцией на площади, эквивалентной уменьшению Рыбинского водохранилища при изменении НПУ со 102 м до 98 м, и лесовосстановление на освободившейся территории в энергоизбыточных Тверской, Ярославской и Вологодской областях являются альтернативными проектам секвестрации углекислого газа в промышленности, энергетике и прямого захвата углекислого газа DACCS.

Скоординированное восстановление лесов с решением экологических задач служит путем создания полноценных экосистем посредством насыщения фитоценозов дикими копытными или адаптивными породами домашних животных. Впервые подобный проект был осуществлен в 1996 г. на северо-востоке Якутии по инициативе С.А. Зимова. Сегодня аналогичные проекты, получившие название ревалдинга, реализованные в Оренбургской области (Левыкин и др., 2020), Венгрии, Чехии, Польше, Румынии, на территории радиационного заповедника лесной Беларуси, обеспечивают занятость местного населения за счет обслуживания развития экологического туризма.

Данные выводы получены при пренебрежении эмиссией углекислого газа при производстве электроэнергии на ГЭС, СЭС и ВЭС, несмотря на то, что по проведенным оценкам величина этих выбросов с учетом жизненного цикла некоторых проектов электростанций составляет 164, 182 и 209 г $\text{CO}_2/\text{кВт ч}$, средние значения равны 6.6, 49.2 и 16.4 г $\text{CO}_2/\text{кВт ч}$ (Черняховская, 2017), а также при пренебрежении эмиссией метана водохранилищами (Елистратов и др., 2014).

Также следует учитывать, что на протяжении десятилетий не завершились переходные процессы образования водохранилищ и продолжается размыв их береговой линии. Например, протяженность береговой линии, подверженной размыву, составляет: на Камском водохранилище — 591 км, на Воткинском — более 400 км, из них наиболее активному разрушению подвергаются соответственно 200 и 246 км. Максимальные темпы переработки берегов достигают шести метров в год (в среднем 0.5–1.5 м в год). Продолжается образование новых оползней и подвижки старых.

На Камском водохранилище общая длина оползневых берегов составляет 55 км, или 6.1% общей протяженности береговой линии. Наибольшие подвижки отдельных оползней достигают 6 м в год⁹. На Рыбинском водохранилище скорость подмыва берегов на некоторых участках достигает 4 м в год. Необходимым условием для прекращения подмыва является, согласно докладу Почвенного института имени Докучаева и факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова от 2013 г., укрепление 250 км береговой линии. Но при этом данное решение едва ли будет достаточным, так как, по другим оценкам, не менее 1440 км Рыбинского водохранилища береговой линии требуют укрепления¹⁰. В итоге постоянное увеличение площади водохранилищ за счет сокращения площади окружающих их лесов приводит к дополнительному сокращению секвестрационной способности территории страны.

Учет этих фактов повлечет за собой корректировку полученных результатов в направлении предпочтительности лесовосстановления и лесоразведения по отношению к проектам по производству электроэнергии на ГЭС.

ВЫВОДЫ

Структурная устойчивость российской экономики в значительно большей степени, по сравнению с экономиками других стран, зависит от издержек энергоснабжения. Поэтому задача выбора наименее затратных путей, обеспечивающих выполнение обязательств по достижению климатической нейтральности, для нее наиболее актуальна.

Для достижения климатической нейтральности России следует так же, как и в плане ГОЭЛРО, подходить к решению сложных проблем на основе системного подхода.

Пренебрежение использованием природного потенциала увеличения поглощающей способности российских лесов приведет к необходимости (как и в других странах) реализации проектов, абсорбции углекислого газа в промышленности и энергетике, а в перспективе и к проектам его прямого захвата (Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)). Результатом станет усиление негативного антропогенного воздействия, рост потребности в добыче природных ископаемых и в дополнительном производстве электроэнергии.

⁹ Справка “Российской газеты” к статье “Три районных центра Прикамья могут уйти под воду” // Российская газета. 08.07.21010. [Электронный ресурс]. <https://rg.ru/2010/07/08/reg-permkraj/berega.html>. (дата обращения 11.11.21).

¹⁰ Муратова Ю. Истории о Рыбинском море профессора Дебольского // Рыбинск. 19.09.12. [Электронный ресурс] <https://gazeta-rybinsk.ru/2012/09/19/5719> (дата обращения 21.11.21).

Удельные показатели поглощающей способности проектов лесовосстановления и лесоразведения на суглинистых почвах южной тайги сопоставимы со снижением эмиссии CO₂ при замещении гидроэнергетикой генерации газовых электростанций.

При принятии решений о целесообразности продолжения строительства новых ГЭС и эксплуатации существующих станций следует в каждом случае проводить комплексное исследование, основанное на моделировании роста древостоя с учетом поглощающей способности проектов лесовосстановления и лесоразведения на территориях водохранилищ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобылев С.Н., Захаров В.М.* Экосистемные услуги. Человек и природа. М.: Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы; Центр устойчивого развития и здоровья среды ИБН РАН; Центр экологической политики России, 2015. 100 с.
- Бурдин Е.А.* Волжский каскад ГЭС: триумф и трагедия России. М.: РОССПЭН, 2011. 398 с.
- Гвоздецкий В.Л.* План ГОЭЛРО. Мифы и реальность // Наука и жизнь. 2001. № 5. С. 102–109.
- Глобальная оценка лесных ресурсов 2020 года. Основной отчет. Рим: ФАО ООН, 2021. 184 с. <https://doi.org/10.4060/ca9825ru>
- Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И., Молодцов Д.В.* Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: Анализ опыта исследований и организация экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11 (151). С. 146–159.
- Клейнер Г.Б.* Экономика. Моделирование. Математика. Избранные труды. М.: ЦЭМИ РАН, 2016. 856 с.
- Ключевые социально-экономические аспекты развития проектов секвестрации углекислого газа: монография / Под ред. проф. А.Е. Череповицына. СПб.: ЛЕМА, 2019. 228 с.
- Коротков В.Н., Шанин В.Н., Фролов П.В.* Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом? // Математическое моделирование в экологии: Материалы Седьмой Национальной научной конференции с международным участием. Пушино, 2021. С. 57–58.
- Лагерева А.В., Ханаева В.Н.* Возможные направления снижения выброса парниковых газов от электростанций в России до 2050 г. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 1. С. 50–58.
- Левыкин С.В., Чибилёв А.А., Кочуров Б.И., Казачков Г.В.* К стратегии сохранения и восстановления степей и управления природопользованием на постцелинном пространстве // Известия Российской академии наук. Секция географическая. 2020. № 4. С. 626–636.
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Шенисенко Е.А., Нефедова Т.Т.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
- Макаров А.А.* Средства и следствия сдерживания эмиссии парниковых газов в энергетике России // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2008. № 5. С. 3–18.
- Национальный план действий по увеличению абсорбции парниковых газов поглотителями на период до 2030 г. Утвержден 05.12.19 Постановлением коллегии Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь. [Электронный ресурс] <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/1-Minleshoz-Nats.-plan-po-absorbtsii-1-2.pdf>
- Одум Ю.* Экология. М.: Мир, 1975. 740 с.
- План мероприятий (“дорожная карта”) по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года. Утверждена ПП 2634-р от 12.10.20.
- Рогинко С.А.* Риски Парижского соглашения для реального сектора экономики // Труды Вольного экономического общества России. 2019. Т. 216. № 2. С. 204–214.
- Рогинко С.* “Климатический кабинет” Байдена и Парижское соглашение // Научно-аналитический вестник ИЕ РАН. 2021. № 1. С. 7–16.
- Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А.* Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317.
- Симонов Н.С.* Начало электроэнергетики Российской империи и СССР, как проблема техноценоза. М.: Инфра – Инженерия, 2017. 640 с.
- Таллер Е.Б., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н.* Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества хронорядя дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 77–104.
- Уринсон Я.М., Кожуховский И.С., Сорокин И.С.* Реформирование российской электроэнергетики: результаты и нерешенные вопросы // Экономический журнал ВШЭ. 2020. № 3. С. 323–339.
- Федоров Б.Г.* Выбросы углекислого газа: углеродный баланс России // Проблемы прогнозирования. 2014. № 1. С. 63–78.
- Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н.* Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесохозяйственная информация. 2020. № 1. С. 92–113. <https://doi.org/10.24419/LNI.2304-3083.2020.1.10>
- Филипчук А.Н., Малышева Н.В.* Оценка возможности использования данных государственной инвентаризации лесов для реализации национальных обязательств в рамках Парижского соглашения: Материалы Всероссийской V научно-технической конференции-вебинара “Леса России: политика, промышленность, наука, образование”. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. СПб: Политех-Пресс, 2020. С. 271–273.
- Черняховская Ю.В.* Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 46–52. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2017-3-46-52>
- Четвертый двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с решением 1/CP.16 Конференции Сторон Рамочной Конвенции

Организации Объединенных Наций об изменении климата, 2019. [Электронный ресурс] URL: http://downloads.igce.ru/publications/Two_years_Doklad_RF/124785_Russian%20Federation-BR4-2-4BR_RUS_rev.pdf (дата обращения: 18.11.2021).

Bastin J.-F., Finegold Y., Garcia C., Mollicone D., Rezende M., Routh D., Zohner C.M., Crowther T. W. The global tree restoration potential // *Science*. 2019. V. 365. № 6448. P. 76–79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>

IEA. Technology Roadmap – High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation. 2012. [Электронный ресурс] <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-high-efficiency-low-emissions-coal-fired-power-generation> (дата обращения: 18.11.2021).

IEA. Global Energy & CO₂ Status Report. 2019.

IPCC. Global Warming of 1.5°C. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., and Waterfield T. 2018.

Fabio Farinosi F., Dosio A., Calliari E. Will the Paris Agreement protect us from hydro-meteorological extremes? // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15 (10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba136>

Keith D.W., Holmes G., Angelo D.S., Heide K. A process for capturing CO₂ from the atmosphere. *Joule* 2, 1–22. 2018.

Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in postglacial ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena*. 2015. V. 133. P. 461–466. DOI:org/. 2015.06.002

<https://doi.org/10.1016/j.catena>

LEILAC: Low Emission Intensity Lime and Cement. Public LEILAC Feed Summary Report. 2017. [Электронный ресурс] <https://www.project-leilac.eu/publications> (дата обращения: 18.11.2021).

Lewis S.L., Wheeler C.E., Mitchard T.A., Koch A. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon //

Nature. 2019. V. 568. P. 25–28.

<https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8> PMID:30940972

Nekrasov S.A. Reducing Costs for Integration of Renewable Energy Sources: A Way to Making Renewable Energy More Accessible // *Thermal Engineering*. 2021. V. 68. № 8. P. 593–603.

<https://doi.org/10.1134/S0040601521070077>

Nekrasov S.A., Grachev I.D. Renewable Energy: Prospects for Energy Development Correction in Russia // *Studies on Russian Economic Development*. 2020. V. 31. № 1. P. 71–78. doi.org/

<https://doi.org/10.1134/S1075700720010104>

Paoluzzi D., Martinus A. Danieli & Officine Meccaniche. Sustainable Decrease of CO₂ Emissions in the Steelmaking Industry by Means of the Energiron Direct Reduction Technology. [Электронный ресурс] https://www.researchgate.net/publication/345975394_SUSTAINABLE_DECREASE_OF_CO2_EMISSIONS_IN_THE_STEEL-MAKING_INDUSTRY (дата обращения: 18.11.2021).

Realmonde G.L., Drouet A., Gambhir J., Glynn A., Hawkes A.C. Köberle, Tavoni M. An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways // *Nature Communications*. 2019. V. 10. № 1.

Tan X. Supercritical and ultrasupercritical coal-fired power generation. [Электронный ресурс] <https://www.bpastudies.org/bpastudies%20/article/view/170/318> (date accessed: 18.04.2021).

Stéphenne K. Start-up of World's First Commercial Post-combustion Coal Fired CCS Project: Contribution of Shell Cansolv to SaskPower Boundary Dam ICCS Project // *Energy Procedia*. 2014. V. 63. P. 6106–6110.

Strategy for International Climate Negotiations [Электронный ресурс] <https://carbon-price.com/climate/experts/joseph-stiglitz/> (дата обращения: 18.11.2021).

UNPRI. What is the Inevitable Policy Response? (Iss. October). 2019. P. 3–12.

Approaches to the Carbon Sequestration in Climatic Projects

S. A. Nekrasov*

Central Economic Mathematical Institute of the RAS, Nakhimovskiy ave, 47, Moscow, 117418 Russia

**E-mail: san693@mail.ru*

Projects aimed at achieving carbon neutrality will increasingly determine the direction of the global economy. Their implementation will cause not only an increase in the cost of energy supply, but also lead to additional extraction of fossil fuel and an increase in demand for electricity. Under these conditions, the Russian Federation should adjust the vector of its development and use natural resources, taking into account the accumulated experience in solving complex problems based on a systematic approach. The transition from a fragmented approach to the integrated use of the afforestation and reforestation sequestration possibilities is the way to maintain the structural stability of the domestic economy. It is shown that the reforestation and afforestation on areas equivalent to those occupied by the Volga-Kama HPPs' cascade's reservoirs will result in an increase in carbon dioxide absorption comparative to a decrease in emissions when the energy from the gas-powered thermal power plants will be replaced by hydropower. Also presented are the numerical estimates of the increase in CO₂ sequestration resulting from the reforestation on the area of an ancient lake, which used to occupy a significant part of the Mologo-Sheksninskaya lowland at the end of the ice age, in case of a change in the level of the Rybinsk reservoir.

Keywords: climatic neutrality, greenhouse gases sequestration, systematic approach, reforestation and afforestation, hydropower, sun and wind energy, Volga-Kama HPPs' cascade.

REFERENCES

- Bobylev S.N., Zakharov V.M., *Ekosistemnye uslugi. Chelovek i priroda* (Ecosystem services. Human and nature), Moscow: Departament prirodnopol'zovaniya i okhrany okruzhayushchei sredy goroda Moskvy; Tsentr ustoychivogo razvitiya i zdorov'ya sredy IBN RAN; Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii, 2015, 100 p.
- Burdin E.A., *Volzhskii kaskad GES: triumf i tragediya Rossii* (Volga cascade of hydroelectric power stations: triumph and tragedy of Russia), Moscow: ROSSPEN, 2011, 398 p.
- Chernyakhovskaya Y.V., Vybrosoy parnikovyykh gazov v elektroenergetike i ikh snizhenie ot vnedreniya rossiiskikh proektov atomnykh elektrostantsii (Greenhouse Gas Emissions in the Electric Power Sector and Their Abatement due to Russian NPP Projects), *Vestnik MEI*, 2017, No. 3, pp. 46–52.
- Chetvertiy dvukhgodichnyi doklad Rossiiskoi Federatsii, predstavleniy v sootvetstvi s resheniem 1/SR.16 Konferentsii Storon Ramochnoi Konventsii Organizatsii Ob'edinennykh Natsii ob izmenenii klimata* (Fourth biennial report of the Russian Federation submitted in accordance with decision 1/CP.16 of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change), 2019, available at: http://downloads.igce.ru/publications/Two_years_Doklad_RF/124785_Russian%20Federation-BR4-2-4BR_RUS_rev.pdf (November 18, 2021).
- Crowther T.W., The global tree restoration potential, *Science*, 2019, Vol. 365, No. 6448, pp. 76–79. DOI: 10.1126/science.aax0848
- Elistratov V.V., Maslikov V.I., Sidorenko G.I., Molodtsov D.V., Vybrosoy parnikovyykh gazov s vodokhranilishch GES: Analiz opyta issledovaniy i organizatsiya eksperimentov v Rossii (Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: analysis of research experience and organization of research in Russia), *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2014, No. 11 (151), pp. 146–159.
- Fabio Farinosi F., Dosio A., Calliari E., Will the Paris Agreement protect us from hydro-meteorological extremes?, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15 (10). DOI: 10.1088/1748-9326/aba136
- Fedorov B.G., Russian carbon balance (1990–2010), *Studies on Russian Economic Development*, 2014, Vol. 25, No. 1, pp. 50–62.
- Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh gosudarstvennoi inventarizatsii lesov dlya realizatsii natsional'nykh obyazatel'stv v ramkakh Parizhskogo soglasheniya (Assessing the possibility of using state forest inventory data to implement national obligations under the Paris Agreement), *Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie* (Forests of Russia: politics, industry, science, education), Saint Petersburg, Sankt-Petersburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet im. S.M. Kirova, Proc. of 5th All-Russian Research-to-Practice Conf.-Webinar, Saint Petersburg: Politekh-Press, 2020, pp. 271–273.
- Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A., Yugov A.N., Boreal'nye lesa Rossii: vozmozhnosti dlya smyagcheniya izmeneniya klimata (The boreal forest of Russia: opportunities for the effects of climate change mitigation), *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 2020, No. 1, pp. 92–113. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10
- Global'naya otsenka lesnykh resursov 2020 goda* (Global Forest Resources Assessment 2020. Main report), Rome: FAO OON, 2021, 184 p.
- Gvozdet'skii V.L., Plan GOELRO. Mify i real'nost' (The State Plan for the Electrification of Russia: Myths and Reality), *Nauka i zhizn'*, 2001, No. 5, pp. 102–109.
- IEA. *Global Energy & CO₂ Status Report*, 2019.
- IEA. *Technology Roadmap – High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation*, 2012, available at: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-high-efficiency-low-emissions-coal-fired-power-generation> (November 18, 2021).
- Keith D.W., Holmes G., Angelo D.S., Heidel K., A process for capturing CO₂ from the atmosphere, *Joule*, 2, 1–22, 2018.
- Kleiner G.B., *Ekonomika. Modelirovanie. Matematika. Izbrannyye trudy* (Economy. Modeling. Mathematics. Selected), Moscow: TsEMI RAN, 2016, 856 p.
- Klyuchevyye sotsial'no-ekonomicheskie aspekty razvitiya proektov sekvestratsii uglekislogo gaza* (Key socio-economic aspects of the development of carbon dioxide sequestration projects), Saint Petersburg: LEMA, 2019, 228 p.
- Korotkov V.N., Shanin V.N., Frolov P.V., Vsegda li iskusstvennoe lesovosstanovlenie mozhet byt' lesoklimaticheskim proektom? (Can artificial reforestation always be a forest climatic project?), *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii* (Mathematical Modeling in Ecology), Proc. of 7th National Scientific Conf. with International participation, Pushchino, pp. 57–58.
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y., Large-scale carbon sequestration in postagrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan, *Catena*, 2015, Vol. 133, pp. 461–466. DOI:org/10.1016/j.catena.2015.06.002
- Lagerev A.V., Khanaeva V.N., Vozmozhnye napravleniya snizheniya vybrosoy parnikovyykh gazov ot elektrostantsii v Rossii do 2050 g. (Possible ways to reduce greenhouse gas emissions from power plants in Russia until 2050), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2010, No. 1, pp. 50–58.
- LEILAC: *Low Emission Intensity Lime and Cement*, Public LEILAC Feed Summary Report, 2017, available at: <https://www.project-leilac.eu/publications> (November 18, 2021).
- Levykin S.V., Chibilev A.A., Kochurov B.I., Kazachkov G.V., K strategii sokhraneniya i vosstanovleniya stepei i upravleniya prirodnopol'zovaniem na posttselinnom prostranstve (To the Strategy of Steppes' Conservation and Restoration and Natural Resource Use in the Area of Post-Virgin Lands), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Sektsiya geograficheskaya*, 2020, No. 4, pp. 626–636.
- Lewis S.L., Wheeler C.E., Mitchard T.A., Koch A., Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon, *Nature*, 2019, Vol. 568, pp. 25–28. DOI:10.1038/d41586-019-01026-8pmid:30940972
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G., *Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* (Dynamics of agricultural lands in Russia in 20th century and postagrogenic rehabilitation of vegetation and soils), Moscow: GEOS, 2010, 416 p.
- Makarov A.A., Sredstva i sledstviya sderzhivaniya emissii parnikovyykh gazov v energetike Rossii (Means and consequences of curbing greenhouse gas emissions in the Russian

- energy sector), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2008, No. 5, pp. 3–18.
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T. *IPCC. Global Warming of 1.5°C*, 2018.
- Natsional'nyi plan deistvii po uvelicheniyu absorbtzii parnikovykh gazov poglotitelyami na period do 2030 g. Uverzhden 05.12.19 Postanovleniem kollegii Ministerstva lesnogo khozyaistva Respubliki Belarus'* (National Action Plan to increase the absorption of greenhouse gases by sinks for the period up to 2030. Approved on December 05, 2019 by the Resolution of the Board of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus), available at: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/1-Minleshoz-Nats.-plan-po-absorbtzii-1-2.pdf>
- Nekrasov S.A., Reducing Costs for Integration of Renewable Energy Sources: A Way to Making Renewable Energy More Accessible, *Thermal Engineering*, 2021, Vol. 68, No. 8, pp. 593–603. DOI: 10.1134/S0040601521070077
- Nekrasov S.A., Grachev I.D., Renewable Energy: Prospects for Energy Development Correction in Russia, *Studies on Russian Economic Development*, 2020, Vol. 31, No. 1, pp. 71–78. doi.org/10.1134/S1075700720010104
- Odum E.P., *Fundamentals of Ecology*, Moscow: Mir, 1975, 740 p.
- Paoluzzi D., Martinus A. Danieli & Officine Meccaniche., Sustainable Decrease of CO₂ Emissions in the Steelmaking Industry by Means of the Energiron Direct Reduction Technology, available at: https://www.researchgate.net/publication/345975394_SUSTAINABLE_DECREASE_OF_CO2_EMISSIONS_IN_THE_STEELMAKING_INDUSTRY (November 18, 2021).
- Plan meropriyatii ("dorozhnaya karta") po razvitiyu vodorodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii do 2024 goda*. Uverzhdena PP 2634-r ot 12.10.20 (Action plan ("road map") for the development of hydrogen energy in the Russian Federation until 2024. Approved by PP 2634-r dated 10/12/20)
- Realmonde G.L., Drouet A., Gambhir J., Glynn A., Hawkes A.C. Köberle, Tavoni M., An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways, *Nature Communications*, 2019, Vol. 10, No. 1.
- Roginko S., "Klimaticheskii cabinet" Baidena i Parizhskoe soglasenie (Biden's Climate Office and Paris Agreement), *Nauchno-analiticheskii vestnik IE RAN*, 2021, No. 1, pp. 7–16.
- Roginko S.A., Riski Parizhskogo soglaseniya dlya real'nogo sektora ekonomiki (Paris agreement: risks for the Russian economy), *Trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii*, 2019, Vol. 216, No. 2, pp. 204–214.
- Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A., Izmenenie zapasov ugleroda v postagrogennykh ekosistemakh v rezul'tate estestvennogo vosstanovleniya lesov v Kostromskoi oblasti (Alterations of the carbon storages in postagrogenic ecosystems due to natural reforestation in Kostroma oblast), *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 307–317.
- Simonov N.S., *Nachalo elektroenergetiki Rossiiskoi imperii i SSSR, kak problema tekhnotsenoza* (The beginning of the electric power industry of the Russian Empire and the USSR as a problem of technocenosis), Moscow: Infra – Inzheneriya, 2017, 640 p.
- Stéphenne K., Start-up of World's First Commercial Post-combustion Coal Fired CCS Project: Contribution of Shell Cansolv to SaskPower Boundary Dam ICCS Project, *Energy Procedia*, 2014, Vol. 63, pp. 6106–6110.
- Strategy for International Climate Negotiations*, available at: <https://carbon-price.com/climate/experts/joseph-stiglitz/> (November 18, 2021).
- Taller E.B., Artem'eva Z.S., Kirillova N.P., Danchenko N.N., Nekotorye osobennosti dinamiki kachestvennogo sostava organicheskogo veshchestvo khronoryada dernovo-podzolistykh pochv v protsesse lesovosstanovleniya (Dynamics of organic matter under the afforestation of the former agricultural sod-podzolic soils), *Byulleten' Pochvenno-go instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2019, No. 98, pp. 77–104.
- Tan X., Supercritical and ultrasupercritical coal-fired power generation, available at: <https://www.bpastudies.org/bpastudies%20article/view/170/318> (April 18, 2021).
- UNPRI. What is the Inevitable Policy Response?, Iss. October, 2019, pp. 3–12.
- Urinson Y.M., Kozhukhovskii I.S., Sorokin I.S., Reformirovanie rossiiskoi elektroenergetiki: rezul'taty i nereshennye voprosy (The Russian electricity reform: achievements and unresolved issues), *Ekonomicheskii zhurnal VShE*, 2020, No. 3, pp. 323–339.