АНАЛИТИЧЕСКИЙ ДОКЛАД • ТОМ 1

Наземные проекты по удалению диоксида углерода из атмосферы (CDR)

Международный опыт и перспективы для инвестирования



Совместный проект Центра технологий устойчивого развития (ЦТУР),
ИЦ ЭНЕРПО Европейского университета в Санкт-Петербурге, АК «АЛРОСА»,
Центра цифровых технологий для природно-климатических проектов НИУ ВШЭ

Оглавление

	Введение	6
01	Лесоразведение и лесовосстановление (Afforestation, Reforestation and Revegetation; ARR)	17
02	Улучшенное лесопользование (Improved Forest Management; IFM)	28
03	Вторичное обводнение осушенных торфяников (Rewetting of Drained Peatlands)	38
04	Голубой углерод - восстановление и сохранение приморских экосистем (Blue Carbon)	52
05	Накопление углерода в почвах (Soil Carbon)	67
06	Прямое улавливание CO_2 из атмосферного воздуха и его долговременное хранение (Direct Air Carbon Capture and Storage; DACCS)	81
07	Биоэнергетика с улавливанием и хранением CO_2 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage; BECCS)	95
08	Удаление CO_2 из атмосферы путём производства и хранения биочара (Biochar)	109
09	Минерализация углерода (Carbon / In Situ Mineralization)	125
10	Хранение углерода биомассы (Biomass Direct Storage and Biomass Geological Storage)	137
11	Ускоренное выветривание горных пород (Enhanced Rock Weathering; ERW)	151
12	Накопление углерода в продуктах (Carbon Storage in Products)	164
	Глоссарий терминов удаления диоксида углерода	178

Общий подход к описанию технологий CDR

01. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность
02. Экономика CDR-проектов
03. Рыночная ситуация
04. Обзор ключевых проектов
05. Стандарты и методологии
06. Преимущества
07. Вызовы и ограничения
08. Особенности мониторинга, отчётности и верификации (Monitoring, Reporting and Verification; MRV)
09. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (Co-benefits)
10. Российский опыт и потенциал реализации
11. Выводы

Над докладом работали:

Ведущие авторы доклада:

Фурса Юрий – кандидат экономических наук, генеральный директор ООО «Центр технологий устойчивого развития» (ООО «ЦТУР»).
Главы: введение, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Теплова Ольга – кандидат экономических наук, руководитель направления по устойчивому развитию, научный сотрудник Исследовательского центра ЭНЕРПО, Европейский университет в Санкт-Петербурге.
Главы: введение, 3, 4, 5, 6, 7, 8

Птичников Андрей – кандидат географических наук, руководитель группы природно-климатических проектов, Центр цифровых технологий для природно-климатических проектов программы карбоновых полигонов, факультет географии и геоинформационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).
Главы: введение, 1, 2, 5, 8, 11, 12

Список экспертов:

Александрова Мария – ведущий аналитик, Центр цифровых технологий для природно-климатических проектов программы карбоновых полигонов, факультет географии и геоинформационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).
Главы: 5, 8

Гончаренко Татьяна – заместитель начальника управления – руководитель направления устойчивого развития, Управление международного сотрудничества, АК «АЛРОСА» (ПАО).
Главы: 9

Горячкина Дарья – директор, Группа операционных рисков и устойчивого развития, Kept (Кэпт).
Главы: 9

Грязнова Варвара – кандидат экономических наук, старший специалист ООО «АИМ Карбон»
Главы: 11

Гутникова Лариса – ведущий аналитик, Центр цифровых технологий для природно-климатических проектов программы карбоновых полигонов, факультет географии и геоинформационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).
Главы: 5, 8

Ивлиев Сергей – кандидат экономических наук, основатель, директор по стратегии и председатель совета директоров Vlinder.
Главы: 4

Кудрявцева Анна – ведущий аналитик, Центр цифровых технологий для природно-климатических проектов программы карбоновых полигонов, факультет географии и геоинформационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).
Главы: 1,8,12

Масанов Алексей – руководитель направления по внедрению инноваций, Центр инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО).
Главы: 9

Суязова Серафима – выпускница магистерской программы «Управление низкоуглеродным развитием», Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).
Главы: 5, 12

Хадимуллина Линара – ведущий аналитик, Центр цифровых технологий для природно-климатических проектов программы карбоновых полигонов, факультет географии и геоинформационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ).
Главы: введение, 1, 2, 5, 8

Введение

Достижение климатических целей Парижского соглашения требует не только сокращения выбросов парниковых газов (ПГ), но и удаления диоксида углерода из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR). Необходимость сочетать эти подходы обусловлена тремя основными факторами.

Во-первых, в ряде секторов, включая авиацию, производства цемента и сельского хозяйства, полностью устранить выбросы с помощью существующих технологий крайне сложно. Во-вторых, углекислый газ, уже накопленный в атмосфере, продолжает влиять на климат, поэтому сокращение новых выбросов само по себе не приведёт к быстрому снижению глобальной температуры. В-третьих, достижение нетто-нулевых выбросов CO_2 предполагает баланс между остающимися антропогенными выбросами CO_2 и его антропогенным удалением из атмосферы. Таким образом, CDR становится необходимым дополнением к сокращению выбросов и одним из инструментов достижения долгосрочных климатических целей[1]. Кроме того Парижское соглашение требует долгосрочного хранения уже удаленного углерода. Проекты CDR ориентированы и на это требование.

Актуальность масштабирования CDR возрастает на фоне сохраняющегося разрыва между климатическими целями и текущей траекторией глобального потепления. По оценке Программы ООН по окружающей среде (UNEP, ЮНЕП), возможность ограничить глобальное потепление уровнем 1,5 °C без превышения этого порога или с незначительным превышением утрачена. Превышение порога более чем на 0,1 °C теперь неизбежно, однако его масштаб и продолжительность ещё можно ограничить. В рассмотренном UNEP сценарии с наименьшим возможным превышением возвращение глобальной температуры к уровню 1,5 °C или ниже к 2100 г. оценивается с вероятностью около 50%. Для этого потребуется удалить из атмосферы и обеспечить постоянное хранение около 320 млрд т CO_2 в совокупности в течение XXI века. Возможность масштабировать CDR до такого уровня остаётся неопределённой. Даже при последующем снижении температуры превышение порога может сопровождаться серьёзными и необратимыми климатическими последствиями[2].

Сценарии возвращения к температурной цели после её превышения предусматривают достижение нетто-отрицательных выбросов CO_2, при которых его антропогенное удаление превышает остающиеся антропогенные выбросы. Наряду с быстрым сокращением выбросов это предполагает масштабирование методов удаления углекислого газа.

Согласно докладу The State of Carbon Dioxide Removal (3-е издание, 2026 г.), в наиболее амбициозных сценариях, совместимых с целью 1,5 °C, медианный объём удаления CO_2 в 2050 г. составляет около 8,75 млрд т в год. Оценка современного масштаба традиционных методов (conventional CDR), прежде всего лесоразведения и лесовосстановления, составляет около 2,2 млрд т CO_2 в год в среднем за 2014–2023 гг. Это сопоставимо

1 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Executive summary, p. 10; section 1.2, p. 20–23. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65.

2 UNEP. Emissions Gap Report 2026: The point of return. Executive summary. 2026. P. iv, vii–viii. DOI: 10.59117/20.500.11822/50038. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/50038

примерно с 5% современных валовых выбросов CO_2. Для новых методов (novel CDR), прежде всего биочара и биоэнергетики с улавливанием и хранением CO_2 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS), сводная оценка деятельности за 2025 г. составляет около 2,04 млн т CO_2, включая перенос ранее поглощённого углерода древесины в биочар. В рассмотренных сценариях вклад новых методов к 2050 г. превышает 3,5 млрд т CO_2 в год. Сопоставление показывает разрыв более чем на три порядка, однако не является прогнозом фактического роста и требует учёта различий в границах расчёта[3].

CDR приобретает значение и для корпоративных климатических стратегий. Компании могут финансировать проекты по удалению CO_2, в том числе покупая соответствующие углеродные единицы, дополняя ими собственные меры по сокращению выбросов. Требования корпоративных климатических стандартов к использованию удаления углерода постепенно развиваются, формируя дополнительный спрос на проекты, обеспечивающие измеримый результат и долговременное хранение углерода. Например, Corporate Net-Zero Standard Version 2.0 инициативы Science Based Targets initiative (SBTi), опубликованный в июне 2026 г., предусматривает нейтрализацию остаточных выбросов с помощью удаления CO_2 к году достижения нетто-нулевых выбросов и в дальнейшем. Стандарт предусматривает применение версии 2.0 с 1 февраля 2027 г.[4]

Однако методы CDR существенно различаются по стоимости, масштабируемости, требованиям к инфраструктуре и продолжительности хранения углерода. Природные решения, включая лесоразведение и увеличение запасов углерода в почвах, используют естественные процессы поглощения CO_2 и могут давать сопутствующие экологические и социально-экономические выгоды (co-benefits), но подвержены рискам обратного высвобождения углерода вследствие пожаров, засух, изменения землепользования и других факторов. Технологические методы позволяют в ряде случаев обеспечить более длительное хранение углерода, но часто требуют больших капитальных затрат и энергии. Так, прямое улавливание CO_2 из воздуха с последующим хранением (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) при надлежащем выборе геологического хранилища и управлении им позволяет изолировать углерод на тысячелетия, но пока остаётся одним из самых дорогих методов. Поэтому продолжительность хранения, климатический результат и экономику следует оценивать с учётом как характеристик метода, так и условий конкретного проекта[5].

Для углеродного рынка разнообразие методов означает, что на первый план выходят качество проектов и достоверность подтверждённого ими удаления CO_2. Именно этим вопросам – возможностям различных методов CDR, их ограничениям и потенциалу для достижения климатических целей – посвящён настоящий доклад. Первый том посвящён наземным методам CDR и связанным с ними способам хранения; он также охватывает проекты голубого углерода (blue carbon) в прибрежных экосистемах: мангровых лесах, приливных солёных маршах и зарослях морских трав. Другие методы удаления CO_2 в морской среде (marine CDR, mCDR) будут рассмотрены во втором томе, выход которого запланирован на 2027 г. В первый том вошли главы о DACCS, BECCS, усиленном выветривании гор-

3 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. P. 11–12, 166–167, 183–184. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65. В сводной оценке новых методов около 2,04 млн т CO_2 за 2025 г. включают около 0,97 млн т переноса углерода древесины в биочар; поток удаления непосредственно из атмосферы составляет около 1,07 млн т. Эти величины нельзя суммировать с лесным поглощением без проверки двойного учёта.

4 SBTi. Corporate Net-Zero Standard. Version 2.0. June 2026. Version history, p. 4; section 6.6, CNZS-C46. https://files.sciencebasedtargets.org/production/files/Corporate-Net-Zero-Standard-version-2.pdf ; SBTi. The new Corporate Net-Zero Standard Version 2.0. https://sciencebasedtargets.org/corporate-net-zero-standard-v2

5 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. P. 23–30; Chapter 10. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65.

ных пород (Enhanced Rock Weathering, ERW), минерализации углерода на примере проекта АЛРОСА, хранении углерода биомассы, обводнении торфяников и голубом углероде, лесовосстановлении и лесоразведении, улучшенном лесопользовании, почвенном углероде и биочаре, а также о хранении углерода в продуктах.

Климатические проекты по сокращению выбросов и удалению CO_2

Климатические проекты направлены на сокращение воздействия человека на климат. По механизму достижения климатического эффекта следует различать сокращение и предотвращение выбросов парниковых газов (emission reductions and avoidance) и удаление CO_2 из атмосферы (removals, CDR). Один проект может сочетать оба вида результата; при количественной оценке их необходимо разграничивать.

Результат проектов обоих типов оценивается относительно базового сценария. Различие между сокращением выбросов и удалением CO_2 важно для разработчиков, инвесторов и покупателей углеродных единиц. Механизм проекта определяет методику оценки его климатического результата, требования к мониторингу и верификации, а также риски, влияющие на стоимость углеродных единиц.

Проекты по сокращению и предотвращению выбросов ПГ

Проекты по сокращению и предотвращению выбросов ПГ уменьшают поступление парниковых газов в атмосферу по сравнению с базовым сценарием – развитием событий без климатического проекта. Их результат рассчитывают как разницу между выбросами в базовом и проектном сценариях. Применимая методология устанавливает правила количественной оценки, мониторинга, учёта утечек и подтверждения дополнительности результата[6].

6 ICVCM. The Core Carbon Principles. Principles 4, 5 and 7: Independent third-party validation and verification; Additionality; Robust quantification of emission reductions and removals. https://icvcm.org/core-carbon-principles/

Примеры проектов по сокращению и предотвращению выбросов:

① Сокращение выбросов от обезлесения и деградации лесов – одно из направлений REDD+, механизма в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (UNFCCC, РКИК ООН). REDD+ также охватывает сохранение и увеличение запасов углерода в лесах и устойчивое управление лесами. Поэтому весь механизм нельзя относить исключительно к предотвращению выбросов. Например, охрана лесной территории, которой угрожает вырубка, позволяет избежать выбросов, а увеличение запасов углерода может обеспечивать дополнительное удаление CO_2. Механизм РКИК ООН ориентирован на национальный уровень, с возможностью субнационального применения как промежуточной меры, и предусматривает выплаты за достигнутые и подтверждённые результаты. На добровольном углеродном рынке проекты REDD+ реализуются также по методологиям независимых программ, например Verified Carbon Standard (VCS), администрируемой Verra[7].

② Проекты на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – строительство ветровых и солнечных электростанций, позволяющих заместить выработку электроэнергии на основе ископаемого топлива. Если реализация проекта действительно приводит к замещению более углеродоёмкой генерации, это позволяет предотвратить связанные с ней выбросы парниковых газов.

③ Улавливание метана на свалках и животноводческих предприятиях – установка систем сбора свалочного газа или биогазовых установок на фермах. Собранный метан может сжигаться на факеле с образованием CO_2 либо использоваться для производства энергии. Поскольку метан обладает значительно более высоким потенциалом глобального потепления на единицу массы, чем CO_2, его улавливание и уничтожение может существенно снизить совокупное воздействие на климат по сравнению со сценарием, при котором метан поступает непосредственно в атмосферу.

Проекты по удалению CO_2 из атмосферы (removals)

Удаление диоксида углерода (CDR) – это совокупность технологий, практик и подходов, обеспечивающих извлечение CO_2 из атмосферы и долговременное хранение углерода в геологических, наземных или океанических резервуарах либо в составе продуктов. CDR включает антропогенное усиление биологических и геохимических процессов поглощения CO_2, а также прямое улавливание CO_2 из воздуха с хранением (DACCS), но исключает естественное поглощение, не вызванное непосредственно деятельностью человека[8].

7 UNFCCC. What is REDD+? https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/redd/what-is-redd . Verra. VM0048 Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, v1.0 (27 November 2023). https://verra.org/methodologies/vm0048-reducing-emissions-from-deforestation-and-forest-degradation-v1-0/

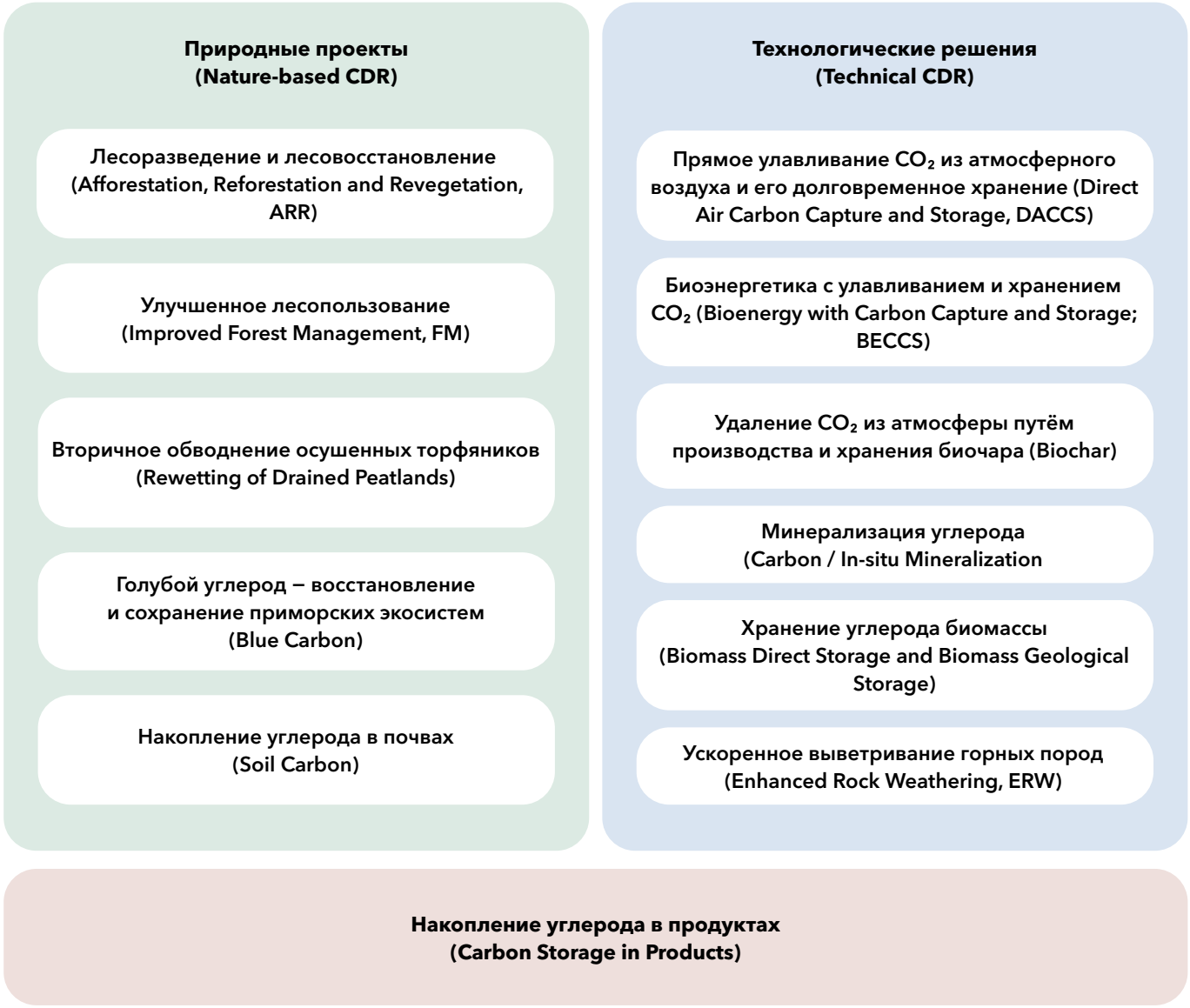
8 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Section 1.2, p. 20–23. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65.

Методы могут использовать биологические процессы, химические реакции и инженерные решения в различных сочетаниях.

The State of Carbon Dioxide Removal выделяет три принципа CDR:[9]

① Улавливаемый CO_2 поступает из атмосферы, а не из ископаемого источника.
② Уловленный углерод хранится долговременно.
③ Удаление происходит благодаря действиям человека сверх естественных процессов.

Рисунок 1. Типы CDR-проектов, рассматриваемые в первом томе доклада



Источник: составлено по структуре доклада. Группировка следует названиям его разделов; ряд методов сочетает природные процессы и инженерные решения. Эта группировка не тождественна делению на традиционные (conventional) и новые (novel) методы CDR в The State of Carbon Dioxide Removal (3-е издание, 2026, с. 30). Хранение углерода в продуктах выделено отдельно, как в разделе 2.3. Для лесопользования и восстановления экосистем к CDR относится компонент удаления CO_2. Глава о голубом углероде охватывает также приливные солёные марши и морские травы.

9 Geden O. et al. Chapter 1: Introduction // The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. P. 20. DOI: 10.17605/OSF.IO/5K2SF.

Иногда методы CDR трудно однозначно отнести к природным или технологическим, поскольку они сочетают оба подхода. Так, при хранении углерода в продуктах (Carbon Storage in Products) CO_2 поглощают растения при фотосинтезе, а промышленные технологии позволяют сохранить углерод в материалах, например в деревянных конструкциях зданий. В отдельной главе о хранении углерода биомассы рассматривается её изоляция в инженерных хранилищах, а также геологическое хранение биомассы и продуктов её переработки. В обоих направлениях важны продолжительность хранения, чистый результат с учётом выбросов проекта и отсутствие двойного учёта ранее поглощённого углерода. Сводные характеристики ряда методов CDR приведены в приложении 1. Оценки стоимости охватывают широкий диапазон. Перечисленные риски требуют тщательного планирования и проектирования с учётом условий площадки; новые технологические решения также требуют испытаний[10].

Проекты CDR в климатических сценариях

CDR требуется для достижения глобальных и национальных целей нетто-нулевых выбросов CO_2 и парниковых газов. Удаление не заменяет немедленного и глубокого сокращения выбросов, но присутствует во всех смоделированных сценариях, которые ограничивают глобальное потепление до 2 °C или ниже к 2100 г. В экономически эффективных сценариях, совместимых с Парижским соглашением, на сокращение выбросов приходится не менее 80% усилий по достижению нетто-нулевых выбросов CO_2, а на CDR – остальное. Ряд новых методов CDR пока находится на ранних стадиях коммерциализации и требует значительных вложений в научные исследования, опытно-конструкторские разработки и демонстрационные проекты. Чем быстрее будут снижаться выбросы энергетики, промышленности, транспорта и сельского хозяйства, тем меньше CO_2 придётся удалять в будущем[11].

Согласно редакции сценария Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA, МЭА) 2023 г., в 2050 г. удаление CO_2 посредством BECCS и прямого улавливания из воздуха с хранением (DACS в терминологии МЭА; далее DACCS) составляет около 1,7 млрд т в год: 1 и 0,7 млрд т соответственно [12]. Обоим методам в докладе посвящены отдельные главы. В World Energy Outlook 2025 представлен обновлённый сценарий NZE. В нём превышение порога 1,5 °C неизбежно, а возвращение ниже этого уровня связано с масштабным применением CDR (рисунок 2). Если бы выбросы всех ПГ оставались на уровне 2024 г., к 2050 г. потепление достигло бы почти 2 °C относительно доиндустриального уровня. В сценарии NZE около двух третей предотвращённого к 2050 г. потепления обеспечивает сокращение чистых выбросов CO_2 до нуля, почти всю оставшуюся часть – сокращение выбросов метана и закиси азота. В этом сценарии потепление достигает пика около 1,65 °C примерно в 2050 г., после чего снижается примерно до 1,45 °C к 2100 г. Около 30% охлаждения после 2050 г. связано с CDR, главным образом BECCS и DACCS, ещё 30% — с сокращением выбросов

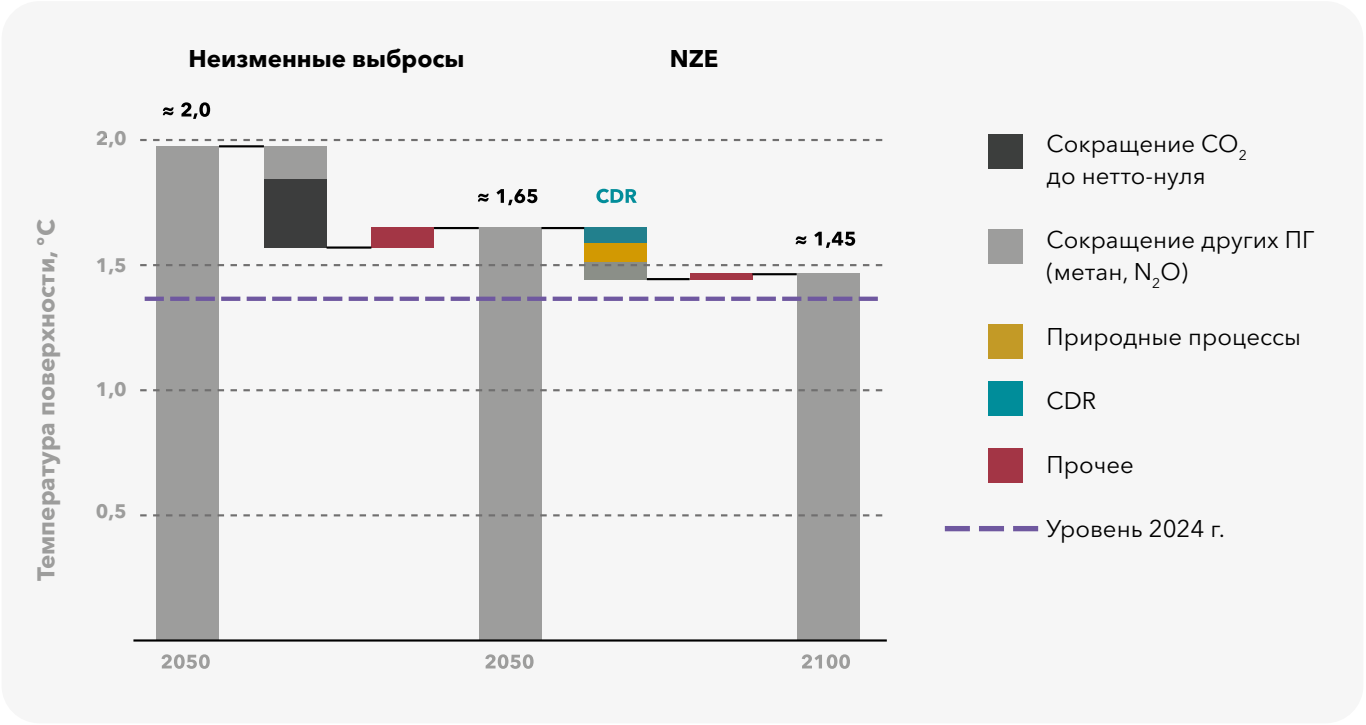
10 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Chapter 1, p. 24–30. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65. См. также главы настоящего доклада «Хранение углерода биомассы» и «Хранение углерода в продуктах», разделы 1.

11 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Executive summary, p. 10. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65. IPCC AR6 WGIII: CDR Factsheet. 2022. P. 1. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGIII_Factsheet_CDR.pdf

12 IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. 2023 Update. Section 2.1.2, p. 62–63. https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-c-goal-in-reach

метана и закиси азота, 40% – с природными процессами. Последние не относятся к антропогенному удалению CO_2. Эти значения описывают конкретный сценарий и не гарантируют соответствующего температурного результата[13].

Рисунок 2. Предотвращённое потепление к 2050 г. и вклад различных факторов в охлаждение с 2050 по 2100 г. в сценарии NZE



Источник: адаптировано авторами по IEA, World Energy Outlook 2025, раздел 7.2.2, рисунок 7.11 (CC BY 4.0). На вертикальной оси показано повышение глобальной температуры относительно 1850–1900 гг., а не абсолютная температура. Линия 2024 г. относится к оценке долгосрочного потепления, а не к аномалии отдельного календарного года.

Природные методы CDR входят в состав природных решений (nature-based solutions, NbS). Однако понятие NbS шире: к ним относятся и меры по охране экосистем, предотвращающие выбросы, например предотвращение обезлесения в рамках REDD+. Само по себе предотвращение выбросов не является CDR.

CDR часто путают с улавливанием и хранением CO_2 (Carbon Capture and Storage, CCS). Улавливание и хранение CO_2 из ископаемого топлива или минерального сырья сокращает выбросы, но не является CDR. Применение CCS может обеспечивать удаление, когда улавливаемый углерод имеет атмосферное происхождение, в том числе ранее был поглощён биомассой, и хранится долговременно. К таким сочетаниям относятся DACCS и BECCS. Чистый климатический результат определяется с учётом выбросов по всей цепочке проекта[14].

13 IEA. World Energy Outlook 2025. Section 7.2.2, p. 325–328; Figure 7.11. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025

14 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Section 1.2, p. 20–23; Box 1.1. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65.

CDR как направление корпоративных климатических инвестиций

Ограничение климатических инвестиций исключительно собственной отраслью сужает выбор компании: например, до утилизации попутного газа в нефтяной промышленности, замены угольной генерации менее углеродоёмкой или повышения энергоэффективности промышленных установок. Между тем компании могут сочетать сокращение собственных выбросов с финансированием климатических проектов за пределами своей деятельности. Плата за выбросы может сделать часть проектов экономически привлекательными без дохода от углеродных единиц; это необходимо учитывать при оценке дополнительности (additionality) по применимой методологии. Дополнительность оценивают с учётом регулирования, экономических стимулов и базового сценария[15].

Компании из разных секторов экономики могут инвестировать в различные CDR-проекты. Для подтверждения их результата необходимо соблюдать требования применимых стандартов и методологий, включая количественную оценку удаления, мониторинг и независимую верификацию. Регистрация проекта сама по себе не подтверждает достигнутое удаление или выпуск углеродных единиц[16].

Таким образом, технологические или авиационные компании могут приобрести углеродные единицы проекта по лесоразведению или обводнению осушенных торфяников, даже если их основной бизнес не связан с лесным хозяйством или восстановлением экосистем. Обводнение замедляет минерализацию торфа и сокращает выбросы CO_2. По мере восстановления торфообразующей растительности и накопления нового торфа к сокращению выбросов добавляется удаление CO_2 из атмосферы: растения поглощают углекислый газ, а часть связанного углерода сохраняется в торфяной залежи. Подробнее этот механизм рассмотрен в главе об обводнении торфяников[17].

Одним из факторов долгосрочного спроса на CDR являются требования корпоративных климатических стандартов. В Corporate Net-Zero Standard Version 2.0 SBTi предусмотрен ориентир для компаний категории А: с 2035 г. поддерживать допустимые виды удаления в объёме не менее 1% текущих выбросов охватов 1–3 с линейным увеличением доли до 100% к году достижения нетто-нулевых выбросов, но не позднее 2050 г.
Доля удаления с длительным хранением также должна возрастать. К категории А относятся крупные компании из всех стран, а также компании из стран с высоким уровнем дохода, отвечающие установленным в стандарте критериям по выбросам или размеру бизнеса.

15 ICVCM. The Core Carbon Principles. Principle 5, Additionality. https://icvcm.org/core-carbon-principles/

16 Verra. VCS Frequently Asked Questions. Project-Related Questions: What is validation?; When will Verra issue VCUs to my project? https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/vcs-program-details/vcs-frequently-asked-questions/

17 Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Chapter 10, p. 246–247, Peatland and coastal wetland restoration. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65.

При этом раздел 6.5 прямо обозначает требование как предварительный ориентир, подлежащий пересмотру при подготовке новой версии. Эти положения относятся к компаниям, применяющим стандарт SBTi, и не являются общеобязательной нормой для бизнеса[18].

Состояние международного рынка CDR-проектов

Капитал на международном углеродном рынке всё больше направляется в CDR-проекты. По оценке MSCI, в 2025 г. на категории инженерных методов удаления (carbon engineering) и восстановления экосистем (nature restoration) пришлось 93% стоимости отслеживаемых публично объявленных инвестиционных сделок и соглашений о будущих закупках: 10,3 и 10,1 млрд долларов США соответственно при общей сумме 22 млрд долларов США. Оценка включает обязательства на будущие годы и расчётную стоимость сделок, условия которых не раскрыты; её нельзя отождествлять с уже вложенными средствами или выручкой от продажи выпущенных единиц[19].

В статистике выпущенных и погашенных единиц добровольного углеродного рынка (Voluntary Carbon Market, VCM) доля CDR пока невелика. По данным Carbon Direct, в 2025 г. единицы удаления составили около 6% всех выпущенных и 5% погашенных углеродных единиц в исследованной выборке. Среди выпущенных единиц удаления 95% пришлось на природные методы и 5% – на методы с большой продолжительностью хранения, такие как биочар и DACCS. Выпуск, погашение и спотовая продажа единиц – разные операции, поэтому эти показатели не измеряют непосредственно объём спотовой торговли[20].

Для масштабирования CDR необходимы технологический прогресс и предсказуемый спрос. Договоры на будущие поставки углеродных единиц (offtake agreements) помогают разработчикам планировать проекты, а покупателям – заранее формировать портфель. MSCI использует более широкую категорию соглашений о будущих закупках, включающую в том числе меморандумы о взаимопонимании. В 2025 г. их оценочная стоимость выросла почти втрое по сравнению с 2024 г. и достигла 12,3 млрд долларов США, тогда как

18 SBTi. Corporate Net-Zero Standard. Version 2.0. June 2026. Table 2, p. 13 (PDF p. 19); section 6.5, disclaimer and CNZS-C45.1–C45.4; section 6.6, CNZS-C46. P. 76–77 (PDF p. 82–83). https://files.sciencebasedtargets.org/production/files/Corporate-Net-Zero-Standard-version-2.pdf

19 McDowell A., Lambert J., Zimmern W. Investment and Offtake Trends in the Global Carbon Credit Market. MSCI Carbon Markets. April 2026. P. 4, 6, 10–11; Appendix A. https://www.msci.com/documents/1296102/0/Investment_and_Offtake_Trends_in_the_Global_Carbon_Credit_Market_2025.pdf/f1bf9217-723d-26d7-50ef-10680e2855f7

20 Carbon Direct. State of the Voluntary Carbon Market: Closing the Carbon Dioxide Removal Demand Gap. February 2026. P. 9, 14, 33. Данные по состоянию на 31.12.2025; выборка реестров и её границы описаны в разделе Registry analysis methods. https://research.relae.co/hubfs/gated-assets/2026%20State%20of%20the%20Voluntary%20Carbon%20Market%20%7C%20Carbon%20Direct%2C%20February%202026.pdf

их число сократилось с 454 до 309. Рост обеспечили более крупные сделки; на Microsoft пришлось 86% общей стоимости таких соглашений за 2025 г.[21]

В той же выборке MSCI на проекты REDD+ в 2025 г. пришлось около 1% стоимости сделок (218 млн долларов США), а на прочие категории, включая ВИЭ, энергоэффективность и сокращение выбросов других ПГ, – менее 2%. MSCI связывает концентрацию капитала в CDR с долгосрочными закупками крупных компаний и интересом к качеству единиц[22]. Сам по себе тип проекта, однако, не гарантирует качество результата. Спрос на будущие удаления пока сконцентрирован у ограниченного круга покупателей, тогда как в выпуске и погашении единиц VCM преобладают сокращение и предотвращение выбросов. Сценарная потребность в удалении CO_2 сама по себе не обеспечивает платёжеспособного спроса. Масштабирование зависит от расширения круга покупателей, стабильности регулирования и способности разработчиков выполнять обязательства по поставкам[23].

Российский потенциал и опыт реализации CDR-проектов

Для России развитие рынка CDR проектов связано как с большим потенциалом природных экосистем по увеличению запасов углерода в лесах и почвах и восстановлением торфяников, так и с использованием биомассы и горнопромышленных материалов для долговременного хранения углерода. Климатическая доктрина Российской Федерации устанавливает цель достижения баланса антропогенных выбросов парниковых газов и их поглощения не позднее 2060 г.[24] Наличие природных ресурсов и промышленной базы создаёт возможности для проектов, однако доступный объём дополнительного удаления определяется условиями конкретной площадки, технологией и экономикой её применения.

Накопление углерода в почвах (soil carbon). В Самарской области на землях ООО «Орловка-АИЦ» реализован проект почвозащитного ресурсосберегающего земледелия, связанный с работой аграрного карбонового полигона «Агро Инженерия». В июне 2025

21 MSCI Carbon Markets. Investment and Offtake Trends in the Global Carbon Credit Market. April 2026. P. 5–7; Appendix B. URL приведён в предыдущей сноске на MSCI.

22 MSCI Carbon Markets. Investment and Offtake Trends in the Global Carbon Credit Market. April 2026. P. 4, 10–11. URL приведён выше.

23 Carbon Direct. Key Trends in the 2026 Voluntary Carbon Market. 10 February 2026; updated 21 September 2026. https://relae.co/blog/voluntary-carbon-market-trends-2026 ; Edwards M. R. et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition. 2026. Executive summary, p. 14–16; section 4.4, p. 104. DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65.

24 Климатическая доктрина Российской Федерации, утверждённая Указом Президента РФ от 26.10.2023 № 812, п. 21. Текст пункта: РИТМ углерода, 26.10.2023. https://ritm-c.ru/regulatory-documents/ukaz-prezidenta-rossijskoj-federaczii-ot-26-10-2023-g-%E2%84%96-812-ob-utverzhdenii-klimaticheskoj-doktriny-rf/ .

г. подтверждён выпуск в обращение 40 924 углеродных единиц[25]. Это пример перехода от внедрения агропрактик и мониторинга к выпуску единиц. Показатель характеризует совокупный климатический результат проекта: его нельзя целиком считать объёмом удаления CO_2 без разграничения прироста запасов почвенного углерода и сокращения выбросов.

Восстановление торфяников. Проект «Оршинский мох» в Тверской области реализуется Центром технологий устойчивого развития (ЦТУР) по заказу ООО «АрнестЮниРусь» с 2024 г. на площади около 1 200 га. Проект зарегистрирован в российском реестре углеродных единиц 9 января 2025 г. Прогноз на первые десять лет – сокращение выбросов на 170 419 т CO_2-экв.[26] По мере восстановления торфообразующей растительности и накопления нового торфа к сокращению выбросов добавляется удаление CO_2. Поэтому прогноз сокращений и последующее поглощение необходимо учитывать раздельно.

Минерализация углерода. На хвостохранилище обогатительной фабрики № 3 Мирнинско-Нюрбинского ГОКа АЛРОСА в Якутии внедрён проект увеличения поглощения атмосферного CO_2 кимберлитовыми хвостами. С сентября 2025 г. хвосты коренных и россыпных месторождений складируются раздельно, что устраняет фактор, подавляющий карбонизацию кимберлита. Проект зарегистрирован 11 июня 2026 г.[27] Это пример включения долговременного минерального хранения углерода в действующий производственный процесс; перспективы тиражирования связаны с наличием реакционноспособного сырья на других горнодобывающих предприятиях.

Улучшенное лесопользование (IFM). Российская практика включает и более ранний опыт углеродного финансирования сохранения лесов. Рассмотренный в главе IFM Бикинский проект в Приморском крае был направлен на защиту лесов от промышленной вырубки и оформлялся в рамках механизма совместного осуществления Киотского протокола[28]. Его значение для развития CDR связано с опытом проектирования, мониторинга и взаимодействия с местными сообществами. При этом предотвращение выбросов вследствие отказа от рубок необходимо отличать от дополнительного удаления CO_2 за счёт роста леса.

Наиболее перспективные направления. С учётом рассмотренного опыта наиболее перспективными для России в ближайшие годы направлениями для проектов CDR являются: лесоразведение и лесовосстановление, накопление углерода в сельскохозяйственных почвах и восстановление торфяников. Эти направления опираются на уже применяемые хозяйственные и природоохранные меры, но требуют методологически доказуемого прироста запасов углерода и его сохранения. Среди методов с длительным хранением особый интерес для России представляют минерализация подходящих горнопромышленных материалов и производство биочара из доступных отходов лесопереработки и сельского хозяйства. Первый подход уже имеет промышленный пример, второй позволяет использовать существующие потоки биомассы. BECCS и DACCS целесообразно рассматривать как более долгосрочные направления: их развитие требует подходящих источников энергии, инфраструктуры обращения с CO_2 и подготовленных хранилищ.

---

25 Самарский университет. Самара – от космической к карбоновой столице России. 26.06.2025. https://ssau.ru/news/24491-samara-ot-kosmiceskoi-k-karbonovoi-stolice-rossii . См. также главу «Накопление углерода в почвах», раздел 4, с. 60–61.

26 ЦТУР. Первый климатический проект по вторичному обводнению осушенных торфяников в Российской Федерации. https://csdt.ru/projects/tpost/72bidd0yt1-pervii-klimaticheskii-proekt-po-vtorichn . См. главу об обводнении торфяников, разделы 4 и 10, с. 30 и 36

27 АЛРОСА. АЛРОСА реализовала первый в России климатический CDR проект. 15.06.2026. https://www.alrosa.ru/press-center/news/2026/alrosa-realizovala-pervyy-v-rossii-klimaticheskiy-cdr-proekt/

28 TÜV SÜD. Bikin Tiger Carbon Project – Permanent protection of otherwise logged Bikin Forest, in Primorye Russia. Determination Report No. 600500624, rev. 4, 30.10.2012, p. 1–2. https://ji.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/PETMXG0ISN186RA7VQOLFDJ49KB5UH . См. главу IFM, с. 18–19.

01



Лесоразведение и лесо-восстановление

ARR



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Такие проекты часто называются ARR-проектами. Это означает afforestation, reforestation и revegetation – это разные типы проектов, направленных на превращение нелесных земель в лесные:

- **Reforestation (лесовосстановление)** – посадка саженцев на территориях, где леса существовали в ближайшем прошлом (например, в течение 10 последних лет), но были вырублены или уничтожены пожарами, насекомыми и т. д.
- **Afforestation (облесение, лесоразведение)** – посадка саженцев на территориях, где лесов не было как минимум 10 лет, с целью создания новых лесных экосистем.
- **Revegetation (лесо- и фитомелиорация)** – восстановление древесного и/или кустарникового покрова на нарушенных землях, например на деградированных пастбищах, терриконах, отвалах и т. д.

Климатические проекты по лесоразведению и лесовосстановлению предполагают создание или восстановление лесной и/или кустарниковой растительности, в результате которой обеспечится увеличение запаса углерода в надземной и подземной фитомассе, почве и других пулах. Мероприятия проекта представляют собой, как правило, подготовку почвы и высадку саженцев / черенков/ семян определенных видов древесной и кустарниковой растительности, уход за ними до достижения устойчивости, охрану и защиту насаждений.

Данный тип климатических проектов возможен на землях различного назначения: на землях лесного фонда, сельскохозяйственных землях, городских землях и тд. При этом имеются как правовые, так и методологические ограничения по реализации таких проектов.

Например, такие проекты исключают ведение коммерческих рубок древесины, только прореживание или санитарные рубки по состоянию насаждений. На землях лесного фонда проекты по лесовосстановлению возможны только в защитных насаждениях, где коммерческие рубки не планируются и не ведутся. Проекты по облесению на сельхозземлях возможны к реализации только на земельных участках, выделенных под агролесомелиорацию, включая полезащитные и противоэрозионные лесополосы. Площадное лесоразведение на землях сельскохозяйственного назначения запрещено законодательством, за исключением облесения оврагов и балок.

Технологическая готовность таких проектов достаточно высокая, т.к. практики лесоразведения и лесовосстановления широко применяются в лесном и сельском хозяйстве,

накоплен огромный опыт их реализации в различных почвенно-климатических условиях. При подготовке таких проектов надо рассчитывать не только запас или прирост стволовой биомассы, но и баланс углерода во всей надземной и подземной биомассе, почве. Базовый сценарий определяется с учетом самозарастания, для чего ведутся специальные исследования (динамическая базовая линия).

2. Экономика CDR-проектов

Доход проекта для девелопера формируется за счет продажи углеродных единиц покупателю. Косвенным доходом может быть повышение урожайности сельскохозяйственных угодий от лесополос, лучшая их защита культур от климатических шоков.

Затраты включают в себя:

Подготовительный этап

① Поиск оптимальной площадки для реализации проекта (выход УЕ может в разы отличаться даже на схожих площадках из-за особенностей динамической базовой линии, почвенно-климатических условий и т. д.)
② Проведение технико-экономического обоснования (ТЭО) для выбранной площадки
③ Подготовка проектной документации (PDD), регистрация и валидация проекта

Этап реализации проекта

④ Подготовка почвы к посадке (скарификация в лесу, подготовка ям)
⑤ Покупка и доставка посадочного материала
⑥ Посадка саженцев и первичный уход (2–3 года)
⑦ Формирование насаждения (включая прореживание, уходы).
⑧ Регулярный мониторинг и подготовка отчетности
⑨ Защита насаждений от различных рисков

В себестоимость входят как капитальные затраты (закупка саженцев, посадка), так и операционные затраты (уходы, мониторинг, лесозащита). В себестоимость также входит ТЭО, подготовка документации, регистрация, валидация и верификация проекта, мониторинг (климатический проект). Оптимальная себестоимость УЕ для проекта по лесоразведению в мире варьируется в районе 8–10 долларов за УЕ, в зависимости от масштаба и параметров проекта. В России данных по себестоимости нет, однако в условиях Казахстана

себестоимость равна 7–8 $ за УЕ (при механизированной посадке и орошении в первые годы). Цена УЕ на рынке находится в диапазоне от 5 до 50$, в зависимости от рейтинга (качества) проекта, средняя величина 15–20$. Ввиду того, что CAPEX в таких проектах приходится на первые 2–3 года, окупаемость через продажу УЕ наступает не ранее, чем на 7–8 год проекта, после чего проект приносит чистую прибыль. Окупаемыми являются масштабные проекты по облесению площадью не менее 500 га, а лучше — более 1000 га.

3. Рыночная ситуация

До 2021–2023 гг. на рынке преобладало предложение УЕ от проектов по избежанию вырубки (тропических) лесов REDD+. После ряда публикаций в СМИ интерес к таким проектам существенно снизился, так как многие из них завышали выход УЕ из-за ошибок расчета базового сценария на проектных площадках. Проекты ARR стали особенно популярными после 2023 года, сектор ARR стал одним из наиболее быстро растущих. Ожидается, что к 2030 году выпуск кредитов по известным ARR-проектам достигнет 100 млн т CO_2 в год[1].

Для повышения привлекательности ARR проектов используются различные механизмы. Часть ARR-проектов имеет дополнительную сертификацию CCB, SD Vista, Abacus для повышения рейтинга проектов. Ряд реестров, например Verra, получили одобрение организации ICVCM (т.н. CCP label) на ARR методологии, что также повышает доверие покупателей. Все это позволяет повысить привлекательность и цену УЕ, улучшить отдачу на инвестиции в проект.

Углеродные кредиты ARR набирают популярность, особенно те, которые связаны с восстановлением деградированных земель, сохранением биоразнообразия, вовлечением местного населения в проектную деятельность. По данным DGB Group, такие технологические компании, как Microsoft и Google, поддерживают премиальные проекты ARR, иногда выплачивая до 70 долларов за тонну CO_2 . Эти более высокие цены отражают ожидания покупателей в отношении очевидных экологических преимуществ, долгосрочной устойчивости и высокой прозрачности[2].

Значимым драйвером рынка ARR стала Symbiosis Coalition, основанная Google, Microsoft и другими технологическими гигантами. Альянс заключает крупные offtake-соглашения (гарантированные закупки) с ARR-проектами и ставит целью достижение 20 млн т удаления углерода к 2030 году при цене около 50–55 долларов за тонну.

1 https://www.msci.com/documents/1296102/49646629/MSCI+Carbon+Project+Ratings+-+ARR+Methodology+vPUBLIC.pdf/7b841733-13c5-99e5-cfc3-7cc8c9853de0?t=1732207396485

2 https://www.green.earth/news/tech-giants-drive-up-demand-and-prices-for-arr-carbon-credits

4. Обзор ключевых проектов

Brazil Cerrado 1 (Verra Project 5511) – первый выпуск кредитов по VM0047	Этот проект стал первым в мире, получившим углеродные кредиты по методологии VM0047. Проект расположен в бразильских штатах и восстанавливает деградированные пастбища, ранее подвергавшиеся повторным циклам расчистки. Зарегистрирован в Verra и Climate, Community & Biodiversity Standards. Площадь восстановления – до 25 000 га, потенциальное удаление – около 7 млн т CO_2 за 20-летний период. В апреле 2026 года Verra одобрила выпуск первых 230 120 углеродных кредитов для этого проекта.
The International Small Group and Tree Planting Program (TIST) – миллионы деревьев в Кении и других странах	Программа, объединяющая мелких фермеров в небольшие группы для посадки и выращивания деревьев, восстановления лесного покрова и увеличения поглощения углерода. Деревья высаживают на сельскохозяйственных и деградированных землях, а поглощение углерода оценивают с помощью учёта деревьев и независимой проверки. География: Кения, Уганда, Танзания и Индия. По данным Verra, программа охватывает миллионы деревьев и включает механизм распределения доходов от углеродных кредитов в пользу фермеров. Пример масштабирования ARR через множество небольших участков. Источник: https://verra.org/case-studies/the-tist-model/
Afforestation of Degraded Grasslands in Vichada – один из крупнейших ARR-проектов в Латинской Америке	Пример ARR-проекта, основанного на создании коммерческих лесных плантаций на деградированных землях. Проект реализуется в департаменте Вичада на востоке Колумбии и направлен на восстановление деградированных пастбищ путем высадки древесных пород. Эта модель ARR сочетает увеличение запасов углерода в древесной биомассе с коммерческим использованием древесины. Согласно описанию проекта, первоначальный проектный участок включает низкоплодородные пастбища, деградировавшие в результате животноводства. Для восстановления земель предусмотрена посадка эвкалипта и акации. Проект совмещает климатический эффект от увеличения запасов углерода в живой биомассе с коммерческим использованием древесины.

Такая модель позволяет потенциально получать доходы не только от продажи углеродных единиц, но и от реализации древесной продукции. Прогнозируемое среднегодовое сокращение выбросов и поглощение: около 139 489 т CO_2-экв.

5. Стандарты и методологии

Verra (Verified Carbon Standard, VCS) VM0047 – Afforestation, Reforestation, and Revegetation

Золотой стандарт в области лесовосстановления и облесения. Методология введена в 2023 году взамен CDM-методологий. Использует динамическую базовую линию, т.е. оценивает возможность самозарастания территории по специально подобранным контрольным точкам (ранее это не учитывалось). Покупатели и девелоперы доверяют методологии, используют ее как основной глобальный инструмент для разработки ARR-проектов на добровольном и регулируемом углеродном рынке.

Gold Standard A/R (Afforestation/Reforestation) framework

Методологии Gold Standard чаще применяются в проектах с выраженной социальной направленностью, включая агролесоводство и малые хозяйства в беднейших странах.

American Carbon Registry (ACR) Afforestation/Reforestation of Degraded Lands

Методология направлена на восстановление деградированных земель с учётом строгих требований к дополнительности и долговременности углеродных эффектов.

Climate Action Reserve (CAR) U.S. Forest Protocol

Протокол регулирует проекты в области лесного хозяйства, включая элементы ARR. Основное внимание уделяется точности инвентаризации углерода и долгосрочному сохранению высаженных лесов.

6. Преимущества

① Обычно не требует высокотехнологичной инфраструктуры и технологий

② Относительно низкая себестоимость УЕ, по сравнению с другими CDR проектами

③ Наличие традиционного опыта, знаний, экспертов

④ В России значительный потенциал для таких проектов

7. Вызовы и ограничения

① Высокая стоимость капитальных вложений (от 100 млн руб), что подразумевает его реализацию как инвестпроекта

② Логистические вопросы (часто отсутствуют питомники, нужный ассортимент саженцев)

③ Кадры (необходим специфический опыт в агролесомелиорации, который часто отсутствует)

④ Различные риски, включая риски постоянства (высыхание саженцев, отпад и т. д.), риски по биоразнообразию и т. д.

Долгосрочный успех ARR-проекта напрямую зависит от проектирования мероприятий, качества подготовки почвы, посадочного материала и уходов, от мероприятий по охране и защите лесов, от рейтинга проектов (проекты с рейтингом ниже BB могут не окупиться), от взаимоотношений с местным населением и властями.

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Система MRV (Monitoring, Reporting and Verification) является ключевым элементом обеспечения экологической целостности ARR-проектов и лежит в основе выпуска углеродных кредитов. Она регламентируется требованиями международных стандартов (Verra, Gold Standard, ACR и др.) в соответствующих методологиях.

Мониторинг в ARR-проектах направлен на отслеживание динамики углеродных запасов в биомассе и почвах, а также иных параметров экосистем. Современные подходы предполагают переход к цифровому MRV (**dMRV**), при котором данные собираются автоматически, имеют временные метки и обеспечивают полную прослеживаемость. Для проведения мониторинга необходимо провести стратификацию проектной площадки, привязывать мероприятия по мониторингу к стратам.

Ключевые особенности:

— регулярные полевые измерения (биомасса, диаметр деревьев, плотность посадок);
— использование дистанционного зондирования Земли (спутниковые снимки, LiDAR);
— интеграция данных из различных источников (сенсоры, геоинформационные системы).

Отчетность требует формализованного представления результатов мониторинга в соответствии с требованиями конкретной методологии (например, VM0047).

Верификация является завершающим этапом MRV и осуществляется независимыми аккредитованными организациями (Validation and Verification Bodies, VVB). Верификация подтверждает, что заявленные сокращения или поглощения выбросов соответствуют установленным требованиям и могут быть конвертированы в углеродные кредиты.

Основные характеристики:

— проводится третьей стороной, независимой от разработчика проекта;
— включает проверку:
  ① корректности мониторинга компании-девелопера;
  ② соответствия методологии;
  ③ достоверности расчётов;
— Верификация проводится в форме аудита, выездной инспекции и анализа представленных данных.

Современные ARR-проекты характеризуются высокой технологической сложностью MRV: использование спутникового мониторинга и геопространственного анализа; применение IoT-датчиков и автоматизированных систем сбора данных; интеграция данных в единые цифровые платформы; использование блокчейн-решений для обеспечения неизменяемости данных. Такие решения позволяют повысить точность измерений, снизить транзакционные издержки и ускорить процесс верификации.

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Такие выгоды являются важнейшей составляющей ARR-проектов, они обеспечивают проектам дополнительную ценность.

① **Повышение биоразнообразия** путем восстановления деградированных ландшафтов и естественных местообитаний, поддерживающих разнообразные виды растений и животных.

② **Предотвращение эрозии, улучшение здоровья и плодородия почвы** повышают экономические стимулы к реализации проекта.

③ Увеличение лесопокрытой площади способствует **поддержанию водного баланса территории**, удержанию и пополнению влагозапаса в почве, снижению влияния засух.

④ **Экономические:** Эти виды деятельности могут создавать рабочие места в лесном хозяйстве, охране природы и смежных отраслях, а также обеспечивать долгосрочные экономические выгоды за счет устойчивого управления ресурсами.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Проекты имеют ограничение по реализации. Нельзя реализовывать на водно-болотных угодьях в рамках их мелиорации, на тех участках лесного фонда, где в дальнейшем планируются коммерческие рубки. Не являются климатическими ситуации самозарастания – насаждение должно быть создано целевым образом за счет направленной деятельности человека. Также проекты имеют малую углеродную дополнительность в лесной зоне из-за эффекта самозарастания. Их максимальная эффективность – в степных и лесостепных участках, в условиях низкой базовой линии.

11. Краткое содержание из интервью представителя компании-девелопера

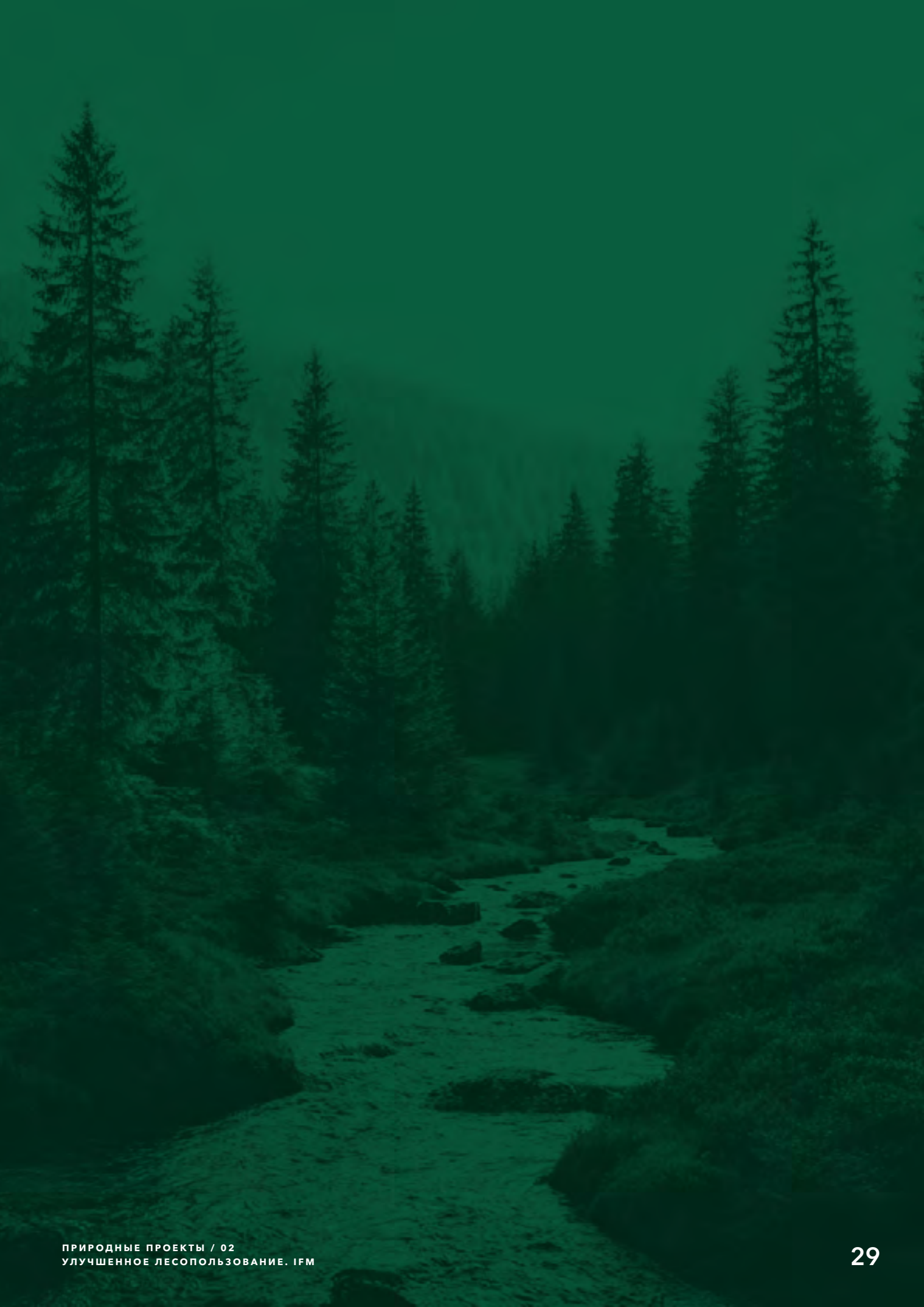
Компания SAFC (Казахстан) первой в СНГ подготовила и реализовала пилотный ARR-проект площадью 1500 га в Южном Казахстане. К моменту публикации проект находится на финальной стадии регистрации в Verra. Проект реализован по офтейк-договору с крупной международной газовой компанией. Проект направлен на восстановление деградированных сельскохозяйственных земель, выпавших из хозяйственного оборота примерно 30 лет назад. Проект предусматривает посадку 1500 га лесных культур (тополь, местне виды деревьев) в течение трех лет. Механизированная посадка ведется в условиях капельного орошения, проведенного в рамках проекта. В дальнейшем территорию планируется использовать под рекреацию. Выход УЕ – 20 УЕ / га*год, в среднем за 30 лет проекта. По словам девелопера проекта Юрия Кима, “в проекте используется специально разработанный цифровой двойник, позволяющий контролировать и отслеживать все процессы на земле и в климатическом проекте. Проект является полигоном для отработки цифровых методов управления ПКП”.

02



Улучшенное лесопользование

IFM



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Улучшенное лесопользование (improved forest management, IFM) – это такое лесопользование, при котором происходит снижение эмиссий ПГ и/или повышение поглощения CO_2 по сравнению с обычным лесопользованием в данном регионе или типе леса.

Примером деятельности по IFM служит целенаправленная деятельность арендатора, направленная на снижение горимости лесов. К ней может относиться усиление профилактики, выявления и тушения лесных пожаров. В результате этой деятельности обеспечивается количественное снижение горимости, которое выражается в ежегодном сокращении площади, пройденной пожарами. Стойкое снижение горимости означает предотвращение эмиссий ПГ, по сравнению с обычным лесопользованием на соседних территориях, где площадь пожаров только растет.

Другим примером деятельности по IFM является снижение объема заготовки при проведении рубок, например оставление на лесосеке значительной площади ключевых биотопов, семенных деревьев, сохранение защитных полос вдоль лесных водотоков. Еще одним примером является увеличение возраста рубки более чем на 20 лет, в результате чего деревья депонируют больше углерода за жизненный цикл.

Данный тип климатических проектов возможен прежде всего на землях лесного фонда. При этом имеются как правовые, так и методологические ограничения по реализации таких проектов. Проводить такие проекты могут только арендаторы, имеющие аренду с целью заготовки древесины. Проекты реализуются главным образом в эксплуатационных лесах. Обязательным условием является наличие устойчивых практик лесопользования, которые с одной стороны не противоречат требованиям законодательства и иных нормативных документов, а с другой стороны являются новаторскими, по сравнению со стандартной практикой лесопользования в регионе.

Технологическая готовность таких проектов достаточно высокая, т.к. многие лесопользователи имели опыт реализации более устойчивых практик, например в рамках перехода на интенсивное использование и воспроизводство лесов, либо в экспериментальном режиме (в модельных лесах, на демонстрационных площадях и т. д.). Ранее в РФ было реализовано два подобных лесоклиматических проекта: Бикинский (в Киотский период) и Тернейский, которые показали возможность реализации таких проектов в РФ.

2. Экономика проектов по устойчивому лесопользованию

Доход проекта для девелопера формируется за счет продажи углеродных единиц покупателю.

Затраты включают в себя:

Подготовительный этап ›

① Поиск оптимальной площадки для реализации проекта (выход УЕ может в разы отличаться даже на рядом расположенных площадках из-за особенностей методологий, например, при разном уровне освоения расчетной лесосеки)

② Проведение технико-экономического обоснования (ТЭО) для выбранной площадки

③ Внесение изменений в проект освоения лесов (при необходимости), подписание договора о реализации проекта с Рослесхозом

④ Подготовка проектной документации (PDD), регистрация и валидация проекта

Этап реализации проекта ›

⑤ Реализация улучшенного плана управления лесами (новые подходы к уходу за лесом, рубки лесов и т. д.)

⑥ Действия, направленные на снижение горимости лесов и т. д.

⑦ Регулярный мониторинг и подготовка отчетности

В себестоимость входят как капитальные затраты (приобретение специальной техники), так и операционные затраты (уходы, мониторинг, лесозащита и т. д.). В себестоимость также входит ТЭО, подготовка документации, регистрация, валидация и верификация проекта, мониторинг (климатический проект). Оптимальная себестоимость УЕ для проекта по устойчивому лесопользованию в мире варьируется в районе 3–10 долларов за УЕ, в зависимости от масштаба и параметров проекта. При реализации таких проектов возможна ситуация, когда при реализации проекта достигается только частичная (неполная) окупаемость (например, при реализации лесопожарных проектов). В этом и других случаях арендатор может получить иные косвенные выгоды — например, увеличение запаса лесов, снижение затрат на рубку проблемных участков — которые могут способствовать полной окупаемости проекта.

3. Рыночная ситуация

До 2021–2023 гг. на добровольном рынке преобладало предложение УЕ от проектов по избежанию вырубки (тропических) лесов типа REDD+. После ряда публикаций в СМИ интерес к таким проектам существенно снизился, так как многие из них из-за некорректного определения базовой линии на проектной территории завышали выход УЕ. Проекты по устойчивому лесопользованию стали особенно популярными после 2023 года, IFM стал одним из быстрорастущих секторов, особенно в лесных странах: США, Канаде, Австралии и т. д.

Прогнозы

Основные покупатели
Углеродные кредиты IFM набирают популярность, особенно те, которые связаны с пионерным переходом на новые виды лесопользования, сохранением биоразнообразия, вовлечением местного населения в проектную деятельность. Цена УЕ в проектах IFM является довольно высокой и может достигать 30–35 долларов за УЕ в отдельных случаях из-за высокой себестоимости таких УЕ. Это отражает желание покупателей диверсифицировать свой портфель инвестиций в ПКП за счет поддержки качественных инициатив в секторе IFM.

4. Обзор ключевых проектов

Бикинский проект:

Бикинский проект является одним из наиболее известных российских примеров применения подхода улучшенного управления лесами для сохранения лесных экосистем высокой природоохранной ценности. Проект был направлен на предотвращение промышленной вырубки уникальных кедрово-широколиственных лесов в бассейне реки Бикин и на создание экономических стимулов для долгосрочного сохранения лесной территории. В период 2009–2012 годов проект способствовал сохранению более 460 тыс. га первичных лесов в бассейне реки Бикин в Приморском крае. Его особенность заключалась в изменении модели использования лесных ресурсов: вместо передачи территории лесозаготовительной компании лесной участок был предоставлен в долгосрочную

аренду местной организации, представлявшей интересы коренных народов. Основной целью такого решения было сохранение леса при одновременном обеспечении условий для традиционного природопользования, включая охоту, рыболовство и сбор недревесных лесных ресурсов.

В рамках проекта в аренду было передано около 461 тыс. га лесных угодий сроком на 49 лет. Предусмотренный режим использования территории ограничивал возможности промышленной лесозаготовки и создавал условия для сохранения крупных непрерывных массивов первичных лесов, имеющих особое значение для биоразнообразия региона и сохранения местообитаний амурского тигра. При этом проектная модель допускала ограниченное использование древесных ресурсов: согласно описанию проекта, около 10% территории предполагалось использовать для рубок, в том числе для покрытия расходов, связанных с арендой.

Ключевым элементом финансовой модели стало углеродное финансирование. Экономическая логика проекта основывалась на том, что сохранение лесов от вырубки позволяет избежать выбросов парниковых газов, которые могли бы возникнуть при реализации альтернативного сценария лесопользования. Для монетизации этого климатического эффекта использовался механизм проектов совместного осуществления (ПСО, Joint Implementation) Киотского протокола. Покупателем единиц сокращения выступила британская компания CF Partners. Общая сумма сделки составила около 17 млн руб. за 520 тыс. т CO_2 (цена 2012 года). Деньги проекта направлены на мероприятия по борьбе с нелегальными вырубками, противопожарную охрану лесов и социальное развитие сел. Источник: https://carbonplatform.ru/klimaticheskiye-proyekty-ne-v-reestre

В долгосрочной перспективе проект стал частью более широких усилий по сохранению экосистемы Бикина. В 2015 году на этой территории был создан национальный парк «Бикин» площадью около 1,16 млн га, а в 2018 году он был включён в Список всемирного наследия ЮНЕСКО. Эти события отражают переход от отдельных инициатив по сохранению лесов к более комплексной системе охраны территории.

Проект Терней Лес:

Другим примером является аналогичный проект в аренде компании Терней Лес. Компания задумала его в рамках добровольного углеродного рынка. Проект был зарегистрирован в реестре Verra, однако до стадии верификации не дошел по разным причинам.

В Китае, США, Австралии реализованы десятки подобных проектов, УЕ этих проектов успешно реализуются в рамках климатических программ ACR и других.

5. Стандарты и методологии

Методологии по устойчивому лесопользованию имеются в программах Verra, CAR, ACR и ряде других. Общее число методологий IFM – более 10, из них логотип CCP (Core Carbon principles) имеется у трех из них:

① ACR Improved Forest Management (IFM) on Non-Federal U.S. Forestlands, v 2.1
② CAR Mexico Forest Protocol, v 3.0
③ Verra VM0045 Improved Forest Management Methodology Using Dynamic Matched Baselines from National Forest Inventories, v 1.2

В рамках CORSIA дополнительно аккредитованы многие методологии Verra для нетропических лесов, например, VM0012 (Improved Forest Management in Temperate and Boreal Forests), VM0010 (Improved forest management) и ряд других.

Примеры:

Verra (Verified Carbon Standard, VCS) VM0010 Improved forest management

Данная методология позволяет количественно оценить эффект от предотвращения эмиссий ПГ в результате невырубки лесов. Методология применима в тех случаях, когда базовый сценарий включает запланированную заготовку древесины, а в рамках проектного сценария лесопользование ограничивается деятельностью, не приводящей к коммерческой заготовке древесины или деградации лесов. Данная методология применима к тропическим, умеренным и бореальным лесам.
В реестре Verra таких проектов зарегистрировано 87. Основные страны – Китай, Канада, Австралия (Тасмания) и ряд других.

Climate Action Reserve (CAR) U.S. Forest Protocol

Протокол регулирует проекты в области лесного хозяйства, включая элементы IFM. Основное внимание уделяется точности инвентаризации углерода и долгосрочному сохранению высаженных лесов.

6. Преимущества

① Относительно низкая себестоимость УЕ по сравнению с другими проектами

② Выход УЕ сразу, без постепенного накопления, как в ARR проектах

③ Проектная деятельность фактически ведется некоторыми арендаторами на протяжении длительного времени

④ Наличие прецедентов в РФ, включая документацию

⑤ В России значительный потенциал для таких проектов

7. Вызовы и ограничения

① Необходимость согласования такого проекта с Рослесхозом

② Высокие риски утечек

③ В основном УЕ относятся к категории avoidance, они менее популярны на рынке, чем УЕ от CDR

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Система MRV (Monitoring, Reporting and Verification) является ключевым элементом обеспечения экологической целостности IFM-проектов и лежит в основе выпуска углеродных кредитов. Она регламентируется требованиями международных стандартов (Verra, ACR и др.) в соответствующих методологиях.

Мониторинг в IFM-проектах направлен на отслеживание баланса ПГ в наземной фитомассе, а также иных параметров экосистем. Современные подходы предполагают переход к цифровому MRV (dMRV), при котором данные собираются автоматически, имеют временные метки и обеспечивают полную прослеживаемость. Для проведения мониторинга необходимо провести стратификацию проектной площадки, привязывать мероприятия по мониторингу к стратам.

Ключевые особенности:

— регулярные полевые измерения;
— использование дистанционного зондирования Земли (спутниковые снимки, LiDAR);
— интеграция данных из различных источников (сенсоры, геоинформационные системы).

Отчетность требует формализованного представления результатов мониторинга в соответствии с требованиями конкретной методологии (например, VM0010, VM0012).

Верификация является завершающим этапом MRV и осуществляется независимыми аккредитованными организациями (Validation and Verification Bodies, VVB). Верификация подтверждает, что заявленные сокращения или поглощения выбросов соответствуют установленным требованиям и могут быть конвертированы в углеродные кредиты.

Основные характеристики:

— проводится третьей стороной, независимой от разработчика проекта;
— включает проверку:
  ① корректности мониторинга компании-девелопера;
  ② соответствия методологии;
  ③ достоверности расчётов;

Верификация проводится в форме аудита, выездной инспекции и анализа представленных данных.

Современные IFM-проекты характеризуются высокой технологической сложностью MRV: использование моделей хода роста и заготовки древесины, интеграция данных в единые цифровые платформы; использование блокчейн-решений для обеспечения неизменяемости данных. Такие решения позволяют повысить точность измерений, снизить транзакционные издержки и ускорить процесс верификации.

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Такие выгоды являются важной составляющей IFM-проектов, они обеспечивают проектам дополнительную ценность.

Сохранение биоразнообразия путем приоритетного сохранения наиболее ценных лесов высокой природоохранной ценности, ключевых биотопов, редких экосистем.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Проекты имеют ограничение по реализации. Проекты по добровольному сохранению лесов возможны в рамках действующего законодательства, которое обязывает арендаторов вырубать не менее 60–70% расчетной лесосеки. Проекты по повышению возраста рубки древостоев требуют серьезного научного обоснования, должны быть отражены в проектах освоения лесов.

Эти углеродные кредиты обычно выдаются на основе предотвращенных выбросов. Предотвращенные выбросы рассчитываются как разница между выбросами, которые произошли бы при реализации проекта, по сравнению с выбросами без проекта (т.е. разница между выбросами в исходных условиях и выбросами по сценарию проекта). Количественная оценка поглощения углерода производится путем измерения роста лесной биомассы на пробных площадках, использования данных лесоустройства.

Проекты IFM должны признавать, уважать и внедрять системы управления как коренных народов, так и местных сообществ (пример Бикинский проект, проект Терней Лес). Доказано, что это снижает конфликтность и повышает эффективность проектов, а также повышает вероятность защиты прав как коренных народов, так и местных сообществ.

03

Вторичное обводнение осушенных торфяников

REWETTING OF DRAINED PEATLANDS



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Торфяники занимают 3–4% суши, но хранят до трети почвенного углерода мира, а их осушение и деградация дают около 4% антропогенных выбросов парниковых газов. Поэтому восстановление осушенных торфяников позволяет одновременно сократить выбросы и вернуть утраченные функции водно-болотных экосистем[1].

В естественном состоянии торфяник насыщен водой. Высокий уровень болотных вод (УБВ) ограничивает доступ кислорода в торфяную залежь, растительные остатки разлагаются не полностью, и углерод накапливается в ней тысячелетиями. Осушение с целью добычи торфа, сельскохозяйственного или лесохозяйственного использования понижает УБВ. Осушенный торф начинает минерализоваться, и торфяник из накопителя углерода превращается в источник парниковых газов: он выделяет CO_2, а на сельскохозяйственных землях также и N2O. Кроме того, сухой торф пожароопасен[2].

Вторичное обводнение представляет собой перекрытие осушительной сети дамбами и перемычками, которые строят из местных материалов. В результате вода задерживается на территории проекта, УБВ поднимается и торфяная залежь снова насыщается водой. Проектные решения принимают по результатам обследования рельефа, осушительной сети и водного баланса[3].

Климатический эффект обводнения складывается постепенно. Сразу после подъёма УБВ минерализация торфа резко замедляется и выбросы CO_2 сокращаются — это главный и наиболее быстрый результат проекта. На этом этапе происходит временное повышение CH4. По мере того как участок зарастает торфообразующими растениями — сфагновыми мхами на верховых болотах, осоками, тростником и гипновыми мхами на низинных, — выбросы CH4 снижаются, и начинается поглощение CO_2. Только с этого момента проект даёт удаление CO_2 из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR).

1 UNEP. Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands. 17.11.2022; глобальная оценка, доступная на октябрь 2026 г.

2 IPCC. 2013 Wetlands Supplement, главы 2–3; IPCC. 2006 Guidelines, Volume 4, Chapter 7: Wetlands; разд. 7.2: подготовка участков и добыча торфа. IPCC. Special Report on Climate Change and Land, Chapter 4; причины осушения: сельское хозяйство, добыча торфа и лесохозяйственное использование. Bord na Móna. Blackwater Group, Annual Environmental Report 2011; март 2012 г., разд. 1.3: каналы между полями фрезерной добычи и подсушивание торфа.

3 Convention on Wetlands. Practical peatland restoration. Briefing Note 11, 2021; с. 4–9.

Результат проекта учитывают по трём основным парниковым газам — CO_2, CH4 и N2O, — пересчитывая их в тонны CO_2-эквивалента по потенциалам глобального потепления[4].

Масштаб сокращения выбросов показывают коэффициенты МГЭИК: осушенный торфяник под пашней теряет около 7,9 т углерода с гектара в год, или почти 29 т CO_2[5]. После обводнения выбросы снижаются примерно на 28–34 т CO_2-экв. с гектара в год на бывшей пашне, на 20–25 т на лугах, на 9–11 т на выработанных торфяниках и на 2–6 т в осушенных лесах[6].

Сроки перехода к поглощению зависят от климата, типа болота и того, насколько успешно восстанавливается растительность. Обобщение данных, на котором основаны коэффициенты МГЭИК, показывает, что большинство обводнённых торфяников со временем снова поглощает CO_2[7].

Продолжительность хранения (durability) › Углерод сохраняется в торфе тысячелетиями, пока залежь остаётся насыщенной водой. Поэтому на восстановленном участке срок хранения определяется устойчивостью водного режима, защитой от пожаров и от повторного осушения.

Технологическая готовность (Technology Readiness Level, TRL) › Перекрытие осушительной сети — отработанная практика. В докладе State of CDR (3-е изд., 2026) готовность восстановления торфяников оценена как средняя или высокая, без единого числового TRL. Возобновление торфообразования на каждом участке необходимо подтверждать мониторингом[8].

Масштабируемость › Технический потенциал сокращения выбросов за счёт восстановления торфяников оценивается в 0,5–2,5 млрд т CO_2-экв. в год к 2030 г. Масштаб ограничивают доступность воды, права на землю и необходимость менять хозяйственное использование осушенных территорий.

4 Günther A. et al. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions // Nature Communications, 2020, 11:1644; Back to the Future: Restoring Northern Drained Forested Peatlands for Climate Change Mitigation // Frontiers in Environmental Science, 2022; DOI: 10.3389/fenvs.2022.834371; Систематический обзор и метаанализ влияния обводнения торфяников на потоки CO_2 и CH4 // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2023; DOI: 10.1007/s11027-023-10046-9.

5 IPCC. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, гл. 2, табл. 2.1.

6 Greifswald Mire Centre. Reporting greenhouse gas emissions from organic soils in the European Union: challenges and opportunities. Policy brief, 2018, табл. 1 (по Wilson et al., 2016).

7 Wilson D. et al. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // Mires and Peat, 2016, 17(04), 1–28; DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.222.

8 The State of Carbon Dioxide Removal. 3rd Edition, Chapter 10: Costs and potentials. 2026, с. 246–247.

2. Экономика CDR-проектов

Экономика обводнения определяется совокупностью следующих показателей. Капитальные затраты (CAPEX) включают предпроектное обследование, проектирование и перекрытие дренажа, разработку проектной документации, валидацию, а эксплуатационные (OPEX) — аренду и управление земельными участками, обслуживание, мониторинг, верификацию и т. д. На сельскохозяйственных землях главными могут оказаться права на участок и компенсация утраченного дохода.

Цена единиц зависит не только от объёма сокращения выбросов, но и от стадии проекта и условий финансирования. Британский Peatland Code позволяет продавать будущие единицы ещё до верификации, и его цены нужно читать с учётом этого (табл. 1)[9].

Таблица 1. Продажи и цены будущих единиц Peatland Code

Показатель	2024 г.	2025 г.
Peatland Code: объём продаж в выборке, единиц	187 291	28 679
Средневзвешенная цена PIU на 1 т CO_2-экв. фунтов стерлингов	25,04	39,57

По данным Ecosystem Marketplace (Forest Trends), не менее 99% оборота приходится на будущие единицы (Pending Issuance Units, PIU); рост средней цены в 2025 г. дали три крупные сделки. Средней цены верифицированных единиц (Peatland Carbon Units, PCU) пока нет[10].

Посредник Senken приводит для восстановления торфяников 17–90 евро за 1 т CO_2-экв.: 17–18 евро в индонезийских сделках и около 89 евро в немецком портфеле. Это выборка одной платформы по проектам сокращения выбросов, и считать её среднерыночной ценой удаления CO_2 нельзя[11].

9 IUCN UK Peatland Programme. Peatland Code Project Stats. Срез 14.10.2026: Overview — 430 проектов, 61 142,37 га; итог UK area — 432 и 60 514 га. В тексте принят округлённый масштаб сводного блока; IUCN. Peatland Code FAQs; октябрь 2026: additionality, PIU; Hohlbein, Couwenberg. GMC 02/2019, с. 9, 20: региональная организация и издержки.

10 Woodland Carbon Code / Ecosystem Marketplace. UK carbon prices. Данные о сделках за 2024–2025 гг., обновление 2026 г.; добровольное раскрытие, по три респондента и пять торфяных проектов в год.

11 Senken. Carbon Credit Prices in 2026: What Companies Actually Pay. Обновлено 15.09.2026; разделы Carbon credit prices by methodology in 2026 и Peatland restoration price. Собственные данные о сделках 2024–2025 гг. и предложениях будущих поставок 2026 г.; проекты не раскрыты.

Немецкие MoorFutures продают сертификат на 1 т CO_2-экв. за 119–170 евро с НДС в зависимости от земли и проекта. Это цены прямой продажи через операторов; покупатель может заявить о вкладе в защиту климата, но не о компенсации своих выбросов[12].

3. Рыночная ситуация

Среди покупателей единиц торфяных проектов — энергетические компании (INPEX), авиакомпании (Lufthansa), банки (Hamburg Commercial Bank), компании связи (New Communication) и углеродные фонды вроде Inlandsis, которые покупают будущие единицы на ранней стадии. Из сегмента товаров повседневного спроса (FMCG) к восстановлению торфяников обращаются Diageo и «АрнестЮниРусь»: первая участвует в шотландских инициативах, вторая выступает заказчиком проекта «Оршинский мох» в России[13].

Международные добровольные программы. В январе 2026 г. фонд Inlandsis объявил о приобретении 100 000 единиц с проекта Pocosin Ecological Reserve I (программа ACR)[14].

Для тропических торфяников пример крупной сделки — соглашение INPEX 2021 г. о покупке единиц на 5 млн т CO_2-экв. за пять лет у проекта Rimba Raya в Индонезии[15].

Национальные и субнациональные программы. По британскому Peatland Code зарегистрировано около 430 проектов на 61 тыс. га, верифицированы пока 2. В Германии MoorFutures работает через операторов четырёх земель; классические сертификаты относятся к прогнозируемому сокращению выбросов, а пилотная MoorFuturesflex — к уже проверенному[16].

Покупателей называют реестры: по проекту Grotmoor это Hamburg Commercial Bank (760 сертификатов) и New Communication (120), по Märchenwiese Ichlim — Lufthansa через посредника myclimate (5 895)[17].

Поддержка без выпуска углеродных единиц. Финская Hiilipörssi, шотландская Peatland ACTION и австрийская LIFE AMooRe финансируют восстановление, но собственных

12 Ausgleichsagentur Schleswig-Holstein. MoorFutures Zertifikat. Карточка предложения Grotmoor; цена и условия на октябрь 2026 г; MoorFutures Brandenburg. Shop; Breeser See Nord-West. Shop. Цены с НДС, 18.10.2026; MoorFutures Brandenburg. MoorFutures Zertifikat; продавец Flächenagentur Brandenburg GmbH, 119 евро с НДС; просмотр 19.10.2026. MoorFutures Schleswig-Holstein. FAQ; цена Grotmoor и условия заявления о климатическом вкладе.

13 MoorFutures: сеть проектов; просмотр 18.10.2026. Grotmoor: реестр 10.07.2026; просмотр 18.10.2026; Diageo. Peatland Restoration Programme; обязательство объявлено 12.11.2025. RSPB Scotland. Major whisky makers join forces…, 18.11.2025; Национальная сеть Глобального договора ООН в России. Профиль ЦТУР; сведения о заказчике проекта; INPEX. INPEX to Support Rimba Raya REDD+ Project in Indonesia, Acquire Carbon Credits; 22.02.2021. MoorFutures. Stilllegungsregister Märchenwiese Ichlim; 03.12.2024, получатель myclimate для Lufthansa. Inlandsis. Pantheon Regeneration Announces Catalytic Pre-purchase; 21.01.2026.

14 ACR0430. Clayton Blocks; ACR1061. Pocosin Ecological Reserve I; карточки ICE GreenTrace, 18.10.2026; Inlandsis. Pantheon Regeneration Announces Catalytic Pre-purchase; 21.01.2026, 100 000 единиц.

15 INPEX. INPEX to Support Rimba Raya REDD+ Project in Indonesia, Acquire Carbon Credits; 22.02.2021, соглашение на 5 млн т за пять лет; сведения о полном исполнении контракта в сообщении отсутствуют.

16 IUCN UK Peatland Programme. Peatland Code Project Stats. Срез 14.10.2026: Overview — 430 проектов, 61 142,37 га; итог UK area — 432 и 60 514 га. В тексте принят округлённый масштаб сводного блока; Woodland Carbon Code / Ecosystem Marketplace. UK carbon prices. Данные о сделках за 2024–2025 гг., обновление 2026 г.; добровольное раскрытие, по три респондента и пять торфяных проектов в год.

17 MoorFutures. Stilllegungsregister Grotmoor; 10.07.2026: номера 00123-00662 и 00663-00882 для Hamburg Commercial Bank; 00003-00122 для New Communication. MoorFutures. Stilllegungsregister Märchenwiese Ichlim; 03.12.2024: myclimate для Lufthansa, 3 010 + 2 315 + 570 = 5 895 сертификатов.

единиц не выпускают[18]. Diageo в ноябре 2025 г. обязалась выделить до 5 млн фунтов стерлингов на восстановление до 3 000 га торфяников Шотландии[19].

4. Обзор ключевых проектов

Девелоперы: Tweed Forum и Philiphaugh Trust. Проект: Dryhope (Великобритания, Шотландия)	На участке 77 га в июле 2025 г. завершена первая пятилетняя верификация Peatland Code[20].
Девелоперы: Ausgleichsagentur Schleswig-Holstein и Landesforsten. Проект: Grotmoor (Германия)	Обводнение 95,64 га финансируется продажами MoorFutures. Заявленные 43 163 т CO_2-экв. за 50 лет — прогноз, а не достигнутый результат[21].
Девелопер: Центр технологий устойчивого развития (ЦТУР). Проект: «Оршинский мох» (Россия, Тверская область)	Проект реализуется по заказу ООО «АрнестЮниРусь» на площади около 1 200 га. Проект зарегистрирован в Российском реестре углеродных единиц 9 января 2025 г. по методологии СРМ № 0016. На первые десять лет реализации прогнозируется сокращение выбросов на 170 419 т CO_2-экв.; общий срок проекта: 2024–2054 гг. Этот пример показывает возможность привлечения корпоративного финансирования к климатическим проектам по вторичному обводнению осушенных торфяников[22].

18 Hiilipörssi. Модель финансирования и объекты. NatureScot. Peatland ACTION and Peatland Code FAQs. LIFE AMooRe. О программе.

19 Diageo. Peatland Restoration Programme; обязательство объявлено 12.11.2025. RSPB Scotland. Major whisky makers join forces…, 18.11.2025.

20 IUCN. Dryhope, 10.07.2025. Grotmoor. Projektgebiet.

21 IUCN. Dryhope, 10.07.2025. Grotmoor. Projektgebiet.

22 ЦТУР. Оршинский мох: карточка проекта. Регистрация 09.01.2025; прогноз 2024–2054 гг; Национальная сеть Глобального договора ООН в России. Профиль ЦТУР; сведения о заказчике проекта.

Девелопер: Pocosin Restoration Group. Проект: Pocosin Ecological Reserve I (США)	Проект по методологии ACR для торфяников pocosin; статус Listed, выпуска пока нет[23].
Девелопер: The Nature Conservancy. Проект: Clayton Blocks (США)	Тоже Listed, без выпуска; для сравнения[24].
Девелопер: PT Rimba Makmur Utama. Проект: Katingan (Индонезия)	Выпущено около 49,5 млн VCU. Вместе с Rimba Raya (33,6 млн) и Sumatra Merang (2,6 млн) это весь подтверждённый выпуск среди тропических торфяных проектов Verra, но речь в основном об охране торфяных лесов [25].

5. Стандарты и методологии

Больше всего методологий создано для торфяников умеренного пояса. Для тропических выбор ограничен: VM0027 у Verra выведена из применения, новая M0252 — в разработке. Бореальные и горные торфяники охватывает только колумбийский стандарт BioCarbon BCR0013, так как в стандарте VCS Verra бореальное расширение методологии VM0036 приостановлено[26].

Статус CCP-Eligible в таблице означает одобрение программы Советом по добросовестности добровольного углеродного рынка (ICVCM). Для маркировки единиц по Core Carbon Principles (CCP) нужно ещё одобрение методологии, и для торфяных методологий его пока нет[27].

23 ACR0430. Clayton Blocks; ACR1061. Pocosin Ecological Reserve I; карточки ICE GreenTrace, 18.10.2026; Pantheon. PER I; площадь; Inlandsis. Pre-purchase; 21.01.2026, объём закупки.

24 ACR0430. Clayton Blocks; ACR1061. Pocosin Ecological Reserve I; карточки ICE GreenTrace, 18.10.2026; ACR0410. Twitchell and Sherman; ACR0581. Staten Island CA; поля Issued/Retired и Status, 18.10.2026.

25 Verra: Katingan; просмотр 18.10.2026. Sumatra Merang; просмотр 18.10.2026. Rimba Raya; просмотр 18.10.2026.

26 Verra. VM0036 Methodology for Rewetting Drained Temperate Peatlands, v1.0. 17.07.2017; статус Active на октябрь 2026 г; BioCarbon BCR0013; просмотр 18.10.2026. BioCarbon BCR0003; просмотр 18.10.2026. Verra CN0100; просмотр 18.10.2026; Verra. VM0027 Methodology for Rewetting Drained Tropical Peatlands, v1.0. Inactive с 11.09.2023; проверено 18.10.2026; Verra. Methodology for Tropical Peatland Conservation and Restoration, v1.0. M0252, Under Development, этап Concept Note; проверено 18.10.2026.

27 ICVCM. Assessment Status. Статусы проверены 18.10.2026.

Таблица 2. Программы, стандарты и методологии для торфяных проектов

Программа / стандарт и методология	Тип программы	Применение, выпуск единиц и статус
VCS Verra / VM0036 v1.0	Международная добровольная программа	**Да. Действующая методология для умеренного пояса; у пяти проектов выпуска пока нет; бореальное расширение приостановлено. VCS – CCP-Eligible[28].**
ACR / Restoration of Pocosin Wetlands v1.0	Международная программа; методология для юго-востока США	**Да. Методология для торфяников pocosin юго-востока США; Clayton Blocks и PER I – Listed, без выпуска. ACR – CCP-Eligible[29].**
Global Carbon Council (GCC) / GCCMA003 v1.0	Международная программа углеродного кредитования	**Да. Принята 05.11.2025: умеренный пояс, осушение более 10 лет назад. GCC – CCP-Eligible.**
SOCIALCARBON / SCM0010 и M1 v1.0	Международный добровольный стандарт	**Да. Рамочная методология с 14.10.2024; модуль M1 – обводнение сельскохозяйственных торфяников умеренного пояса[30].**
BioCarbon Standard / BCR0013 v1.0; BCR0003 v4.0	Международный добровольный стандарт	**Да. BCR0013 (27.01.2026) – все климатические зоны; BCR0003 – высокогорные ВБУ. BioCarbon – CCP-Eligible[31].**
Российский реестр углеродных единиц / Национальная методология СРМ № 0016	Национальная система углеродного кредитования; Россия	**Выпуск единиц: да, после верификации.** Методология «Вторичное обводнение осушенных торфяников умеренного пояса» применяется в национальной системе; по ней зарегистрирован проект «Оршинский мох»[32].

28 Verra. VM0036 Methodology for Rewetting Drained Temperate Peatlands, v1.0. 17.07.2017; статус Active на октябрь 2026 г; Verra: карточки VM0036, IDs 5395, 6263, 4136, 5067, 5437; просмотр 18.10.2026; BioCarbon BCR0013; просмотр 18.10.2026. BioCarbon BCR0003; просмотр 18.10.2026. Verra CN0100; просмотр 18.10.2026; ICVCM. Assessment Status. Статусы проверены 18.10.2026.

29 ACR. Restoration of Pocosin Wetlands. v1.0, 17.10.2017; Current Approved Version; проверено 18.10.2026; ACR0430. Clayton Blocks; ACR1061. Pocosin Ecological Reserve I; карточки ICE GreenTrace, 18.10.2026; ICVCM. Assessment Status. Статусы проверены 18.10.2026.

30 Social Carbon. SCM0010: Methodology for Peatland Restoration. v1.0, 14.10.2024; проверено 18.10.2026; SOCIALCARBON. Our Role и реестровая система. BioCarbon Cert. BioCarbon Standard.

31 BioCarbon BCR0013; просмотр 18.10.2026. BioCarbon BCR0003; просмотр 18.10.2026. Verra CN0100; просмотр 18.10.2026; ICVCM. Assessment Status. Статусы проверены 18.10.2026.

32 ЦТУР. Оршинский мох: карточка проекта. Регистрация 09.01.2025; прогноз 2024-2054 гг.

Программа / стандарт и методология	Тип программы	Применение, выпуск единиц и статус
ГОСТ Р 72560–2026	Национальный стандарт для проектов международного сотрудничества; Россия	**Предусматривает расчёт единиц для выпуска в российской системе.** Действует с 01.09.2026. Методология обводнения торфяников умеренного пояса для проектов компенсации выбросов международных полётов[33].
Peatland Code v2.1	Национальный добровольный стандарт; Великобритания	**Да. PIU — будущие сокращения, PCU — после верификации; UK Land Carbon Registry. Заявка в ICVCM подана в июне 2026 г.[34]**
Stichting Nationale Koolstofmarkt (SNK) / Valuta voor Veen (VVV)	Национальная добровольная система; Нидерланды	**Да, через SNK: сертификаты по валидированному плану (Gevalideerd) и по подтверждённому результату (Geverifieerd)[35].**
Label bas-carbone / Restauration hydraulique des tourbières dégradées	Национальная система сертификации; Франция	**Сертификация сокращений; торфяная методология утверждена 16.06.2026, выпусков пока нет[36].**
MoorFutures и MoorFuturesflex	Субнациональная добровольная система; четыре земли Германии	**Да. Классические сертификаты — будущие сокращения, MoorFuturesflex — после верификации; учёт в региональных реестрах[37].**
myclimate / max.moor	Частная добровольная программа и расчётный подход; Швейцария	**Единицы VER программы myclimate; max.moor рассчитывает предотвращаемые потери торфа[38].**
EU CRCF / Regulation (EU) 2024/3012; C(2026)4666	Наднациональная рамка добровольной сертификации; Европейский союз	**Сама единицы не выпускает. Акт с методологией обводнения принят 09.07.2026. По состоянию на октябрь 2026 г. акт не вступил в силу; Проекты по вторичному обводнению отнесены к carbon farming[39].**

33 Росстандарт. ГОСТ Р 72560-2026; область применения и дата введения. ICAO. CORSIA Eligible Emissions Units; одобрение программ и условия допуска единиц.

34 IUCN UK Peatland Programme. Key documentation and support. Действующая версия 2.1 и уточнения июня 2026 г.; состояние на октябрь 2026 г; IUCN UK Peatland Programme. Buying and selling credits. Заявка Peatland Code в ICVCM подана в июне 2026 г.; сведения на октябрь 2026 г.

35 Stichting Nationale Koolstofmarkt. Register. Проекты и статусы сертификатов; срез 19.10.2026.

36 Label bas-carbone. Restauration hydraulique des tourbières dégradées; обновлено 09.10.2026.

37 MoorFutures. Сеть проектов и региональные операторы; октябрь 2026. MoorFutures. Konzept; классическая схема и flex. Polder Bauernhand: MoorFuturesflex. MoorFutures FAQ: заявления покупателей.

38 myclimate. Renaturation of Swiss Upland Moors; myclimate. Programm Hochmoor-Renaturierung Schweiz, v3.0, 29.01.2020; разд. 6.3: внешний аудит и выпускаемые ER; действующая ссылка из карточки проекта.

39 European Commission. C(2026)4666, ст. 2; European Parliament. 2026/2819(DEA); статус 18.10.2026; Commission. Certification schemes. Признание схем.

6. Преимущества

Главное преимущество — **сохранение углерода**, накопленного в залежи за тысячелетия: обводнение останавливает его потерю сразу, ещё до того, как начнёт накапливаться новый торф. Когда участок зарастёт болотной растительностью, к сокращению выбросов добавится и поглощение CO_2. Технология снижает риск торфяных пожаров, улучшает биоразнообразие[40].

7. Вызовы и ограничения

Обводнение торфяников относят к природным проектам CDR, и риск обратного высвобождения углерода (реверсии) у них выше, чем у технологических CDR: в DACCS и BECCS углерод закачивают в геологические пласты, где он может храниться 1000 лет и более. Углерод сохраняется в торфе, пока поддерживается высокий уровень болотных вод. Повторное осушение, засуха, пожары и смена землепользования повышают риск реверсии углерода обратно в атмосферу. Поэтому такое хранение нельзя считать постоянным: его срок зависит от сохранения водного режима и качества управления земельным участком.

Поглощение CO_2 начинается не сразу: первые годы на обводнённом участке происходит снижение выбросов ПГ, а на устойчивое поглощение проект выходит через несколько лет, при условии появления болотной растительности[41].

40 Günther A. et al. Prompt rewetting… // Nature Communications, 2020, 11:1644.

41 Roulet et al. Rewetting Boreal Peatlands: Restoring Carbon Function? // Global Change Biology, 2025 (комментарий к работе Tong et al.).

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Мониторинг, отчётность и верификация (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) должны показать, как обводнение изменило баланс парниковых газов по сравнению с базовым сценарием. Эмиссию парниковых газов измеряют либо напрямую с помощью метода «закрытых камер», либо рассчитывают по уровню болотных вод (УБВ) и растительности.

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Насыщенный водой торф почти не горит, поэтому обводнение снижает угрозу торфяных пожаров и задымления — это важно для здоровья людей и безопасности населённых пунктов[42].

Подъём воды улучшает биоразнообразие, возвращает болотную растительность, включая сфагнум, а также беспозвоночных и птиц[43].

Эти результаты вносят вклад в Цели устойчивого развития ООН: ЦУР 13, ЦУР 6 (задача 6.6) и ЦУР 15 (задача 15.1)[44].

42 UNEP. Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands. 17.11.2022; глобальная оценка, доступная на октябрь 2026 г; Convention on Wetlands. Practical peatland restoration. Briefing Note 11, 2021; с. 4–9.

43 UNEP. Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands. 17.11.2022; глобальная оценка, доступная на октябрь 2026 г; Convention on Wetlands. Practical peatland restoration. Briefing Note 11, 2021; с. 4–9.

44 United Nations. Sustainable Development Goals: Goals 6 and 15; задача 6.6. United Nations. Goal 15; задача 15.1. UNEP. Economics of Peatlands Conservation, Restoration and Sustainable Management; климатические, природоохранные и социальные результаты восстановления.

Палюдикультура — хозяйственное использование влажных торфяников (тростник и рогоз для стройматериалов, сфагнум вместо добываемого торфа) — может дать местным жителям доход и работу.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Российская практика опирается на два самостоятельных методических документа. Национальная методология СРМ № 0016 «Вторичное обводнение осушенных торфяников умеренного пояса» применяется для проектов в Российском реестре углеродных единиц. Она задаёт основу оценки климатического результата восстановления осушенного торфяника; её практическое применение подтверждается регистрацией проекта «Оршинский мох» в январе 2025 г.[45]

Отдельным документом является ГОСТ Р 72560–2026 «Методология климатического проекта по обводнению осушенных торфяников умеренного климатического пояса», действующий с 1 сентября 2026 г. Он входит в систему стандартов для проектов, реализуемых в целях компенсации выбросов от международных полётов, и формирует методическую основу для работы в контексте CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). Стандарт устанавливает требования к выбору участков, расчётам, мониторингу и сохранению результата[46].

Проект «Оршинский мох» в Тверской области разработан и реализуется ЦТУР по заказу ООО «АрнестЮниРусь» на площади около 1 200 га. Он зарегистрирован 9 января 2025 г. по национальной методологии СРМ № 0016, до введения ГОСТ. На первые десять лет прогнозируется сокращение выбросов на 170 419 т CO_2-экв.; общий срок проекта — 2024–2054 гг. Этот опыт показывает, как корпоративный спрос может поддержать восстановление осушенных торфяников и развитие национальной практики мониторинга[47].

45 ЦТУР. Оршинский мох: карточка проекта. Регистрация 09.01.2025; прогноз 2024–2054 гг; Национальная сеть Глобального договора ООН. Профиль ЦТУР; сведения о национальной методологии СРМ 0016 для Российского реестра.

46 Росстандарт. ГОСТ Р 72560–2026; область применения; приказ от 27.02.2026 № 178-ст. ГОСТ Р 72560–2026. Текст стандарта; введение, разд. 1, 4, 7–12. ICAO. CORSIA Eligible Emissions Units; критерии одобрения программ и допуска единиц.

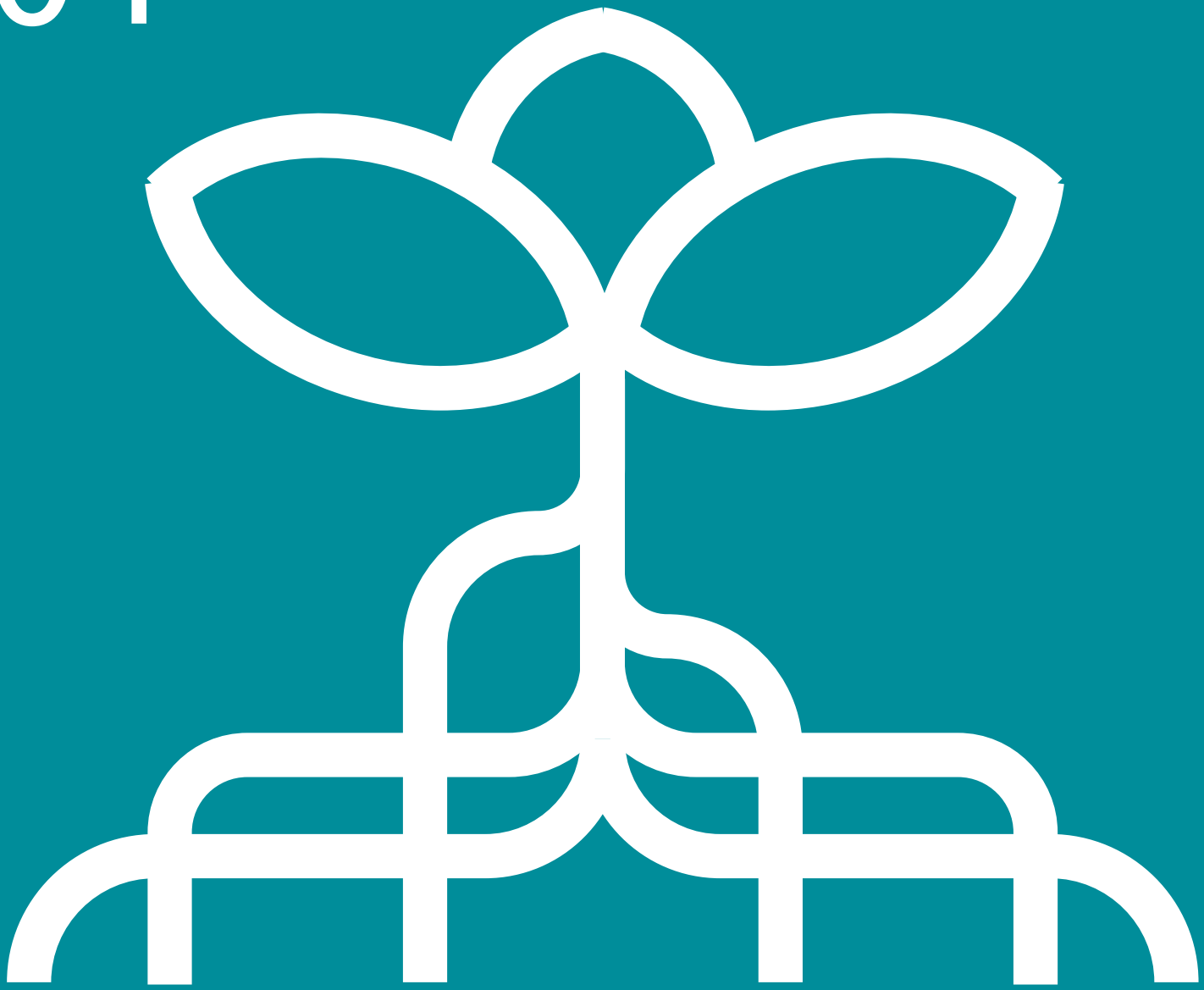
47 ЦТУР. Оршинский мох: карточка проекта. Регистрация 09.01.2025; прогноз 2024–2054 гг;

11. Выводы

Вторичное обводнение — сначала проект сокращения выбросов, а по мере возвращения сфагнума и других торфообразующих растений ещё и проект поглощения CO_2. Рынок развивается по двум моделям: международные программы привлекают крупных покупателей и фонды, национальные схемы делают доступными небольшие участки. Дальше всё упирается в переход к верифицированным результатам, устойчивое управление водой и финансирование на весь срок проекта. Для стран обводнение важно и потому, что изменения выбросов обводнённых торфяников отражаются в национальных кадастрах парниковых газов.[48] Российская национальная методология, новый ГОСТ и практический опыт «Оршинского мха» создают основу для такого развития.

48 Greifswald Mire Centre. Reporting greenhouse gas emissions from organic soils in the European Union: challenges and opportunities. Policy brief, 2018, с. 8; IPCC. 2013 Wetlands Supplement.

04



Голубой углерод – восстановление и сохранение приморских экосистем

BLUE CARBON



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Предмет проектов и принцип работы. «Голубой углерод» (blue carbon) — углерод, связываемый и удерживаемый прибрежными и морскими экосистемами. В настоящей главе рассматриваются мангровые леса, приливные солёные марши и заросли морских трав. Существенная часть их углеродных запасов находится в почвах и донных отложениях. Растения связывают углерод при фотосинтезе; отмирающие корни и растительные остатки пополняют почвенный пул, а недостаток кислорода замедляет разложение органического вещества[1]. Морские травы используют растворённый в воде неорганический углерод. Удаление CO_2 из атмосферы зависит также от газообмена и карбонатных процессов; прирост донных запасов сам по себе его не доказывает[2].

Проекты включают восстановление деградированных экосистем (restoration) и сохранение экосистем под угрозой деградации (conservation). К CDR относится дополнительное удаление атмосферного CO_2 с последующим хранением. Предотвращение выбросов ранее накопленного углерода представляет отдельный климатический результат. Один проект может сочетать оба эффекта, но их необходимо раздельно учитывать; сам по себе существующий запас углерода не является новым удалением[3].

Таблица 1. Типология проектов голубого углерода

Подгруппа	Экосистема и основной пул углерода	Зрелость проектной практики и примеры
Мангровые леса	Приливные леса тропиков и субтропиков; почвенный пул и биомасса деревьев.	Коммерческие углеродные проекты; Delta Blue Carbon, Mikoko Pamoja.
Приливные солёные марши	Травянистые приливные угодья; значительный почвенный пул.	Полевое восстановление; углеродный учёт предусмотрен VM0033, практика выпуска ограничена.

1 NOAA. Coastal Blue Carbon. Обновлено 23.09.2026, разделы Carbon Pathways и The Importance of Anaerobic Soils.

2 M. B. Natividad и др. Organic–inorganic carbon coupling shapes carbon dioxide fluxes in seagrass ecosystems. Communications Earth & Environment 7, 591, июль 2026; раздел Challenges in understanding coupled carbon dynamics.

3 Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9.

Подгруппа	Экосистема и основной пул углерода	Зрелость проектной практики и примеры
Заросли морских трав	Подводные луга цветковых растений; углерод в донных осадках и биомассе.	Полевое восстановление, включая Виргинию (США); углеродный учёт требует отдельного подтверждения.

Источник: составлено на основе NOAA, Verra и исследований восстановления морских трав; примеры мангровых проектов рассмотрены в разделе 4 [4]

Типы проектных интервенций. Гидрологическое восстановление возвращает приливный водообмен через восстановление проток и устранение препятствий, включая обвалования заброшенных аквакультурных прудов. Если сохранились источники семян и подходящий субстрат, возможно естественное возобновление растительности. Содействие ему включает устранение причин деградации и защиту молодых растений. Целевые посадки аборигенных видов необходимы там, где естественное восстановление недостаточно; их успех зависит от рельефа, засолённости и режима затопления. Посадка без устранения исходных причин деградации повышает риск неудачи[5].

Сохранение включает охрану местообитаний и работу с причинами вырубки и изменения землепользования. Интегрированные модели могут сочетать мангры и прибрежное хозяйство, например аквакультуру. При этом хозяйственная деятельность должна быть совместима с восстановлением экосистемы и учитываться в балансе выбросов проекта.

Продолжительность хранения (durability)

› В ненарушенных переувлажнённых отложениях органический углерод может сохраняться сотни и тысячи лет. Это обусловлено медленным разложением при недостатке кислорода, но не гарантирует такой срок для каждой новой тонны: осушение, эрозия и разрушение растительности способны вызвать потери. Возраст донного углерода, продолжительность кредитования и срок мониторинга проекта — разные показатели. Оценка долговечности требует проверки устойчивости участка к изменению уровня моря и возможности смещения экосистемы в сторону суши[6].

Технологическая готовность и масштабируемость

› Восстановление мангров имеет коммерческую проектную практику; марши и морские травы также восстанавливают в полевых условиях. Однако зрелость экологического восстановления и готовность выпускать надёжные углеродные единицы различаются. Обзор Rischer и др. (май 2026 г.) приводит для широкой группы Blue Carbon агрегированный

4 NOAA. Coastal Blue Carbon. Обновлено 23.09.2026, разделы Carbon Pathways и The Importance of Anaerobic Soils. Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9. VIMS, D. Malmquist. Seagrass restoration speeds recovery of ecosystem services. 07.10.2020; результаты исследования восстановления в Виргинии.

5 Global Mangrove Alliance, Blue Carbon Initiative. Best Practice Guidelines for Mangrove Restoration. 2023, рекомендации по выбору участков и участию сообществ.

6 NOAA. Coastal Blue Carbon. Обновлено 23.09.2026, разделы Carbon Pathways и The Importance of Anaerobic Soils. Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9.

TRL 5–6 с вариацией 2–6. Такая оценка включает разные экосистемы и компоненты, в том числе подходы с макроводорослями; её нельзя присвоить каждому из трёх рассматриваемых вариантов. Единой сопоставимой оценки по девятиуровневой шкале для них не установлено[7]. Главные ограничения — пригодность прибрежных участков, конкуренция за землю, качество гидрологии и достоверная оценка почвенного углерода. Последнее доступное глобальное исследование (Farahmand и др., 2025) учитывало на март 2025 г. 81 проект — действующие, ожидающие регистрации и отменённые — площадью около 2 млн га. Ожидаемый эффект оценён в 20,4 млн т CO_2-экв. в год; около 99% приходилось на мангры. Это прогноз сокращений и удалений рассмотренного портфеля, а не достигнутое CDR. Более позднего сопоставимого подсчёта в открытых источниках нет[8].

2. Экономика CDR-проектов

Капитальные затраты (CAPEX) включают обследование участка, оформление прав и соглашений с сообществами, восстановление гидрологии, питомники, посадки и валидацию. Эксплуатационные затраты (OPEX) включают уход, охрану, мониторинг, верификацию, управление и согласованные выплаты сообществам. Их уровень зависит от доступности участка, стоимости труда, приживаемости растений и необходимой точности измерений. На небольших участках постоянные расходы на подготовку и MRV распределяются на меньшее число единиц.

Цена одной углеродной единицы удаления. Для Delta Blue Carbon ценовой ориентир Argus на 6 августа 2026 г. составляет 29–39 долларовСША за единицу (1 т CO_2-экв.): от 29 долларов для винтажа 2018 г. до 39 долларов для 2023 г. Это оценка агентства по одному проекту, а не средняя цена рынка или октябрьская котировка[9]. Verra подтверждает, что проект выпускает единицы за удаление CO_2 при восстановлении мангров[10].

7 C. Rischer и др. An ecosystem of carbon dioxide removal reviews – part 2: CO_2 removal via blue carbon ecosystems. Energy & Environmental Science, 26.05.2026, DOI 10.1039/D5EE04922A, раздел 3.5, табл. 7; обзор литературы до ноября 2025 г.

8 S. Farahmand, N. Hilmi, C. M. Duarte. The rise and flows of blue carbon credits advance global climate and biodiversity goals. npj Ocean Sustainability 4, 39, 10.07.2025; данные на март 2025 г., разделы Results и Methods.

9 Argus Media. Argus Carbon. Вып. 26–32, 07.08.2026, с. 10; ценовые оценки на 06.08.2026, винтажи 2018–2023 гг.

10 Verra. Restoring Pakistan's Mangroves to Protect Climate, Communities, and Coastlines. Обновлено 23.09.2026, раздел The Largest Blue Carbon Project in the World; характер выпускаемых единиц.

Модель Blue Carbon Cost Tool (2025) охватывает 456 сценариев в девяти странах. Средняя расчётная стоимость восстановления мангров составила около 270 долларов США на т CO_2-экв. зачётного результата. При начальной цене единицы 30 долларов США лишь 12% всех сценариев полностью покрывали затраты, преимущественно за счёт сохранения экосистем. Горизонт расчёта — 20 лет, цены — 2024 г., дисконтирование — 4%, рост цены единицы — 1,5% в год, базовый резерв — 20%. Модель не включает покупку земли и упущенные доходы, а потоки метана и закиси азота не рассчитывает отдельно. Поэтому показатель не является фактической себестоимостью чистого CDR и не задаёт универсального порога окупаемости[11].

Цену продажи следует отделять от себестоимости удаления. В выборке Ecosystem Marketplace средняя цена всей категории Blue Carbon выросла с 8,33 долларов США/т CO_2-экв. в 2023 г. до 29,72 долларов США/т в 2024 г. Категория включает восстановление и сохранение; эту среднюю нельзя считать ценой исключительно удалений, а состав небольшой выборки влияет на результат[12].

Бизнес-модели включают предоплату будущих единиц, долгосрочные договоры закупки и государственно-частные партнёрства. Предоплата обеспечивает работы до первого выпуска, но создаёт обязательства по поставке. Для финансового решения нужны бюджет участка, график выпусков и условия распределения доходов; гранты и иные доходы учитываются отдельно от углеродной выручки.

3. Рыночная ситуация

Покупатели — корпорации, приобретающие природные единицы для своих климатических программ; раскрытые примеры включают технологический сектор. В цепочке продаж также участвуют специализированные фонды, посредники и торговые площадки. Среди покупателей Delta Blue Carbon названы Microsoft, Carbon Growth Partners, Respira и Trafigura; их роли различаются, поэтому такой перечень не показывает структуру конечного спроса[13].

В исследованной глобальной выборке за 2014 г. — март 2025 г. выпущено около 6,96 млн единиц голубого углерода и погашено около 3,65 млн. Выпуски были зафиксированы у 19 проектов; статистика выпусков и погашений не охватывает национальные системы Японии и Австралии. Выпуск означает появление единиц в реестре, погашение — их вывод из обращения; ни один показатель сам по себе не равен объёму продаж[14].

11 S. Simpson и др. The Blue Carbon Cost Tool — understanding market potential and investment requirements for high-quality coastal wetland projects. 04.11.2025, разделы 2–4, рис. 7; модель в долларах США 2024 г.

12 Forest Trends' Ecosystem Marketplace. State of the Voluntary Carbon Market 2025. Май 2025, с. 14, табл. 4; с. 34, методика. Данные сделок 2023–2024 гг.

13 Pollination. Landmark authorisation a critical step towards higher integrity carbon markets. Дата публикации на странице не указана; раскрытие проверено в октябре 2026 г.

14 S. Farahmand, N. Hilmi, C. M. Duarte. The rise and flows of blue carbon credits advance global climate and biodiversity goals. npj Ocean Sustainability 4, 39, 10.07.2025; данные на март 2025 г., разделы Results и Methods.

По раскрытым участниками Ecosystem Marketplace сделкам объём категории Blue Carbon составил около 0,4 млн т CO_2-экв. на 3,2 млн долларов США в 2023 г. и 0,2 млн т на 5,2 млн долларов США в 2024 г. Это международная выборка добровольно раскрытых транзакций, а не полная оценка рынка; объёмы в отчёте округлены. Сопоставимой полной статистики продаж, числа сделок и покупателей за 2025–2026 гг. в открытых источниках нет. Долю в рынке CDR нельзя достоверно вывести из этих данных: категория смешивает удаления и предотвращённые выбросы[15].

CDR.fyi ведёт статистику долговременного CDR, а сделки по облесению и лесовосстановлению учитывает отдельно. Отдельных показателей цен и сделок для рассматриваемых экосистем Blue Carbon в открытых источниках на октябрь 2026 г. нет. Ценовой обзор CDR.fyi/OPIS за май 2026 г. отражает ожидания участников рынка долговременного CDR; его категорию marine CDR нельзя приравнивать к восстановлению мангров, маршей и морских трав[16].

Показательный подтверждённый пример — аукцион CIX и Respira в ноябре 2022 г.: продано 250 тыс. единиц Delta Blue Carbon винтажа 2021 г. по 27,80 долларов США/т CO_2-экв. CIX выступала площадкой, Respira — финансовым посредником. Это продажа единиц конкретного проекта, а не договор на ещё не достигнутые удаления. Раскрытая сделка подтверждает наличие спроса, но не устойчивость ценовой премии для всего сегмента[17].

4. Обзор ключевых проектов

Девелопер: Indus Delta Capital совместно с правительством провинции Синд
Проект: Delta Blue Carbon-1 (Пакистан)

Проект зарегистрирован в программах VCS и CCB; заявленная территория составляет 350 тыс. га, прогнозируемое поглощение — около 142 млн т CO_2 за 60 лет. Площадь проектной территории не равна уже восстановленной площади, а прогноз не является верифицированным результатом[18]. Выпуски и продажи единиц подтверждает аукцион 2022 г. (раздел 3). Комитет по экономической координации правительства Пакистана разрешил международную продажу

15 Forest Trends' Ecosystem Marketplace. State of the Voluntary Carbon Market 2025. Май 2025, с. 14, табл. 4; с. 34, методика. Данные сделок 2023–2024 гг.

16 CDR.fyi. The Data. FAQ, ред. от 16.03.2026; область учёта и отдельная база nbs.CDR.fyi, проверено в октябре 2026 г. CDR.fyi, OPIS. Pricing, Attributes, and Blockers: Durable CDR Market Dynamics Through 2030. 07.05.2026, открытая часть ценового опроса. Проверены также CDR Methods и nbs.CDR.fyi.

17 Respira International, CIX. Climate Impact X and Respira's landmark auction for blue carbon credits oversubscribed with global demand. 04.11.2022; результаты аукциона единиц винтажа 2021 г.

18 Verra. Delta Blue Carbon-1 — Indus Delta Mangrove Restoration Project — Phase 1. Карточка проекта, дата обновления не указана; проверено в октябре 2026 г. Приведены проектные показатели.

	единиц проекта до 2043 г. с соответствующими корректировками национального учёта по статье 6 Парижского соглашения; само разрешение ещё не подтверждает их фактическое применение ко всем единицам[19].
Девелопер: местное объединение Mikoko Pamoja при координации Association for Coastal Ecosystem Services (ACES) Проект: Mikoko Pamoja (Кения)	Общинный проект в заливе Гази сочетает восстановление и предотвращение вырубки мангров. Страница Plan Vivo подтверждает сертификацию по стандарту PV Climate (версия 4) и наличие выпущенных единиц. Средства направляются, в частности, на водоснабжение и образование. Пример показывает значение местного управления, но смешанный состав результата не позволяет считать все единицы CDR[20].
Девелопер: партнёрство Conservation International, INVEMAR, Fundación Omacha, регионального природоохранного органа CVS и местных сообществ Проект: Vida Manglar / Cispatá (Колумбия)	Охрана и восстановление охватывают около 7 500 га; заявлено расширение до 11 тыс. га на 30-летнем горизонте. Проект включает учёт почвенного углерода, однако его природоохранный эффект нельзя целиком относить к дополнительному удалению. Пример важен для оценки совместного финансирования охраны экосистем и местных средств к существованию[21].
Девелопер: Vlinder Проект: Papariko (Кения, VCS 3660)	По данным девелопера[22], цель проекта — восстановление 1 500 га в округах Квале и Килифи в 2022–2028 гг.; заявлены 270 га восстановленной площади. Первый выпуск ожидается в 2027 г.[23]

Устойчивость проектов зависит от участия правообладателей в выборе участков, свободного, предварительного и осознанного согласия (FPIC), где оно применимо, прозрачного распределения выгод и механизма жалоб. Соглашение должно уточнять, распределяется ли валовая выручка или доход после расходов[24].

19 Pollination. Landmark authorisation a critical step towards higher integrity carbon markets. Дата публикации на странице не указана; раскрытие проверено в октябре 2026 г.

20 Plan Vivo. Mikoko Pamoja – Kenya. Карточка проекта, версия стандарта 4; дата обновления не указана, проверено в октябре 2026 г.

21 Conservation International. Vida Manglar Carbon Project. Разделы The project, Local impact и Our partners; дата обновления не указана, проверено в октябре 2026 г.

22 Автор связан с компанией Vlinder, девелопером проекта Papariko.

23 Vlinder. Papariko. Раскрытие девелопера, дата обновления не указана; проверено в октябре 2026 г. Прогноз первого выпуска – 2027 г.

24 Global Mangrove Alliance, Blue Carbon Initiative. Best Practice Guidelines for Mangrove Restoration. 2023, рекомендации по выбору участков и участию сообществ.

5. Стандарты и методологии

Методология задаёт правила расчёта, стандарт — требования к проекту и проверке, реестр — учёт проектов и единиц. Регистрация, верификация результата и выпуск единиц являются разными стадиями. Для голубого углерода особенно значимы базовый сценарий, почвенный пул, утечки и риск обратного высвобождения.

Таблица 2. Ключевые методологии и одобрение ICVCM CCP на октябрь 2026 г.[25]

Программа, методология и версия	Область применения и статус	Одобрение ICVCM CCP
Verra (VCS): VM0033, Tidal Wetland and Seagrass Restoration, v2.1, 04.09.2023	Восстановление приливных водно-болотных угодий и морских трав. Действует; v3.0 — проект.	На оценке (Internal Assessment). Одобрение v2.1 пока не опубликовано.
Gold Standard: Sustainable Management of Mangroves, v1.0, 22.08.2024	Удаления при восстановлении мангров. Для выпусков за 2026 г. нужна версия, согласованная с Парижским соглашением.	На оценке (Internal Assessment). Одобрение v1.0 пока не опубликовано.
Isometric: Mangrove Restoration, v1.0	Восстановление деградированных или утраченных мангров; непосредственные измерения почвенного углерода.	Да, CCP-Approved. Решение от 30.04.2026.
GCC: GCCMA002, Project Activities on Degraded Mangrove Habitats, v1.0, 01.10.2024	Восстановление деградированных мангров. Основана на AR-AM0014 v03.0.	Одобрение GCCMA002 не опубликовано. Статус программы GCC — отдельное решение.
Российский реестр: СРМ 0024, v2.0, 04.07.2024	Поглощение и долгосрочное захоронение углерода в прибрежно-морских угодьях. Принята; подробнее в разделе 10.	Одобрение CCP не установлено по опубликованному перечню ICVCM.

25 ICVCM. Assessment Status. Таблица Carbon Credit Category Assessment Status, состояние на октябрь 2026 г.

Основные углеродные принципы (Core Carbon Principles, CCP) применяются на двух уровнях: программа должна быть CCP-Eligible, а конкретная методология и её версия — CCP-Approved. Для GCC решение относится к GCC 2.0 при соблюдении Standard on ICVCM Eligibility of Projects and Issuances v1.1 или более поздней версии; оно не означает одобрения GCCMA002[26].

Plan Vivo представляет отдельную программу общинных проектов, применяемую в Mikoko Pamoja. Решением ICVCM от 23.07.2026 программа PV Climate признана CCP-Eligible при условии применения Project Requirements версии 5.7 или более поздней и проверки аккредитованными органами по валидации и верификации; методологии PM001 и PM002 Plan Vivo только подаёт на оценку. Mikoko Pamoja на карточке Plan Vivo указан как сертифицированный по версии 4. Маркировка единицы требует соблюдения условий ICVCM и программы[27].

6. Преимущества

Основные преимущества — накопление углерода в биомассе и долговременно сохраняющихся донных отложениях, а также возможность совмещать CDR с восстановлением прибрежных местообитаний. Гидрологически подходящий участок с естественным возобновлением может потребовать меньше посадочных работ. Однако высокая плотность существующих запасов сама по себе не определяет скорость дополнительного удаления. Практическая ценность подхода особенно велика там, где восстановление одновременно решает задачи защиты побережья и поддержания рыболовства[28].

7. Вызовы и ограничения

Технические и природные барьеры связаны с приживаемостью растений, качеством воды, штормами, эрозией и подъёмом уровня моря. Для морских трав критичны освещённость

26 ICVCM. Decision on the eligibility of Global Carbon Council. GB_P-GCC_2026-10, решение от 30.04.2026, с. 1 и 4; условия для GCC 2.0.

27 ICVCM. Decision on the eligibility of an applicant carbon-crediting program: Plan Vivo (PV Climate). GB/P-PLANVIVO (PVCLIMATE)/2026-13, решение от 23.07.2026, с. 1, 4. Plan Vivo. Plan Vivo approved as a CCP-eligible carbon crediting programme. 04.08.2026.

28 NOAA. Coastal Blue Carbon. Обновлено 23.09.2026, разделы Carbon Pathways и The Importance of Anaerobic Soils. Global Mangrove Alliance, Blue Carbon Initiative. Best Practice Guidelines for Mangrove Restoration. 2023, рекомендации по выбору участков и участию сообществ.

и мутность воды; восстановление невозможно устойчиво масштабировать без устранения причин утраты растительности. Для приливных экосистем важны поступление наносов и пространство для смещения в сторону суши. Дамбы и застройка могут блокировать такое смещение[29].

Логистическая труднодоступность, глубокий ил и переменные приливы осложняют работы и мониторинг. Финансовые барьеры включают первоначальные затраты, задержку поступлений до выпуска единиц и неопределённость будущей цены. Увеличение площади снижает часть удельных расходов, но может усложнить управление правами и взаимодействие с населением.

Социальные и правовые риски связаны с правами на землю и акваторию, ограничением традиционного природопользования и распределением доходов. Перенос вырубки или аквакультуры за границы участка создаёт утечки. Долгосрочный договор закупки снижает ценовую неопределённость, но не устраняет риск недостижения проектного результата.

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Удаление оценивают относительно обоснованного сценария без проекта, с доказательством дополнительности. Измеряют или рассчитывают изменение запасов по пулам — надземная и подземная биомасса, почвенный органический углерод. Из результата вычитают связанные с проектом выбросы и утечки; предотвращённые выбросы учитывают отдельно. Привнесённый течениями углерод требует специального учёта его происхождения и альтернативной судьбы: его осаждение не всегда означает новое атмосферное удаление[30].

Полевые измерения включают почвенные керны и постоянные площадки; биомассу рассчитывают с использованием аллометрических зависимостей. Спутниковые данные, радарная съёмка, LiDAR и БПЛА помогают определять площадь, структуру полога и рельеф. Дистанционное зондирование не заменяет измерения содержания углерода в грунте. Необходимо учитывать пространственную неоднородность, потоки метана и закиси азота и погрешности моделей. Независимый валидатор проверяет проектные допущения, верификатор — заявленный результат по правилам программы[31].

29 VIMS, D. Malmquist. Seagrass restoration speeds recovery of ecosystem services. 07.10.2020; результаты исследования восстановления в Виргинии. Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9.

30 Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9.

31 Isometric. A new certified protocol for Mangrove Restoration. 13.01.2026; протокол Mangrove Restoration, v1.0. Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9.

Резервирование части единиц на случай потерь уменьшает объём, доступный для продажи, но не физическое удаление. Размер резерва зависит от правил программы и оценки рисков; его нельзя смешивать с консервативными поправками на неопределённость измерений. Серийные номера и погашение препятствуют повторному использованию единиц. Для международного использования по статье 6 дополнительно проверяют условия государственной авторизации и соответствующих корректировок[32].

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Мангры и другие прибрежные экосистемы могут ослаблять волновое воздействие, удерживать наносы, поддерживать местообитания рыб и беспозвоночных и улучшать качество воды. Масштаб эффекта зависит от ширины и состояния растительности, рельефа и гидродинамики: восстановленная полоса не гарантирует защиту при любом шторме. Исследования восстановления морских трав в Виргинии показали улучшение прозрачности воды и восстановление местообитаний наряду с накоплением углерода[33].

Социальные выгоды возникают через оплачиваемые работы в питомниках, посадки, мониторинг и согласованное финансирование местных услуг, как в Mikoko Pamoja. Проверка результатов должна охватывать фактические выплаты, доступ к ресурсам и распределение выгод между группами населения.

Потенциальные негативные последствия — вытеснение традиционных пользователей, несправедливое распределение доходов и повреждение иных ценных местообитаний при посадке мангров вне их исторического ареала. Подбор аборигенных видов и участие сообществ помогают снизить риски; углеродная выручка не должна подменять самостоятельную оценку экологического и социального результата[34].

32 Verra. VM0033 Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. Версия 2.1, 04.09.2023, разделы 2, 4, 8–9. Pollination. Landmark authorisation a critical step towards higher integrity carbon markets. Дата публикации на странице не указана; раскрытие проверено в октябре 2026 г.

33 VIMS, D. Malmquist. Seagrass restoration speeds recovery of ecosystem services. 07.10.2020; результаты исследования восстановления в Виргинии. NOAA. Coastal Blue Carbon. Обновлено 23.09.2026, разделы Carbon Pathways и The Importance of Anaerobic Soils.

34 Global Mangrove Alliance, Blue Carbon Initiative. Best Practice Guidelines for Mangrove Restoration. 2023, рекомендации по выбору участков и участию сообществ.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Наличие возможных нормативных ограничений в российском законодательстве

Для России наиболее релевантны приморские водно-болотные угодья и морские травы. На карбоновом полигоне Сахалинского государственного университета в заливе Анива разрабатывают и апробируют методы мониторинга прибрежных экосистем; по сообщению федерального проекта от июля 2025 г., действует сеть из 15 автоматических станций[35].

В Российском реестре углеродных единиц размещена методология СРМ 0024, версия 2.0 от 4 июля 2024 г., для поглощения, накопления и долгосрочного захоронения углерода в прибрежно-морских водно-болотных угодьях[36].

Практические ограничения связаны прежде всего с правами на участок и природоохранным режимом. Морские и большинство других водных объектов находятся в федеральной собственности; использование акватории оформляется договором водопользования или решением о предоставлении водного объекта в зависимости от вида работ, а во внутренних морских водах и территориальном море все виды хозяйственной и иной деятельности допускаются только при положительном заключении государственной экологической экспертизы обосновывающей документации. Водоохранная зона моря составляет 500 м, прибрежная защитная полоса — 30–50 м, береговая полоса общего пользования — 20 м; запреты в этих зонах направлены прежде всего на предотвращение загрязнения. Заявка на регистрацию проекта должна описывать правовые основания деятельности исполнителя на объектах проекта, а СРМ 0024 предусматривает соглашение с органом, в распоряжении которого находятся земли угодья. На особо охраняемых природных территориях деятельность ограничена режимом конкретной территории[37].

35 Проект «Карбоновые полигоны». На территории карбонового полигона Сахалинского государственного университета продолжается научная работа по исследованию углеродного баланса водно-болотных экосистем. 25.07.2025; сведения о мониторинге на 2025 г.

36 ИГКЭ, СахГУ. Поглощение углекислого газа из атмосферы, накопление, трансформация и долгосрочное захоронение органического углерода на прибрежно-морских водно-болотных угодьях. СРМ 0024, версия 2.0, 04.07.2024, раздел 2.1, с. 8.

37 Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ, ст. 6 ч. 6, ст. 8 ч. 1, ст. 11 ч. 2–3, ст. 65 ч. 3, 8, 11, 15–17. Федеральный закон от 31.07.1998 № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации», ст. 34 ч. 2. Приказ Минэкономразвития России от 05.05.2026 № 362, прил. 1, п. 4 подп. «б». СРМ 0024, версия 2.0, разд. 2.2, 7.1. Федеральный закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях», ст. 9, 15.

11. Выводы

Blue Carbon — природный способ CDR с заметными сопутствующими выгодами, но как источник удалений он пока невелик и неоднороден по зрелости. Восстановление мангров имеет коммерческую проектную практику. Марши восстанавливают в полевых условиях, но практика выпуска единиц для них ограничена; для морских трав углеродный учёт требует отдельного подтверждения. Обзорная оценка для широкой группы Blue Carbon — TRL 5–6 при разбросе 2–6; к каждой из трёх экосистем она напрямую не применима.

В портфель CDR следует включать только подтверждённое дополнительное чистое удаление CO_2. Предотвращённые выбросы и сохранение существующего запаса — отдельный климатический результат. Защита побережья и восстановление местообитаний повышают ценность проекта, но не заменяют углеродный учёт.

Рынок единиц узкий и сосредоточен в манграх. С 2014 г. по март 2025 г. выпущено около 7 млн единиц голубого углерода (19 проектов, без национальных систем Японии и Австралии), а добровольно раскрытые сделки в 2023–2024 гг. составляли 0,2–0,4 млн т CO_2-экв. в год. Около 99% ожидаемого эффекта учтённых проектов приходится на мангры. Полной статистики за 2025–2026 гг. нет.

По модельным оценкам, углеродная выручка во многих сценариях не покрывает затрат. В модели Blue Carbon Cost Tool при начальной цене единицы 30 долларов США выручка полностью покрывает затраты лишь в 12% всех сценариев, преимущественно сохранения; средняя расчётная стоимость восстановления мангров — около 270 долларов США за т CO_2-экв. Это модельные показатели, а не фактическая себестоимость; ориентир Argus для Delta Blue Carbon (29–39 долларов США на 6 августа 2026 г. в зависимости от винтажа) относится к одному проекту. Цены отдельных проектов не задают универсальной себестоимости или окупаемости Blue Carbon, поэтому решение принимают по бюджету конкретного участка и графику выпусков. Работы до первого выпуска финансируют предоплатой, долгосрочными договорами закупки, государственно-частными партнёрствами и грантами; гранты учитывают отдельно от углеродной выручки.

Качество единиц определяют учёт почвенного углерода и потоков метана и закиси азота, контроль утечек и риска потерь, права на участок и распределение выгод. Из рассмотренных методологий одобрение ICVCM CCP на октябрь 2026 г. получила только Isometric Mangrove Restoration; VM0033 и методология Gold Standard для мангров находятся на оценке. Покупателю следует проверять статус CCP конкретной версии методологии и условия программы.

Для России применимы приморские водно-болотные угодья и морские травы — сегменты с наименее развитой практикой выпуска единиц; мангры — экосистемы тропиков и субтропиков, в России их нет. Методология CPM 0024 и научный задел (карбоновый полигон Сахалинского государственного университета) есть, но на 19 октября 2026 г. среди 141 проекта российского реестра нет ни одного проекта голубого углерода. Главные барьеры — права на акваторию и прибрежные участки, обязательная государственная экологическая экспертиза для деятельности во внутренних морских водах и территориальном море, а также отсутствие методологий международного сотрудничества для прибрежно-морских экосистем. Поэтому спрос на такие единицы пока внутренний: добровольный зачёт и квоты

сахалинского эксперимента (он продлится до конца 2028 г.). С 1 марта 2027 г. для проектов с риском высвобождения вводятся мониторинг сохранения результата до 40 лет и резервирование части единиц; это нужно закладывать в бюджет.

Масштабирование ограничивают доступность подходящих участков, конкуренция за прибрежные территории, затраты на мониторинг, эрозия и подъём уровня моря. Практические приоритеты — пилотные проекты на участках с оформленными правами и действующим мониторингом, долгосрочные измерения почвенного углерода и потоков метана, восстановление гидрологии и финансирование работ до первых выпусков. Для российских проектов также нужно уточнить у оператора реестра статус CPM 0024 по правилам, действующим с 1 сентября 2026 г.

05



Накопление углерода в почвах

SOIL CARBON



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Описание технологии

Soil carbon (почвенный углерод) – направление удаления углекислого газа (Carbon Dioxide Removal, CDR – удаление CO_2 из атмосферы), предполагающее его хранение в почве за счёт увеличения запасов почвенного органического углерода (soil organic carbon, SOC – почвенный органический углерод, ПОУ). Это достигается изменением агрономических практик, включая минимальную и нулевую обработку почвы (reduced tillage / no-till), посев покровных культур (cover crops), сохранение пожнивных остатков, устойчивое управление пастбищами, разнообразные севообороты и оптимизацию внесения удобрений. Soil carbon относится к традиционным (conventional) наземным методам CDR, которые уже применяются в значительных масштабах (https://unfccc.int/sites/default/files/GST/2023-06/SoCDR-1st-edition.pdf).

Механизм можно разделить на три взаимосвязанных процесса:

① **поступление углерода в почву** – за счёт растительной биомассы, корней, пожнивных остатков и корневых выделений в ризосфере;

② **стабилизация углерода** – физическая, в том числе за счёт его защиты внутри почвенных агрегатов, и химическая – за счёт связывания органического вещества с минеральной частью почвы;

③ **потери углерода** – прежде всего в результате минерализации органического вещества и эрозии.

Агрономические практики могут одновременно увеличивать поступление органического вещества в почву и способствовать его стабилизации, снижая тем самым потери углерода.

Для CDR важен также временной аспект накопления: почва способна увеличивать запасы органического углерода только до определённого уровня, после чего темпы накопления снижаются. Кроме того, накопленный углерод может быть вновь высвобождён при изменении землепользования или агрономических практик. Поэтому soil carbon относится к nature-based solutions (природным решениям для смягчения изменения климата), где климатический эффект зависит не только от объёма накопленного углерода, но и от продолжительности его хранения. Долговечность (durability) хранения углерода

в почве оценивается в масштабе десятилетий, что существенно меньше, чем при геологическом хранении CO_2[1].

Масштабируемость

Одно из основных преимуществ soil carbon (почвенного углерода) — возможность масштабирования на уже используемых сельскохозяйственных землях без создания специализированной инфраструктуры. Потенциальный масштаб определяется площадью сельхозугодий и возможностью внедрения соответствующих агрономических практик на больших территориях.

При этом объём потенциального удаления CO_2 существенно зависит от типа почвы, климатических условий, состава возделываемых сельскохозяйственных культур, исходного содержания SOC и выбранных практик управления. В результате потенциал soil carbon может существенно различаться даже между регионами с сопоставимой площадью сельскохозяйственных земель.

Для России направление представляет интерес благодаря значительной площади сельскохозяйственных земель и разнообразию почвенно-климатических условий. При этом фактическое масштабирование будет зависеть не только от доступной площади, но и от готовности сельхозпроизводителей менять технологии, наличия необходимой техники и агрономической экспертизы, а также от экономических стимулов. По оценке В. А. Романенкова и соавторов (2024), суммарный потенциал секвестрации углерода пахотными почвами России в слое 0–30 см на период 2020–2040 гг. составляет около 8,5 млн т C в год при сохранении текущих практик и до 25,5 млн т C в год (около 93 млн т CO_2) при сценариях устойчивого управления почвами[2]. Вместе с тем почвозащитные технологии пока применяются ограниченно: по данным Росстата, в 2025 г. нулевая обработка почвы (no-till) использовалась примерно на 1,4 млн га, а все почвозащитные технологии (no-till, strip-till, mini-till и их сочетания) — примерно на 4,3 млн га, что в большинстве регионов составляет менее 5 % пашни[3].

Техническая готовность

Сами агрономические практики, используемые в soil carbon, являются зрелыми и широко применяются в сельском хозяйстве. Soil carbon относится к CDR-подходам с высокой технологической готовностью (TRL 8–9) (https://unfccc.int/sites/default/files/GST/2023-06/SoCDR-1st-edition.pdf). В третьем издании доклада The State of Carbon Dioxide Removal (2026) готовность оценена как TRL 7–9: авторы отмечают, что подходы к поддержанию и мониторингу долгосрочного эффекта остаются недостаточно проработанным[4]. Существенно менее зрелым остаётся их использование именно как инструмента CDR: необходимо корректно определить базовый сценарий и дополнительность, измерить изменение

1 The State of Carbon Dioxide Removal / ed. by M. R. Edwards [et al.]. — 3rd ed. — 2026. — DOI: 10.17605/OSF.IO/ZRD65. — URL: https://www.stateofcdr.org/report/3rd-edition (дата обращения: 30.10.2026).

2 Карты потенциала секвестрации почвенного углерода в пахотных почвах России / В. А. Романенков, Ю. Л. Мешалкина, А. Ю. Горбачева [и др.] // Почвоведение. — 2024. — № 5. — С. 677–692. — DOI: https://doi.org/10.31857/S0032180X24050037.

3 Переход к устойчивому сельскому хозяйству в России: есть ли перспектива? : аналитический доклад / А. В. Птичников, Н. К. Куричев, М. С. Александрова [и др.]. — Москва : НИУ ВШЭ, 2026. — URL: https://geography.hse.ru/mirror/pubs/share/1207334248 (дата обращения: 30.10.2026).

4 The State of Carbon Dioxide Removal. — 3rd ed. — 2026.

SOC, учесть сопутствующие выбросы и обеспечить долгосрочное сохранение углерода. Эти аспекты, включая мониторинг, отчётность и верификацию (MRV), остаются ключевыми для надёжного масштабирования soil carbon как CDR.

Таким образом, зрелость сельскохозяйственных практик значительно выше зрелости системы их углеродного учёта и кредитования. Именно MRV и методологии остаются одним из основных направлений развития soil carbon.

2. Экономика CDR-проектов

Структура затрат

› Soil carbon относится к сравнительно низкозатратным и менее капиталоёмким CDR-подходам по сравнению с инженерными технологиями, такими как DAC или BECCS. Основные расходы связаны не со строительством отдельных технологических объектов, а с изменением агропрактик, агрономическим сопровождением, мониторингом и подготовкой проектной документации.

В структуре затрат могут присутствовать:

— адаптация и закупка сельскохозяйственной техники;
— затраты на внедрение выбранных агропрактик и необходимые материалы (например, семена, удобрения и другие производственные ресурсы в зависимости от практики);
— агрономическое сопровождение;
— отбор и анализ почвенных проб;
— моделирование и обработка данных;
— регистрация, валидация и верификация проекта.

Источники дохода

› По международным оценкам, себестоимость soil carbon характеризуется очень широким диапазоном — примерно от –45 до 100 долларов./т CO_2 в зависимости от практики и условий проекта (https://unfccc.int/sites/default/files/GST/2023-06/SoCDR-1st-edition.pdf). Отрицательная стоимость означает ситуацию, когда экономия от изменения агропрактик может превышать затраты на их внедрение.

Основным источником дохода остаётся продажа углеродных единиц. Часть затрат может компенсироваться за счёт снижения расхода топлива и других производственных расходов, важную роль играет повышение устойчивости хозяйства к засухам и деградации почв. Государственная поддержка способна также оказать существенное влияние. Однако дополнительные доходы не должны самостоятельно закрывать все затраты, иначе проекты имеют риск не пройти проверку валидации и верификации из-за невыполнения одного из важнейших критериев принципа Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM) – дополнительности проектной деятельности[5].

3. Рыночная ситуация

Soil carbon является одним из наиболее развитых сегментов CDR, основанных на сельскохозяйственных практиках. На добровольном углеродном рынке уже реализуются масштабные проекты и действуют специализированные методологии, однако требования к качеству углеродных единиц постепенно ужесточаются. Например, по состоянию на начало 2026 г. более 200 проектов находились в различных стадиях разработки с использованием методологии Verra VM0042 (https://verra.org/verra-approves-three-million-credits-from-mexico-grasslands-project/). По данным доклада The State of Carbon Dioxide Removal, в 2025 г. на добровольном рынке было выпущено около 1,04 млн и погашено около 1,13 млн углеродных единиц удаления за счёт почвенного углерода (в 2024 г. – около 1,33 млн погашений)[6].

На рынке в целом возрастает значение качества базовой линии, дополнительности, надёжности MRV и управления риском реверсии (reversal – возврат ранее удалённого углерода в атмосферу). Для покупателей это означает повышенное внимание к качеству и надёжности приобретаемых углеродных единиц.

Ключевой международной методологией является Verra VM0042 Improved Agricultural Land Management (улучшенное управление сельскохозяйственными землями). Действующая версия 2.2, вступившая в силу в октябре 2025 г., позволяет учитывать как сокращение выбросов парниковых газов, так и удаления углерода за счёт увеличения запасов органического углерода в почве. Методология охватывает, в частности, сокращение обработки почвы, изменение применения удобрений, управление растительными остатками и водным режимом, использование покровных культур, севооборотов, улучшение управления выпасом скота.

В октябре 2025 г. VM0042 v2.2 была одобрена ICVCM на соответствие CCP. Это укре-

5 Речь идет о 10 ключевых принципах качества углеродных единиц Core Carbon Principles (CCP)

6 The State of Carbon Dioxide Removal. – 3rd ed. – 2026.

пляет её позиции как одной из ключевых международных методологий для разработки проектов в области углеродного земледелия и выпуска углеродных единиц, соответствующих более строгим требованиям к качеству.

При этом методологическая база продолжает развиваться. В феврале 2026 г. Verra открыла публичную консультацию по существенной переработке VM0042, которая должна привести к версии 3.0. В рамках пересмотра уточняются, в частности, требования к планированию отбора и анализу почвенных проб, калибровке и валидации моделей, а также оценке неопределённости. Дополнительные уточнения к действующей версии VM0042 v2.2 были опубликованы Verra в июне 2026 г. и затрагивают, в частности, требования к базовой линии, дополнительности, срокам проведения измерений и обновлению модельной валидации (https://verra.org/program-notice/corrections-and-clarifications-to-ialm-methodology-vm0042/).

Со стороны спроса заметную роль играют крупные корпоративные покупатели. В январе 2026 г. Indigo Carbon заключила с Microsoft 12-летнее соглашение на приобретение 2,85 млн углеродных единиц удаления из почвы, генерируемых в рамках программы Carbon by Indigo. Это была третья транзакция между компаниями после закупок 40 тыс. т в 2024 г. и 60 тыс. т в 2025 г. (Indigo to Sell 2.85 Million Tonnes of Carbon Removal to Microsoft, Supporting Soil Health Through Regenerative Agriculture).

Такая сделка является примером перехода от отдельных закупок к долгосрочным соглашениям о приобретении будущих объёмов удаления углерода (offtake agreements — соглашения о долгосрочной закупке), которые могут повышать предсказуемость спроса и создавать более устойчивую основу для масштабирования проектов.

В России рынок soil carbon пока значительно менее развит, чем в США и других странах с активным добровольным углеродным рынком.

4. Обзор ключевых проектов

Проект: Involtor Future Agriculture East-Europe Project — Румыния

Проект реализуется на площади около 4,2 тыс. га и включает сокращение обработки почвы, использование покровных культур, сохранение пожнивных остатков, оптимизацию внесения удобрений и управление водным режимом. Для оценки климатического эффекта используются биогеохимическое моделирование, отбор почвенных проб и лабораторный анализ. Ожидаемый объём удалений и сокращения выбросов составляет около 480 тыс. т CO_2 экв. за 30 лет. В январе 2025 г. для проекта были верифицированы первые 64 645 углеродных единиц (https://verra.org/approval-of-first-vcus-under-

	verras-improved-agricultural-land-management-methodology-vm0042/).
Проект: Boomitra Grassland Restoration in Northern Mexico – Мексика	Проект объединяет 158 владельцев и сообществ, управляющих около 1,6 млн га пастбищ в северной Мексике. Основная практика – планируемый ротационный выпас скота, предусматривающий чередование участков и периоды восстановления растительности; проект также направлен на восстановление деградированных пастбищ. В феврале 2026 г. Verra одобрила 3,03 млн углеродных единиц, после их полной выдачи этот объём станет крупнейшей на тот момент единичной выдачей кредитов soil carbon (https://verra.org/verra-approves-three-million-credits-from-mexico-grasslands-project/).
Проект: AgreenaCarbon – Европа	Проект объединяет сельскохозяйственные земли в 10 европейских странах и охватывает около 1,6 млн га. В сентябре 2025 г. он прошёл верификацию по VM0042, было верифицировано 2,3 млн VCUs, включая около 1,1 млн т CO_2 удалений за счёт накопления углерода в почве и 1,2 млн т CO_2 сокращения выбросов (https://agreena.com/news/agreenacarbon-project-verra-verification/).
Агроклиматические проекты в России.	Агроклиматические проекты в России. В российском реестре углеродных единиц зарегистрированы первые проекты по увеличению запасов органического углерода в почве пахотных земель за счёт почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (прямой посев с сохранением растительных остатков). Первым (март 2024 г.) был зарегистрирован проект ООО «Гелио-Пакс-Агро» (Волгоградская область, зачётный период 2018–2022 гг.) с планируемым выпуском 56 635 углеродных единиц[7]. По проекту ООО «Орловка» – АИЦ (Самарская область, 2019–2023 гг.) в июне 2025 г. выпущено в обращение 40 924 углеродные единицы[8]; на базе этого хозяйства также действует первый

7 Изменение запасов органического углерода в почве на пахотных землях ООО «Гелио-Пакс-Агро»… : климатический проект № 18-2024-00000018 // Реестр углеродных единиц. – URL: https://carbonreg.ru/ru/projects/20/ (дата обращения: 30.10.2026).

8 Изменение запасов органического углерода в почве и снижение парниковых выбросов при использовании технологий почвозащитного ресурсосберегающего земледелия на пахотных землях ООО «Орловка» – АИЦ… : климатический проект № 36-2024-00000037 // Реестр углеродных единиц. – URL: https://carbonreg.ru/ru/projects/39/ (дата обращения: 30.10.2026).

в России аграрный карбоновый полигон[9]. В мае 2026 г. ПАО «ФосАгро» зарегистрировало проект «Рекарбонизация сельскохозяйственных почв. Программа RECSOIL» с зачётным периодом 2026–2040 гг. и планируемым выпуском 7 179 углеродных единиц[10]. По объёму единиц российские проекты пока примерно на два порядка уступают крупнейшим зарубежным.

Таким образом, soil carbon-проекты обычно предполагают совокупность взаимосвязанных агрономических практик, адаптированных к конкретным почвенно-климатическим и производственным условиям, а не внедрение одной отдельной меры. Для их масштабирования большое значение имеет агрегация сельскохозяйственных хозяйств в рамках единого климатического проекта, позволяющая объединять эффект от множества небольших участков в единый проект значительного масштаба.

5. Стандарты и методологии

Для реализации soil carbon-проектов применяются международные стандарты и методологии, определяющие требования к расчёту углеродного эффекта, дополнительности, базовой линии и мониторингу. Одной из основных является Verra VM0042 Improved Agricultural Land Management v2.2, которая учитывает как удаления CO_2 за счёт увеличения запасов органического углерода в почве, так и сокращение связанных выбросов парниковых газов. Методология предусматривает использование как прямых измерений SOC, так и моделирования (https://verra.org/methodologies/vm0042-improved-agricultural-land-management-v2-2/).

Другой подход представлен Gold Standard Soil Organic Carbon Framework Methodology, предназначенной для количественной оценки изменений запасов SOC и выбросов парниковых газов при внедрении улучшенных сельскохозяйственных практик. В 2025 г. Gold Standard также выпустил отдельные требования к применению моделей SOC, включая калибровку, валидацию и оценку неопределённости (https://globalgoals.goldstandard.org/402-luf-agr-fm-soil-organic-carbon-framework-methodolgy/).

В качестве технической референсной рамки может использоваться FAO GSOC MRV Protocol — протокол измерения, мониторинга, отчётности и верификации SOC в сельско-

9 Орлова Л. О выгоде декарбонизации для сельского хозяйства.

10 Рекарбонизация сельскохозяйственных почв. Программа RECSOIL : климатический проект № 00-2026-00000113 // Реестр углеродных единиц. — URL: https://carbonreg.ru/ru/projects/115/ (дата обращения: 30.10.2026).

хозяйственных ландшафтах. Он предусматривает последовательное сочетание определения базового сценария, планирования отбора проб, измерений SOC, моделирования, оценки неопределённости, отчётности и независимой верификации (https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/eighth_PA/GSOC_MRV.pdf).

В России методическая база для агроклиматических проектов находится в стадии формирования. Утверждён предварительный национальный стандарт (ПНСТ) 979–2024 «Методология оценки климатических проектов по совершенствованию управления землями сельскохозяйственного назначения», тогда как ПНСТ 901–2023 для проектов по оценке запасов органического углерода в почве на пахотных землях переведён в разряд недействующих; в разработке находится, в частности, методология увеличения накопления углерода в сельскохозяйственных почвах по результатам агролесомелиорации и агрофитомелиорации[11]. В феврале 2026 г. утверждён ГОСТ Р 72557–2026 – методология климатических проектов в области устойчивого сельского хозяйства (включая повышение содержания органического углерода в почвах пахотных земель и создание защитных лесных насаждений), ориентированная на проекты международного сотрудничества, прежде всего для Системы компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA)[12].

Для России ключевым вопросом остаётся адаптация таких подходов к местным почвенно-климатическим условиям и данным, включая корректную стратификацию земель и организацию почвенного мониторинга.

6. Преимущества

К основным преимуществам soil carbon относятся:

① **Высокая масштабируемость** – практики могут внедряться на уже используемых сельскохозяйственных землях без создания специализированной инфраструктуры.

② **Относительно низкая капиталоёмкость** по сравнению с инженерными CDR-подходами и возможность интеграции в существующие системы земледелия.

11 Система стандартов реализации климатических проектов // Реестр углеродных единиц. – URL: https://carbonreg.ru/ru/methodology/standard/ (дата обращения: 30.10.2026).

12 ГОСТ Р 72557-2026 : национальный стандарт Российской Федерации : утверждён приказом Росстандарта от 27.02.2026 № 175-ст // Федеральный информационный фонд стандартов. – URL: https://protect.gost.ru/gost/details/e0a0ea79-9c28-490d-b791-6330814edfcd (дата обращения: 30.10.2026).

③ **Зрелость агрономических практик** – многие из применяемых решений уже используются в сельском хозяйстве.

④ **Сопутствующие экологические эффекты** – снижение эрозии и деградации почв, улучшение структуры и водоудерживающей способности почвы, повышение устойчивости агроэкосистем к засухам и другим климатическим рискам.

⑤ **Долгосрочный потенциал для сельскохозяйственного производства** – улучшение состояния почв может способствовать поддержанию их продуктивности в долгосрочной перспективе.

⑥ **Значительный потенциал в странах с крупным аграрным сектором**, включая Россию, благодаря большой площади сельскохозяйственных земель и возможности масштабного внедрения агрономических практик.

7. Вызовы и ограничения

Основные ограничения soil carbon связаны с неопределённостью климатического эффекта и его долгосрочного сохранения:

① **Долговечность и риск реверсии.** Накопленный углерод может вновь поступать в атмосферу при изменении агропрактик, землепользования, пожарах и экстремальных погодных явлениях. Необходимы долгосрочный мониторинг и механизмы управления риском реверсии.

② **MRV и неопределённость.** Неоднородность почв и высокая стоимость отбора проб ограничивают прямые измерения на больших площадях и повышают зависимость от моделей.

③ **Дополнительность.** Необходимо определить, произошло бы увеличение запасов углерода в почве без участия хозяйства в климатическом проекте.

④ **Баланс парниковых газов.** Рост SOC необходимо оценивать вместе с возможными изменениями выбросов N_2O и других парниковых газов.

⑤ **Ограниченный потенциал накопления.** Способность почв накапливать углерод ограничена множеством физико-химических и почвенно-климатических условий; изменение климата может дополнительно снижать этот потенциал (https://unfccc.int/sites/default/files/GST/2023-06/SoCDR-1st-edition.pdf).

⑥ **Утечка (leakage).** Снижение урожайности при переходе на новые практики может приводить к замещению производства на других территориях и связанным с этим выбросам; методологии требуют учитывать такие эффекты, и в июне 2026 г. Verra скорректировала соответствующие уравнения VM0042[13].

Для России дополнительным барьером остаётся **ограниченный спрос на углеродные единицы**. Для сельхозпроизводителей внедрение новых практик также связано с необходимостью долгосрочных изменений в управлении землёй, тогда как их экономический эффект и климатический эффект от накопления SOC могут проявляться постепенно. Это может снижать заинтересованность хозяйств в участии в долгосрочных климатических проектах.

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Для оценки изменений SOC применяются подходы разной степени детализации — от расчётов на основе типовых коэффициентов до региональных данных, полевых измерений и детализированного моделирования (Tier 1–3 по классификации МГЭИК). На уровне Tier 1 МГЭИК по умолчанию рассматривает изменения запасов SOC в слое 0–30 см и принимает

13 Corrections and Clarifications to IALM Methodology VM0042.

20-летний период перехода к новому равновесному состоянию после смены практики[14]. Для климатических проектов используются сочетания почвенных измерений и моделирования, позволяющие оценивать изменение запасов углерода и связанную с ним неопределённость (https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html).

MRV объединяет данные об агропрактиках, свойствах почвы и урожайности, полевые измерения, лабораторный анализ, моделирование и пространственные данные. Для повышения репрезентативности измерений применяется стратификация — разделение территории на относительно однородные участки, что позволяет оптимизировать отбор почвенных проб.

Всё большее значение приобретают цифровые инструменты MRV (dMRV — digital MRV), которые объединяют полевые данные, цифровое картирование, дистанционное и проксимальное зондирование, модели SOC и автоматизированный сбор данных. Verra рассматривает цифровизацию MRV как одно из направлений повышения эффективности и масштабируемости углеродных проектов (https://verra.org/methodologies-main/digital-mrv/).

В России научной базой для развития MRV могут служить карбоновые полигоны — площадки для мониторинга потоков парниковых газов, создаваемые с 2021 г. при участии университетов и научных организаций по инициативе Минобрнауки России[15], включая первый аграрный карбоновый полигон в Самарской области[16]. Авторы доклада НИУ ВШЭ предлагают также развивать цифровую систему MRV, интегрированную с национальным реестром углеродных единиц, с привлечением государственной агрохимической службы[17].

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Помимо удаления CO_2, soil carbon может создавать дополнительные экологические, экономические и социальные эффекты.

14 Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories // 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. — Hayama : IGES, 2006. — Ch. 2. — URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf (дата обращения: 30.10.2026).

15 Карбоновые полигоны // Минобрнауки России. — URL: https://www.minobrnauki.gov.ru/action/poligony/ (дата обращения: 30.10.2026).

16 Орлова Л. О выгоде декарбонизации для сельского хозяйства.

17 Переход к устойчивому сельскому хозяйству в России: есть ли перспектива? — Москва : НИУ ВШЭ, 2026.

Экологические: снижение эрозии и стока питательных веществ, улучшение структуры и водоудерживающей способности почвы, поддержание биоразнообразия почвенной биоты и снижение деградации земель.

Экономические: снижение затрат на обработку почвы и расхода топлива, повышение устойчивости продуктивности к засухам и другим климатическим рискам, снижение потерь от деградации почв, а также получение дополнительного дохода от продажи углеродных единиц.

Социальные: повышение устойчивости доходов сельхозпроизводителей, развитие новых сервисов в сфере агрономического сопровождения и углеродного учёта, формирование соответствующих компетенций в сельских регионах.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Для реализации soil carbon-проектов в России потенциальными ограничениями являются:

① **регуляторная неопределённость** – незавершенность специализированной методической базы для soil carbon, а также вопросы применения международных методологий и установления долгосрочных обязательств по сохранению углерода;

② **недостаточная развитость системы мониторинга SOC** – отсутствие единообразных подходов к регулярным измерениям, включая стратификацию земель, отбор почвенных проб и сочетание измерений с моделированием;

③ **технологические и организационные барьеры** – доступность необходимой техники и семян, агрономической экспертизы и сервисов мониторинга;

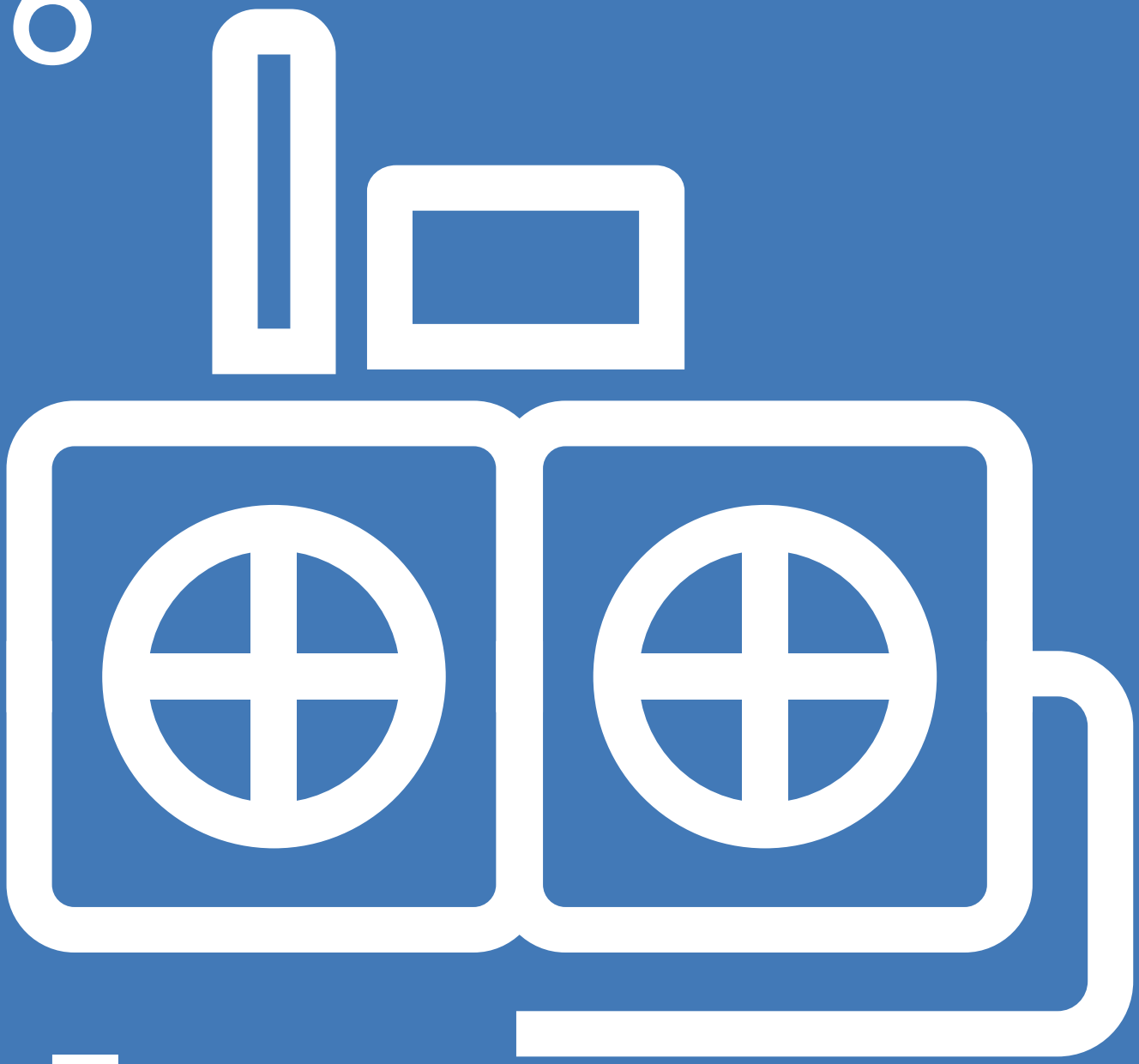
④ **длительный горизонт климатического эффекта,** который может не соответствовать краткосрочным экономическим приоритетам сельхозпроизводителей;

⑤ **ограниченный спрос на углеродные единицы** и сложности с выходом на международный добровольный углеродный рынок;

⑥ **противоречия в стратегических приоритетах** – предусмотренные стратегическими документами увеличение внесения минеральных удобрений и вовлечение залежных земель в оборот (в том числе с накопленным с 1990-х гг. почвенным углеродом) могут вступать в противоречие с задачами сохранения и накопления почвенного углерода[18].

18 Переход к устойчивому сельскому хозяйству в России: есть ли перспектива? – Москва : НИУ ВШЭ, 2026.

06



Прямое улавливание CO_2 из атмосферного воздуха и его долговременное хранение

DACCS



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Прямое улавливание CO_2 из воздуха с хранением (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) относится к технологиям удаления CO_2 из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR). Модуль DAC (Direct Air Capture) обозначает только этап улавливания, а DACCS — всю цепочку, включая транспортировку и закачку CO_2 в пласт. Удаляемый углерод имеет атмосферное происхождение, поэтому климатический результат измеряется не массой уловленного газа, а чистым удалением (net removal): из массы закачанного на хранение CO_2 вычитают выбросы всех парниковых газов, связанные с проектом за его жизненный цикл, в пересчёте на CO_2-эквивалент[1].

Что считается удалением. DACCS даёт удаление CO_2 только при долговременном хранении уловленного газа. Если CO_2 из воздуха идёт на синтетическое топливо или другие короткоживущие продукты, он возвращается в атмосферу за месяцы или годы: это использование углерода (Carbon Capture and Utilisation, CCU), а не CDR. При закачке CO_2 для повышения нефтеотдачи (enhanced oil recovery, EOR) газ остаётся под землёй, но сжигание дополнительно добытой нефти обычно даёт больше CO_2, чем было закачано. Граница важна на практике: с июля 2025 г. американский налоговый кредит 45Q выплачивается в одинаковом размере за хранение в пласте и за использование CO_2, включая EOR. Поэтому покупателю нужно проверять условия договора: так, в договоре 1PointFive с Microsoft прямо указано хранение в солёных водоносных горизонтах без использования для добычи нефти и газа. Протокол Isometric, кроме того, требует изотопной проверки происхождения CO_2, если установка находится ближе 1 км от крупного источника ископаемых выбросов[2].

Вентиляторы прокачивают воздух через контактор — аппарат, где воздух соприкасается с поглотителем. Жидкий раствор связывает CO_2 химически (абсорбция, absorption), твёрдый материал удерживает его на поверхности пор (адсорбция, adsorption). При регенерации (regeneration) поглотитель нагревают, вакуумируют, увлажняют или пропускают через него ток; CO_2 выделяется почти чистым потоком, который сжимают и закачивают в пласт, а поглотитель используется снова (табл. 1).

1 Isometric. Direct Air Capture Protocol v1.0; разд. 1, 4, 7.1, 7.4 (действующая версия протокола на октябрь 2026 г. — 1.3).

2 The State of Carbon Dioxide Removal, 1st ed., 2023, гл. 1 «Introduction» (определение CDR); Institute for Carbon Removal Law and Policy (American University). What is carbon capture & use? (дата не указана); Global CCS Institute. U.S. Preserves and Increases 45Q Credit in "One Big Beautiful Bill Act", июль 2025 г.; 1PointFive. 1PointFive and Microsoft announce agreement for Direct Air Capture CDR credits, 9 июля 2024 г.; Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 4.

Таблица 1. Способы улавливания CO_2 из воздуха и стадии их освоения[3]

Способ	Вариант процесса	Принцип действия	Стадия освоения и примеры
Жидкий поглотитель (абсорбция)	Высокотемпературная регенерация	Раствор щёлочи связывает CO_2 в карбонат; карбонат осаждают и обжигают примерно при 900 °C	TRL 6–7. 1PointFive: STRATOS (США), пусконаладка
	Низкотемпературная регенерация	Растворы аминов или аминокислот; CO_2 выделяют нагревом примерно до 120 °C	Стендовые и опытные испытания; Holocene (США)
	Электрохимическая регенерация	Раствор регенерируют электрическим током, в том числе с помощью биполярных мембран	TRL 4–6*. Phlair: испытания на Deep Sky Alpha (Канада)
Твёрдый поглотитель	Минеральный цикл с высокотемпературной регенерацией	Оксид кальция связывает CO_2 в карбонат; при обжиге CO_2 выделяется	TRL 9**. Heirloom, Трейси (США); CO_2 закрепляют в бетоне
	Низкотемпературная регенерация	Пористый материал с аминами; нагрев до 70–120 °C, часто под вакуумом	TRL 9**. Climeworks: Orca и Mammoth (Исландия)
	Электрохимическая регенерация (electro-swing)	Сорбент связывает и отдаёт CO_2 при изменении электрического потенциала	TRL 4–6*
	Изменение влажности (moisture swing)	Сорбент отдаёт CO_2 при увлажнении; во влажном климате эффективность ниже	Оценка TRL в проверенных источниках не найдена

3 RMI. The Applied Innovation Roadmap for CDR, гл. 7 «Direct air capture», разд. 7.1–7.10, ноябрь 2023 г. (типология); Fuss S. et al. Costs and Potentials // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, гл. 10, с. 242 (TRL по обзору van der Spek и др., 2025); Ignatusha P. et al. Membrane Separation Technology in Direct Air Capture // Membranes, 2024, 14(2), 30; Direct Air Capture of Carbon Dioxide: Advances, Feasibility, and Future Directions // Sustain. Chem. Eng., 2025; Nanomaterials for Direct Air Capture of CO_2: Current State of the Art, Challenges and Future Perspectives, 21 июля 2025 г.; NETL. Advancing a Low-Temperature, Low-Cost Direct Air Capture System Based on Organic Chemistry (доклад, 2024 г.) (стадии мембранных, криогенного и низкотемпературного жидкостного способов — по обзорам и NETL); Frontier. Direct air capture (purchasing perspective) (данные на октябрь 2026 г.; Holocene, Phlair, moisture swing); Heirloom. Projects; Isometric. North America's first Direct Air Capture certificates, 29 июня 2026 г.

Способ	Вариант процесса	Принцип действия	Стадия освоения и примеры
Мембранное разделение	Перепад давления	Избирательное прохождение CO_2 через мембрану	Исследования; процесс ограничен низкой концентрацией CO_2 в воздухе
	Электрохимическое разделение	Перенос CO_2 через ионообменную мембрану под действием тока	Лабораторные исследования
Криогенное разделение	Глубокое охлаждение	Перевод CO_2 из газа в твёрдую фазу	Ранняя стадия разработки

* Оценка для электрохимической регенерации в целом.
** Для наиболее зрелых решений группы. Температуры ориентировочные.

Источники: RMI; State of CDR [4] [5]. TRL (Technology Readiness Level) – уровень технологической готовности; здесь он характеризует сочетание производства и CCS.

Продолжительность хранения (durability)

› По оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) 2005 г., в правильно выбранных и надлежащим образом эксплуатируемых пластах доля удержанного CO_2 весьма вероятно превысит 99% за 100 лет и вероятно – за 1000 лет. Продолжительность хранения не совпадает со сроком мониторинга, который устанавливают законодательство и стандарт (см. раздел 7 блока по DACCS)[6]. CO_2 закачивают в глубокие водоносные горизонты с солёной водой или в истощённые нефтегазовые пласты под слоем малопроницаемых пород. Со временем часть CO_2 удерживается в порах, растворяется в пластовой воде и превращается в минералы; в базальтах минерализация идёт особенно надёжно, но такой способ применяется в меньшем масштабе. Практически пригодная ёмкость геологических хранилищ мира оценивается примерно в 1000 млрд т CO_2 [7].

Технологическая готовность

› В докладе The State of Carbon Dioxide Removal (2026 г.) уровень технологической готовности (Technology Readiness Level, TRL) твёрдых сорбентов и минерального цикла оценён

4 RMI. The Applied Innovation Roadmap for CDR, ноябрь 2023, с. 32, разделы 3.1–3.2. Основа типологии; оценки зрелости дополнены источниками 2026 г.

5 The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, с. 238–239: BECCS, технологическая готовность и оценки потенциала.

6 IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: main findings (презентация IPCC) (оценка 2005 г.); Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 4.

7 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, Box 10.1, с. 249; Imperial College London. CO_2 geological storage (дата не указана).

в 9 (коммерческая эксплуатация), жидких растворов — в 6–7 (опытные и демонстрационные установки), электрохимической регенерации — в 4–6; геологическое хранение опирается на отработанную практику. TRL 9 означает работу в реальных условиях, но не подтверждает ни рентабельности, ни выхода на проектную мощность (раздел 4)[8].

Масштабируемость ›

Технический потенциал DACCS часто считают практически неограниченным, но с учётом доступности низкоуглеродной энергии и хранилищ модельные оценки снижаются до 0,5–5 млрд т CO_2 в год к 2050 г. (Fuss и др., 2018 г.) или 5–40 млрд т в год (МГЭИК, 2022 г.); в сценариях с наиболее амбициозными целями DACCS к 2050 г. обеспечивает от менее 0,1 до 1,8 млрд т в год. Удаление 1 млрд т CO_2 в год увеличило бы мировое энергопотребление на 5–6%, а фактически к середине 2025 г. по всем договорам DAC было поставлено 1186 т CO_2[9].

2. Экономика CDR-проектов

Капитальные затраты (capital expenditures, CAPEX) — это контакторы и оборудование регенерации, сжатие CO_2, трубопроводы и скважины; эксплуатационные (operating expenditures, OPEX) — энергия, замена поглотителя, обслуживание, мониторинг и подтверждение результата. Себестоимость тонны чистого удаления определяется прежде всего ценой и расходом энергии, стоимостью оборудования, сроком службы поглотителя и загрузкой установки[10].

По обзору van der Spek и др. (2025 г.), приведённая стоимость валового улавливания (levelized cost of gross removal) для разных технологий и допущений составляет примерно 400–2500 долларов США за тонну CO_2. Многие исследования не учитывают затраты на сжатие (обычно 10–30 долларов за тонну), транспортировку и хранение (на суше — от нескольких до 25 долларов за тонну); мониторинг, отчётность и верификация увеличивают стоимость CDR для большинства методов на 10–30%. При масштабе в миллиарды тонн затраты на DACCS, по модельным оценкам, могут снизиться до 100–600 долларов

8 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 242. Шкала TRL в докладе не названа; судя по диапазону значений (до TRL 9), она девятиуровневая.

9 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 242, 251, 257 (оценки потенциала — модельные); CDR.fyi. Direct Air Capture (DAC) Market Snapshot | 2025 Report, 16 октября 2025 г., данные за 2022 г. — I полугодие 2025 г.

10 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 242, 254; Frontier. Direct air capture.

за тонну; разброс определяется прежде всего принятыми темпами удешевления[11]. Фактические данные быстрого удешевления не подтверждают: по оценке Grantham Research Institute (43 млн т законтрактованного долговременного удаления), цены снижаются примерно на 1% при удвоении объёма против 20% у солнечной энергетики[12].

Объединение покупателей Frontier раскрывает накопленные показатели договоров по направлению DAC, включая проекты с хранением CO_2 путём минерализации: по состоянию на октябрь 2026 г. заключены договоры с 11 компаниями на 114 тыс. т CO_2 на сумму 75,0 млн долларов, средняя цена — 646 долларов за тонну, диапазон — 394–1818 долларов[13]. В опросе CDR.fyi и OPIS (декабрь 2025 г.) разрыв между ценой, нужной поставщикам DACCS, и готовностью покупателей платить вырос за год с 314 до 423 долларов за тонну, хотя к 2030 г. ожидания почти сходятся (400 и 361 доллар)[14]. Это цены договоров, предложений и ожиданий, а не себестоимость действующих установок.

По заявлению Climeworks, эксплуатационные затраты Mammoth на тонну сократились более чем вдвое, но абсолютные значения не раскрыты. Долгосрочные договоры на будущие поставки (offtake agreements) облегчают финансирование строительства, а в США экономику проектов существенно определяет налоговый кредит 45Q (раздел 3)[15].

3. Рыночная ситуация

Углеродные единицы, подтверждающие удаление CO_2 из атмосферы (carbon removal credits; здесь и далее — редакционный перевод), по проектам DAC покупают крупные компании для добровольных обязательств по остаточным выбросам; Frontier заключает договоры от имени участников, Milkywire — по поручению компаний[16].

Сведения о размере рынка обобщает аналитическая платформа CDR.fyi по сообщениям участников и данным реестров. По её обзору, с 2022 г. по I полугодие 2025 г. на договоры по технологиям DAC пришлось 2,47 млн т CO_2, или около 8% договоров на долговременное CDR[17]. На 18 октября 2026 г. крупнейшие поставщики DAC по объёму договоров — 1PointFive (1,4 млн т), Climeworks (412 тыс. т) и Heirloom (343 тыс. т), покупатели — Microsoft (834 тыс. т), Airbus (400 тыс. т) и Amazon (250 тыс. т); за апрель-октябрь 2026 г. заключено лишь около 30 тыс. т.[18] По сводке Sylvera, в I полугодии 2026 г. объём

11 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 242, 249, 254, 256 (оценки по литературе 2018–2026 гг., преимущественно для США).

12 Meissner L., Burke J., Taschini L. CDR prices and the challenge of ETS integration. Grantham Research Institute, 08.06.2026.

13 Frontier. Direct air capture: накопленные показатели договоров на октябрь 2026 г.; Frontier. Frontier buyers sign $47M in offtake agreements with CarbonCapture Inc. and Heirloom, ноябрь 2023 г. (цены включают MRV).

14 CDR.fyi, OPIS. Durable CDR Market Dynamics 2026–2030, апрель 2026, с. 9–12.

15 gasworld. Climeworks upgrades DAC tech at Iceland facility after low CO_2 capture record, сентябрь 2026 г.; Net Zero Compare. Climeworks Increases CO_2 Removal at Mammoth as Operating Costs Fall, 16 сентября 2026 г. (сообщения СМИ о заявлении Climeworks от 10 сентября 2026 г.); Frontier. Direct air capture (о налоговом кредите 45Q).

16 CDR.fyi. DAC Market Snapshot 2025, 16 октября 2025 г.

17 CDR.fyi. DAC Market Snapshot 2025, 16 октября 2025 г., период 2022 г. — I полугодие 2025 г.; Carbon Herald. New CDR.fyi Report Finds DAC CDR Is Transitioning From Early Adoption To Build-Out, октябрь 2025 г.

18 CDR.fyi, раздел Order Insights (по подписке, снимок от 18.10.2026; объём за 2026 г. считан с графика).

раскрытых договоров DAC сократился на 93% — до 46 тыс. т на 32 млн долларов[19]. Поставки остаются минимальными: по данным Supercritical, из 2,66 млн т, проданных по проектам DAC, поставлено 2060 т, или 0,08% [20]. Цены многих договоров не раскрываются.

Политика и структура спроса. Спрос на единицы DAC пока почти полностью добровольный и сосредоточен у немногих покупателей: на Microsoft приходится около трети всех тонн по договорам DAC. Поэтому для инвестора особенно важны решения государств. В США закон от 4 июля 2025 г. сохранил налоговый кредит 45Q для DAC с геологическим хранением на уровне 180 долларов за тонну; финансирование федеральных хабов DAC в 2025 г. было под угрозой отмены, в апреле 2026 г., по сообщениям СМИ, около 1,2 млрд долларов для них сохранено, но часть разработчиков перенесла проекты в Канаду. Еврокомиссия в июле 2026 г. предложила засчитывать в системе торговли выбросами ЕС (EU ETS) до 250 млн т постоянного удаления CO_2 (DACCS и BECCS с сертификацией по CRCF) в 2031–2040 гг.; если предложение примут Европарламент и Совет ЕС, у DACCS впервые появится крупный регулируемый спрос[21]. Корпоративный спрос задаёт и SBTi Corporate Net-Zero Standard V2.0 (применяется с 1 февраля 2027 г.): с 2035 г. крупные компании должны поддерживать удаление не менее 1% текущих выбросов с ростом до 100% к году нулевого баланса[22].

Крупнейший из публично объявленных договоров — соглашение 1PointFive (дочерняя компания Occidental) с Microsoft (июль 2024 г.) на 500 тыс. т CO_2 за шесть лет с установки STRATOS. Участники Frontier в феврале 2025 г. заключили с Phlair договор на 30,6 млн долларов за 47 тыс. т с поставкой в 2027–2030 гг. (около 650 долларов за тонну). TD Bank в июне 2026 г. договорился с Deep Sky о поставке более 18 тыс. единиц за десять лет. Все эти договоры относятся к будущим поставкам, и их стоимость не равна полученной выручке[23].

4. Обзор ключевых проектов

Девелопер: Climeworks
Проект: Mammoth (Исландия)

Установка с твёрдым сорбентом работает с мая 2024 г.; заявленная мощность улавливания — до 36 тыс. т CO_2 в год, хранение обеспечивает Carbfix, закачивая растворённый в воде CO_2 в базальты. По данным Climeworks, чистое удаление за I полугодие 2026 г. составило 675 т против 119 т годом ра-

19 Sylvera. Carbon Market Data Snapshot Q2 2026, 13.07.2026, раздел о долгосрочных закупках.

20 Supercritical. Delivered or delayed?, февраль 2026, с. 23 (данные посредника, дата среза не указана).

21 CDR.fyi. DAC Market Snapshot 2025, 16 октября 2025 г. (доля Microsoft: 833 тыс. из 2,47 млн т); Global CCS Institute (45Q), июль 2025 г.; Decarbonfuse. DOE Restores $1.2B for DAC Hubs and 5 Hydrogen Projects, 20 апреля 2026 г. (со ссылкой на Bloomberg; сообщение СМИ); E&E News. Carbon removal hubs languish as DOE audits drag on, 20 марта 2026 г.; Herbert Smith Freehills Kramer. EU ETS review: key proposed changes to the EU's carbon market, август 2026 г. (предложение Еврокомиссии от 17 июля 2026 г.).

22 Slaughter and May. SBTi Corporate Net-Zero Standard Version 2.0 published, июнь 2026 (обзор стандарта).

23 1PointFive (договор с Microsoft), 9 июля 2024 г.; 1PointFive. 1PointFive Announces 50,000 Metric Ton Carbon Removal Agreement with JPMorganChase, 24 июня 2025 г.; Occidental. 1PointFive and Bain & Company Announce Agreement for Direct Air Capture Carbon Removal Credits, 13 января 2026 г.; CDR.fyi. CDR Monthly Recap — February 2025, 4 марта 2025 г.; Deep Sky. Deep Sky Announces Direct Air Capture Carbon Removal Agreement with TD Bank Group, 4 июня 2026 г.

	нее благодаря замене сорбента и доработке оборудования: первоначальные контейнеры-коллекторы работали примерно на половине расчётной производительности. В пересчёте на год это менее 4% заявленной мощности, хотя мощность относится к валовому улавливанию, а не к чистому удалению[24].
Девелопер: 1PointFive Проект: STRATOS (Техас, США)	Проектная мощность улавливания — 500 тыс. т CO_2 в год (две очереди по 250 тыс. т), хранение — в солёных водоносных горизонтах. Запуск планировался на конец 2024 г.; в мае 2026 г. Occidental сообщила, что при пусконаладке выявлена неисправность вспомогательных компонентов, а в августе перенесла ввод комплекса примерно на конец 2026 г. Сведений о закачке CO_2 и выпуске единиц на дату обзора нет[25].
Девелопер: Deep Sky Проект: Deep Sky Alpha (Альберта, Канада)	Полигон для испытания нескольких технологий улавливания работает с августа 2025 г.; ожидаемая мощность — около 3 тыс. т CO_2 в год. После первой закачки (14 т CO_2, май 2026 г.) Isometric в июне 2026 г. выпустила первые в Северной Америке сертификаты DAC для Microsoft и RBC в счёт договора на 10 тыс. т до 2034 г.[26]
Девелопер: Octavia Carbon Проект: Hummingbird (Кения)	Модульные установки используют геотермальное тепло, хранение в базальтах обеспечивает партнёр Cella Mineral Storage. Проект нацелен на 1 тыс. т чистого удаления в год к концу 2026 г.; в мае 2026 г. проведена первая опытная закачка около 460 кг CO_2[27].

24 gasworld (Mammoth), сентябрь 2026 г. (данные Climeworks за I полугодие 2025 и 2026 гг.); 350Solutions. Climeworks Mammoth Facility Output, audit report for Puro.earth, 28 января 2026 г.

25 Decarbonfuse. Stratos DAC Delay: Inside the Holdup at the World's Largest Carbon Capture Plant, май 2026 г.; E&E News. World's largest carbon removal plant to open at the end of 2026, 7 августа 2026 г. (сообщения СМИ по итогам отчётности Occidental за I и II кварталы 2026 г.).

26 Isometric (сертификаты Deep Sky), 29 июня 2026 г.; BNN Bloomberg (The Canadian Press). Canadian company delivers North America's first direct air capture carbon credits, 29 июня 2026 г. (сообщение СМИ).

27 Launch Base Africa. Kenya's carbon capture startups land a share of Tencent's $30M climate fund, 25 июня 2026 г. (сообщение СМИ, сведения разработчиков).

5. Стандарты и методологии

Verra (Verified Carbon Standard)

Методология VM0049 Carbon Capture and Storage, v1.0 (с июня 2024 г.) применяется вместе с модулем VMD0056 CO_2 Capture from Air (Direct Air Capture), v1.0 (с 24 октября 2024 г.) и модулями транспортировки и хранения; удаление и сокращение выбросов разграничивают инструментом VT0013. В сентябре 2026 г. Совет ICVCM (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market) признал VM0049 и VMD0056 соответствующими Основным принципам углеродных единиц (Core Carbon Principles, CCP)[28].

Isometric

Протокол Direct Air Capture (действующая версия — 1.3) требует хранения более 1000 лет, учёта всех выбросов проекта и независимой верификации; версия 1.1 с 1 октября 2025 г. одобрена ICVCM для маркировки CCP, по ней выпущены сертификаты Deep Sky Alpha[29].

Puro Standard (оператор — Puro.earth)

Методология Geologically Stored Carbon, Edition 2024 (действующая версия 5 утверждена 23 апреля 2026 г.), охватывает хранение CO_2, уловленного из воздуха или из биогенных источников, не менее чем на 1000 лет; период кредитования (crediting period) — 15 лет, продлевается дважды. По ней выпускаются сертификаты CORC проектов Climeworks[30].

Европейский союз и Канада

Делегированный регламент (EU) 2026/285 к Регламенту (EU) 2024/3012 о сертификации удаления углерода (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF) устанавливает методологии для DACCS, BioCCS и биоугля и действует с 7 мая 2026 г.; улавливающая установка должна находиться в ЕС, хранилище — иметь разрешение по Директиве 2009/31/ЕС.

28 Verra. VM0049 Carbon Capture and Storage, v1.0; Verra. VMD0056 CO_2 Capture from Air (Direct Air Capture), v1.0 (статус на октябрь 2026 г.); Verra. Verra Releases Second Set of Modules and Tools for Carbon Capture and Storage; Verra. Сообщение об одобрении VM0049 Integrity Council for the Voluntary Carbon Market; Carbon Pulse. Verra CCS methodology secures ICVCM approval, 28 сентября 2026 г.

29 Isometric. DAC Protocol v1.0; Isometric. ICVCM approves five new Isometric protocols to use CCP label, 1 октября 2025 г.; Isometric (сертификаты Deep Sky), 29 июня 2026 г.

30 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, Edition 2024 v. 5, Approved 23 April 2026, rules 2.2.2, 3.2.1; действующая версия на 30.09.2026.

Сертификаты выдают признанные Еврокомиссией схемы; Puro.earth в сентябре 2026 г. опубликовала методологию Puro CRCF DACCS v1.0[31]. В Канаде с января 2025 г. действует федеральный протокол компенсационных единиц для DACCS[32].

Наличие методологии ещё не означает выпуска единиц: на октябрь 2026 г. они выпущены по Mammoth и Deep Sky Alpha, а по STRATOS проданы лишь обязательства на будущие поставки. Сертификация подтверждает соблюдение правил учёта, но не экономическую состоятельность проекта.

6. Преимущества

Преимущества DACCS — **измеримость и долговечность результата**. Масса и концентрация почти чистого потока CO_2 измеряются перед закачкой, поэтому оценка надёжнее, чем у методов, где поглощение моделируется в природной среде; расчётная продолжительность хранения превышает 1000 лет. Технология не требует сырья, такого как биомасса, а модули позволяют наращивать мощность поэтапно. Эти преимущества реализуются только при низкоуглеродном энергоснабжении и пригодном хранилище[33].

7. Вызовы и ограничения

Главное ограничение — **энергоёмкость**. Концентрация CO_2 в воздухе мала, поэтому прокачивают большие объёмы воздуха (при принудительной подаче — до 400 кВт·ч на т CO_2), а регенерация требует тепла или электроэнергии. Выбросы при производстве энергии вычитаются из объёма удаления, а при масштабировании DACCS конкурирует за низкоуглеродную энергию с электрификацией. По оценке Frontier, даже зрелая технология DAC может быть вдвое дороже других направлений CDR[34].

31 Puro.earth. Document Library: Puro CRCF DACCS Methodology v1.0, сентябрь 2026.

32 Herbert Smith Freehills Kramer. A new EU framework for carbon removals and carbon farming, 5 мая 2026 г.; European Commission (EU Transition Pathways). EU sets world's first voluntary standard for permanent carbon removals; CDR.fyi. CDR Monthly Recap — January 2025, 4 февраля 2025 г.; Regulation (EU) 2026/285, Art. 1(6), 2(2).

33 Frontier. Direct air capture; Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 7.4.1; Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 242.

34 Frontier. Direct air capture; Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 242, 252.

Вторая группа ограничений связана с **надёжностью работы** (раздел 4): на производительность влияют срок службы и деградация сорбента, а также условия площадки. Часть вариантов требует значительного количества воды, поэтому стандарты обязывают учитывать водопотребление и водный стресс-тест[35].

Риски хранения и ответственность. Утечки из правильно выбранных хранилищ маловероятны, но не исключены: главные пути — старые скважины и разломы, а рост пластового давления требует контроля целостности перекрывающих пород. Хранилище наблюдают и после закачки; в ЕС ответственность может перейти к государству не ранее чем через 20 лет после закрытия, в США для скважин класса VI по умолчанию установлен 50-летний период наблюдения. Узким местом стали разрешения: к середине 2025 г. Агентство по охране окружающей среды США выдало с 2011 г. лишь 11 разрешений класса VI[36].

Практической проверки требуют многолетняя работа крупных установок с расчётной производительностью, фактическая стоимость тонны чистого удаления и долговечность сорбентов, а для России — работа установок при низких температурах и наличие площадок, где совпадают геология и низкоуглеродная энергия.

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Мониторинг, отчётность и верификация (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) в DACCS опираются на прямые измерения в большей мере, чем в большинстве методов CDR. Измеряют массу закачиваемого потока и концентрацию CO_2 в нём (по протоколу Isometric — непрерывно, с погрешностью не более 2% полной шкалы). Рассчитывают выбросы жизненного цикла от энергии (для сетевой электроэнергии — по почасовым коэффициентам), транспортировки, изготовления оборудования и поглотителей. Моделируют распространение CO_2 и давление в пласте и сверяют модели с наблюдениями[37].

Независимый верификатор проверяет данные и посещает площадку не реже раза в два года; неопределённость учитывают консервативно. Базовый сценарий (baseline)

35 gasworld (Mammoth); Frontier. Direct air capture; Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 5; Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, Box 10.1, с. 249.

36 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, Box 10.1, с. 249; Imperial College London; Pembina Institute. Comments on BC carbon dioxide monitoring requirement (обзор сроков наблюдения в ЕС и США), март 2025 г. (Директива 2009/31/EC, ст. 18; правила EPA для скважин класса VI); Trihydro. Class VI Well Permit Approvals Accelerate as States Gain Primacy, июнь 2025 г.; Holland & Knight. Texas Granted Primacy Over Class VI Wells, 14 ноября 2025 г.

37 Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 7.1, 7.4.1, 7.4.3, прил. 1; требования к хранилищу — в модулях хранения протокола.

предполагает отсутствие установки, удаление в нём равно нулю. Дополнительность (additionality) подтверждают, если проект не обязателен по закону и зависит от углеродного финансирования; оценку пересматривают не реже раза в пять лет. Утечки (leakage) включают, в частности, рост выбросов при производстве расходных материалов. Риск обратного высвобождения CO_2 (reversal) покрывают буферным резервом и мониторингом после закрытия хранилища, а повторный зачёт предотвращают серийными номерами в реестре и погашением единиц[38].

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Сопутствующие выгоды DACCS скромнее, чем у природных методов CDR: технология не восстанавливает экосистемы, но почти не требует земли под сырьё. Для территорий возможны использование местной низкоуглеродной энергии (например, геотермального тепла в Кении) и опыта нефтегазовой отрасли, но их масштаб не подтверждён независимыми данными. Нежелательные эффекты — выбросы аминов и продуктов разложения поглотителей, риск утечек CO_2 и конкуренция за низкоуглеродную энергию; протокол Isometric требует измерять эти выбросы, иметь план реагирования на утечки и оценивать социальные риски[39].

38 Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 4, 6.2–6.5, 7.2, 7.4.3.6; Verra. VMD0056 v1.0; Puro Registry.

39 Isometric. DAC Protocol v1.0, разд. 5; Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, Box 10.1, с. 249, 257.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Российский опыт. ТГУ и Инжиниринговый химико-технологический центр объявили о создании установки прямого улавливания CO_2 из воздуха на томском карбоновом полигоне; сведений о её эксплуатации, объёмах улавливания и хранении CO_2 в открытых источниках не найдено. Других подтверждённых сведений о реализованных, пилотных или исследовательских проектах DACCS в России – не найдено[40].

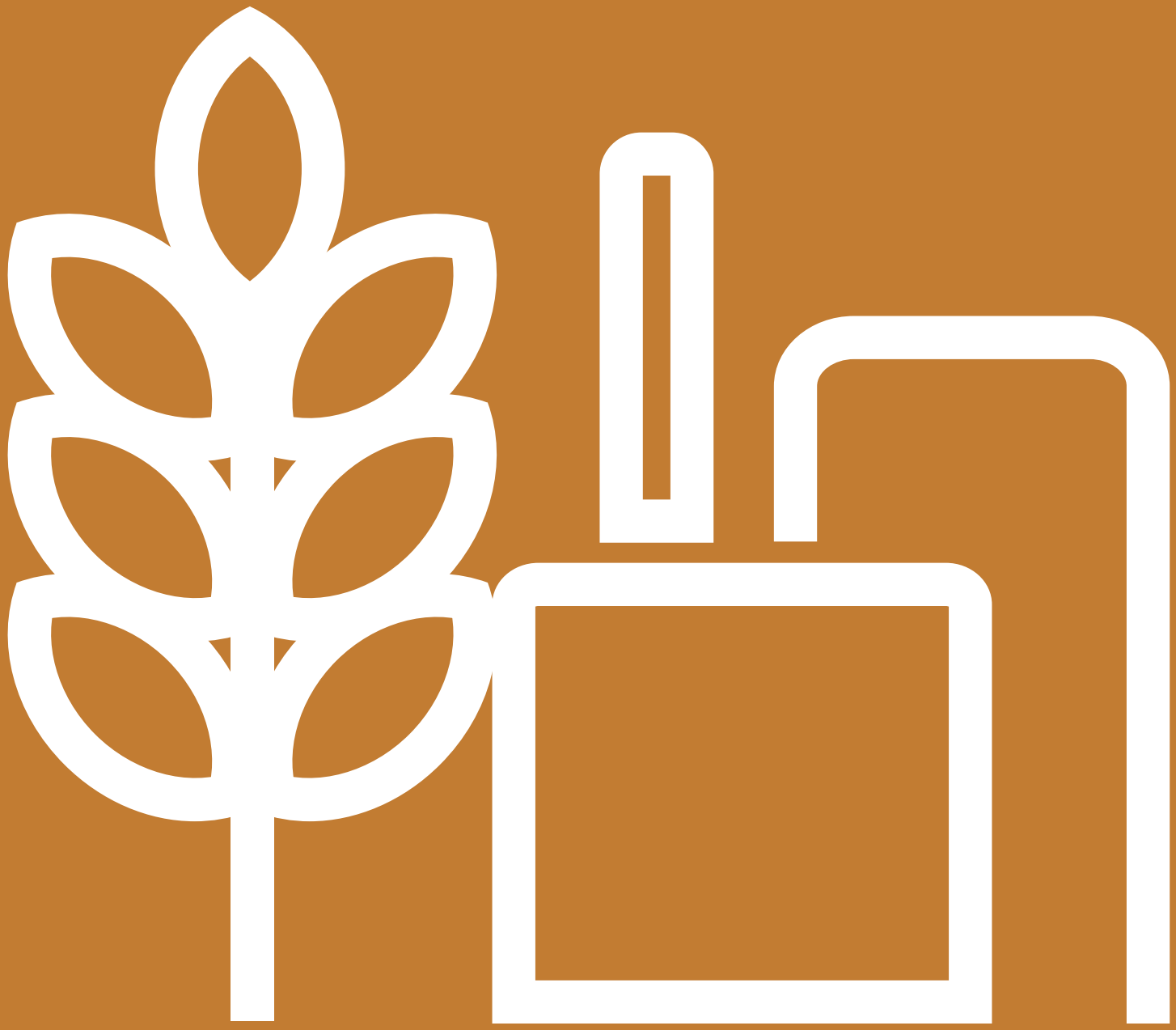
Нормативные требования. Закон РФ «О недрах» в действующей редакции предусматривает строительство и эксплуатацию подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, в том числе для размещения углекислого газа; приказ Минприроды России от 07.08.2023 № 489/08 (действует с 01.09.2024) устанавливает порядок такого строительства для пользователей недр, ведущих разведку и добычу, в границах их участков[41].

11. Выводы

DACCS даёт наиболее надёжно измеряемое долговременное удаление CO_2 и мало зависит от сырья, но остаётся одним из самых дорогих и энергоёмких способов, а фактические данные пока не подтверждают быстрого удешевления. Полный цикл подтверждён на нескольких площадках, однако поставлено менее 0,1% проданного объёма, а выход крупных установок на проектную мощность требует длительной доработки. После сокращения добровольного спроса в 2026 г. масштабирование зависит от государственной поддержки и регулируемого спроса – в EU ETS и по требованиям SBTi с 2035 г. Для России нужны данные о работе установок в местном климате и порядок учёта таких проектов в национальной системе углеродных единиц.

40 Томский государственный университет. The first carbon capture facility in Russia will be created in Tomsk

41 Закон РФ от 21.02.1992 № 2395-1 «О недрах» (ред. от 08.03.2026) (действует с 01.07.2026); Приказ Минприроды России от 07.08.2023 № 489/08)



Биоэнергетика с улавливанием и хранением CO_2

BECCS



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Биоэнергетика с улавливанием и хранением CO_2 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) объединяет два основных технологических модуля: производство энергии или топлива из биомассы и улавливание образующегося CO_2 с его последующим геологическим хранением (Carbon Capture and Storage, CCS). Растения поглощают CO_2 при росте, а полученную биомассу – древесину, пеллеты, сельскохозяйственные остатки – используют как сырьё. При её переработке часть углерода переходит в CO_2, который улавливают, подготавливают к транспортировке и закачивают в подходящие подземные пласты. Чистое, или нетто-удаление CO_2 из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR), возникает, если количество надёжно сохранённого биогенного CO_2 превышает связанные с проектом выбросы и потери углерода в экосистемах, выраженные в CO_2-эквиваленте[1].

Основные способы преобразования биомассы включают термохимические процессы – прямое сжигание, газификацию и пиролиз – и биохимические процессы: ферментацию углеводов в этанол с выделением почти чистого потока CO_2 и анаэробное сбраживание с получением биогаза. Пиролиз относится к BECCS, когда его продукты используют для получения энергии или топлива, а образующийся CO_2 улавливают и направляют на хранение. Сохранение углерода в самом биоугле представляет другой способ CDR[2].

Таблица 1. Типология проектов BECCS

Подгруппа	Преобразование биомассы	Основной продукт	Технологическая готовность
Электростанции	Сжигание; газификация с использованием газа	Электроэнергия	Для сжигания с CCS – TRL 7

1 Edwards et al. (eds.). The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, с. 21–25, 164, 175, 238–239.

2 Sandalow et al. Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) Roadmap. ICEF, январь 2021, гл. 6, с. 27–28: биохимическая и термохимическая переработка.

Подгруппа	Преобразование биомассы	Основной продукт	Технологическая готовность
Котельные и ТЭЦ	Сжигание	Тепло; тепло и электроэнергия	Демонстрационная стадия; крупные объекты строятся
Целлюлозно-бумажные комбинаты	Сжигание щёлока и древесных отходов в котлах	Целлюлоза, бумага; пар и электроэнергия	Пилотные испытания улавливания; первые проекты проектируются[3]
Этанольные заводы	Ферментация углеводов	Биоэтанол	Коммерческая стадия, TRL 9
Синтез топлива	Газификация и синтез	Метанол и другие топлива	Зависит от схемы и интеграции с CCS
Производство водорода	Газификация и выделение водорода	Водород	Развивающееся направление
Биогазовые установки	Анаэробное сбраживание и очистка биогаза	Биометан	Есть действующие цепочки с геологическим хранением

Источники: RMI; State of CDR [4] [5]. TRL (Technology Readiness Level) – уровень технологической готовности; здесь он характеризует сочетание производства и CCS.

Геологические хранилища располагаются в глубоких пористых пластах под непроницаемыми породами – в солёных водоносных горизонтах или подходящих истощённых нефтегазовых залежах; до закачки исследуют их вместимость, приёмистость и герметичность.

3 CO280. CO280 successfully completes carbon capture field pilot at a U.S. pulp and paper mill, 19.11.2025 (газы содорегенерационного котла; сведения компании).

4 RMI. The Applied Innovation Roadmap for CDR, ноябрь 2023, с. 32, разделы 3.1–3.2. Основа типологии; оценки зрелости дополнены источниками 2026 года.

5 The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, с. 238–239: BECCS, технологическая готовность и оценки потенциала.

Продолжительность хранения (durability) ›

Биогенный CO_2 в геологическом хранилище удерживается так же, как в DACCS: по оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в правильно выбранных пластах доля удержанного CO_2 весьма вероятно превысит 99% за 100 лет и вероятно — за 1000 лет[6]; для BECCS МГЭИК указывает срок хранения более 10 000 лет против десятилетий — столетий при хранении в растительности и почвах[7]. Пороги стандартов: не менее 100 лет для CORC Puro Standard (по методологии Geologically Stored Carbon — не менее 1000 лет)[8], как правило не менее 1000 лет у Isometric, «несколько столетий» для постоянного удаления по Регламенту (ЕС) 2024/3012[9]. Углеродный баланс сырья, включая потери углерода в лесах и почвах, учитывается отдельно (разделы 7 и 8).

Технологическая готовность ›

Готовность зависит от подгруппы (табл. 1): улавливание при ферментации применяется в коммерческом масштабе, сжигание с улавливанием находится на уровне TRL 7, газификация с синтезом топлива и водорода — на более ранних стадиях. Обобщённая оценка МГЭИК 2022 г. для BECCS — TRL 5–6; по оценке МЭА, наиболее важные для масштабирования направления остаются демонстрационными или пилотными[10]. Узкие места — транспорт и хранилища (раздел 7).

Масштабируемость ›

МГЭИК обобщает исследования, в которых **мировой технический потенциал BECCS к 2050 г. оценивается в 0,5–11,3 млрд т CO_2 в год**; разброс связан с предположениями о биомассе, землепользовании и инфраструктуре[11]. Систематический обзор Fuss и др. (2018) оценивает устойчивый потенциал осторожнее — 0,5–5 млрд т в год. Масштаб определяют устойчивое снабжение биомассой, доступность транспорта и хранилищ. Фактическое внедрение пока низкое: крупнейшие действующие объекты улавливают сотни тысяч тонн CO_2 в год (раздел 4), а договоры первого полугодия 2026 г. охватывают около 2 млн т будущих поставок (раздел 3)[12].

6 IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage: main findings (презентация IPCC), 2005.

7 IPCC AR6 WGIII. Carbon Dioxide Removal: Factsheet (по материалам гл. 12, табл. 12.6; документ не утверждался процедурами МГЭИК), 2022.

8 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, 2024 v.5, rule 3.2.1.

9 Puro.earth. Raising our ambition: Puro Standard CORCs will require 100 years minimum carbon storage; Isometric. Isometric Standard (критерии допустимости проектов); Европейский парламент (Legislative Observatory). Regulation (EU) 2024/3012: summary of the final act, 06.12.2024.

10 IEA. Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Tracking), страница проверена 18.10.2026; CSLF. Introduction to CDR Technologies, 2022 (воспроизводит IPCC AR6 WGIII, табл. 12.6).

11 IPCC. AR6 WGIII, 2022, гл. 7: глобальный технический потенциал BECCS к 2050 году, 0,5–11,3 млрд т CO_2/год.

12 Fuss S. et al. Negative emissions — Part 2: Costs, potentials and side effects // Environmental Research Letters, 2018, 13, 063002; IEA. Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Tracking).

2. Экономика CDR-проектов

Экономика BECCS складывается из выручки от энергии или топлива, продажи углеродных единиц, подтверждающих удаление CO_2 из атмосферы (carbon removal credits; здесь и далее — редакционный перевод), и государственной поддержки. Капитальные затраты (capital expenditures, CAPEX) включают установку улавливания, подготовку CO_2 и инфраструктуру, а при собственном хранении — геологические исследования и скважины; эксплуатационные (operating expenditures, OPEX) — энергию на улавливание, реагенты, обслуживание, транспортировку, хранение и верификацию. В литературе себестоимость BECCS оценивается в 60–140 долларов США за тонну плюс 10–20 долларов США на хранение; небольшие установки, например биогазовые, как правило, дороже крупных[13].

Раскрытые бюджеты показывают порядок вложений. Stockholm Exergi в марте 2025 г. приняла решение инвестировать **13 млрд шведских крон** в Beccs Stockholm — установку улавливания мощностью 800 тыс. т CO_2 в год на действующей ТЭЦ[14]. По сообщению СМИ, FS вложила **552 млн бразильских реалов** в улавливание и хранение на этанольном заводе в Lucas do Rio Verde с проектной мощностью хранения 423 тыс. т биогенного CO_2 в год[15]. Сравнивать затраты на тонну можно лишь при одинаковых границах расчёта, сроке службы и загрузке.

Цены раскрываются редко, и ориентиры разнородны. В опросе CDR.fyi и OPIS (октябрь-декабрь 2024 г.; 17 поставщиков и 14 покупателей BECCS) поставщики назвали безубыточную цену 2025 г. в среднем **232 доллара США** за тонну, цену с разумной прибылью — **301 доллар США**, а покупатели считали «выгодной» цену 169 долларов США, «дорогой» — 290 долларов США[16]. Средняя стоимость раскрытых договоров BECCS в I полугодии 2026 г. — около 308 долларов США за тонну (раздел 3). Посредники ориентируют покупателей на 210–390 евро (Senken) и от 350 долларов США (Supercritical)[17]. Опрос и данные посредников отражают ожидания и предложения, а не цены сделок.

В Швеции поддержку распределяют на обратных аукционах: побеждает минимальная поддержка на тонну, выплаты идут 15 лет после начала геологического хранения. В первом аукционе Stockholm Exergi получила более 20 млрд крон на хранение около 11 млн т CO_2[18]; 16 октября 2026 г. Renova, Sysav и Öresundskraft получили **9,3 млрд крон** на **5,75 млн т.**[19]

13 CDR.fyi, OPIS. Durable CDR Market Pricing Survey, 2025, с. 4–5 (по Bednar et al., IVL, 2023).

14 Stockholm Exergi. Delårsrapport januari-juni 2025 (вступительное слово: инвестиционное решение 27.03.2025; договор с Microsoft на 5 млн т за десять лет).

15 Brasil Energia. FS quer começar operar planta de BECCS ainda este ano, 25.09.2026, интервью с Q. Mendes (сообщение СМИ).

16 CDR.fyi, OPIS. Durable CDR Market Pricing Survey, январь 2025, с. 4, 14–15: средние значения по BECCS.

17 Senken. BECCS carbon removal; Supercritical. Carbon Removal Methods (проверено 18.10.2026).

18 Swedish Energy Agency. New opportunity to apply for bio-CCS support, 2025: условия аукциона и итоги первого аукциона.

19 Swedish Energy Agency. Swedish Energy Agency grants SEK 9.3 billion to store 5.75 million tonnes of biogenic carbon dioxide, 16.10.2026; распределение по компаниям: Finwire, 16.10.2026 (сообщение СМИ); Sysav, пресс-релиз.

3. Рыночная ситуация

Единицы BECCS покупают в основном технологические и промышленные компании и муниципалитеты для добровольных целей, как правило по долгосрочным договорам закупки (offtake agreements)[20]. По сводке Sylvera, учитывающей только публично раскрытые договоры, в I полугодии 2026 г. договоры BECCS охватили **2,07 млн т** будущих поставок на **637 млн долларов США** – на 85% меньше, чем годом ранее (14,14 млн т). Спад почти целиком связан с сокращением закупок Microsoft с 13,3 до 1,28 млн т. Доля BECCS в этой выборке – около 10% объёма и 28% стоимости всех раскрытых долгосрочных закупок углеродных единиц, включая природные проекты[21]. По данным CDR.fyi – платформы, сводящей публично раскрытые договоры долговременного CDR и потому неполной, – на Microsoft приходится 28,2 млн т договоров BECCS, на следующих покупателей – Стокгольм (750 тыс. т), участников Frontier (721 тыс. т) и JPMorganChase (450 тыс. т); крупнейшие поставщики – Fidelis (6,8 млн т), Stockholm Exergi (6,0 млн т), CO280 (4,4 млн т), Ørsted (4,0 млн т) и C2X (3,6 млн т)[22]. По учтённым договорам, по данным Supercritical, поставлено лишь 0,14% проданного объёма[23].

Дата сообщения	Покупатель и поставщик	Объём и исполнение
Май 2026	Microsoft / BioCirc	До 650 тыс. т за семь лет; поставки со II полугодия 2026 г. по 2032 г.[24]
26.05.2026	Город Стокгольм / Stockholm Exergi	750 тыс. т: по 50 тыс. т ежегодно в течение 15 лет[25]
25.08.2026	Höganäs / Öresundskraft	70 тыс. т за десять лет с будущего объекта Filbornaverket (смешанные отходы, биогенная доля потока около 45%)[26] [27]
08.10.2026	Корпоративный покупатель через ClimeFi / Gevo	Проданы и переданы 10 тыс. единиц[28]

Сделка Gevo через посредника ClimeFi – выполненная поставка, остальные – будущие; улавливание ископаемой части потока Filbornaverket предотвращает выбросы, но не является CDR.

20 Höganäs. Höganäs och Öresundskraft ingår avtal om negativa utsläpp, 25.08.2026; сводка CDR.fyi от 26.08.2026.

21 Sylvera. Carbon Market Data Snapshot Q2 2026, 13.07.2026, раздел о долгосрочных закупках (I полугодие 2026 г.). Расчёты редакции: 2,07 / 21,52 млн т; 637 / 2250 млн долларов США; 637 / 2,07.

22 CDR.fyi, раздел Order Insights (по подписке, снимок 19.10.2026).

23 Supercritical. Delivered or delayed?, февраль 2026, с. 18–19: 39 579 из 28,85 млн т (данные посредника).

24 ESG Today. Microsoft Signs First Major Carbon Removal Deal Since Reportedly Pausing Purchases, май 2026 (сообщение СМИ).

25 Stockholm Exergi. New agreement - City of Stockholm becomes the world's fifth largest buyer of carbon removals, 26.05.2026: 50 000 т/год в течение 15 лет.

26 CDR.fyi. Öresundskraft AB / Höganäs AB, 26.08.2026: 70 000 т за десять лет; биогенная доля потока Filbornaverket - около 45%.

27 Höganäs. Höganäs och Öresundskraft ingår avtal om negativa utsläpp, 25.08.2026.

28 Gevo. Gevo and ClimeFi Complete Carbon Removal Transaction, Advancing Gevo's Growing Carbon Business, 08.10.2026.

4. Обзор ключевых проектов

Девелопер: Gevo Проект: Gevo North Dakota (США)	Этанольный завод улавливает CO_2 брожения и закачивает его в пласт под площадкой предприятия с июня 2022 г. К январю 2026 г. выпущено более 500 тыс. CORC по стандарту Puro[29]; в октябре 2026 г. компания сообщила о более чем 700 тыс. т удалённого CO_2 и о поставках через посредников[30].
Девелопер: ADM Проект: Columbus (Небраска, США)	Улавливание CO_2 брожения действует с 2025 г.; CO_2 по системе Tallgrass закачивают в Вайоминге. 21 сентября 2026 г. ADM объявила о продаже единиц с мощности удаления более 800 тыс. т в год; первый выпуск по Puro Geologically Stored Carbon ожидается до конца 2026 г.[31]
Девелопер: Stockholm Exergi Проект: Beccs Stockholm (Швеция)	Установка улавливания мощностью 800 тыс. т CO_2 в год строится при действующей ТЭЦ; CO_2 будет храниться под дном Северного моря у Бергена (Норвегия). К сентябрю 2026 г. завершены фундаменты, ввод запланирован на 2028 г.[32] Проект сочетает господдержку и договоры с покупателями, крупнейший из которых – Microsoft (около 5 млн т за десять лет).
Девелопер: Ørsted Проект: Ørsted Kalundborg CO_2 Hub (Дания)	Улавливание происходит на ТЭЦ Asnæs (древесная щепа, 280 тыс. т CO_2 в год) и Avedøre (солома, 150 тыс. т); CO_2 будут вывозить в хранилище Northern Lights (Норвегия). Проект опирается на 20-летний контракт господдержки (2023 г.) и договоры с Microsoft на 2,76 и 1 млн т; CDR.fyi учитывает 4,0 млн т, причина разницы не раскрыта[33]. Ввод ожидался в начале 2026 г.; по сообщению СМИ, в июле 2026 г. Ørsted ожидала полного ввода лишь во второй половине 2027 г. и рисковала штрафом по контракту господдержки[34].

29 Gevo. Gevo Achieves Industry Milestone: 500,000 High-Quality Carbon Removal Credits Issued from Gevo North Dakota Plant, 21.01.2026.

30 Gevo, пресс-релизы: ClimeFi, 08.10.2026; CEEZER, 14.10.2026.

31 ADM. ADM Plans Entry into Voluntary Carbon Market with Over 800,000 Tons of Annual Removal Capacity, Business Wire, 21.09.2026.

32 Stockholm Exergi: Foundation completed as Beccs Stockholm begins to rise above ground, 04.09.2026; решение об инвестициях, 27.03.2025; Delårsrapport januari-juni 2025 (договор с Microsoft).

33 Ørsted: пресс-релиз 15.05.2023 (договор с Microsoft на 2,76 млн т за 11 лет); Ørsted enters into new major agreement on carbon removal with Microsoft, 22.05.2024 (1 млн т за 10 лет; мощности, Northern Lights, ввод в начале 2026 г.).

34 DR. Ørsted risikerer millionbøde for forsinket CO_2-fangst, 13.07.2026, по данным Energiwatch (сообщение СМИ); Ørsted. Interim report, first half-year 2026, 13.08.2026, с. 9 (инвестиции в строящиеся установки).

Девелопер: CO280 Проект: улавливание на целлюлозно-бумажном комбинате (побережье Мексиканского залива, США)	Компания дооснащает действующие комбинаты улавливанием биогенного CO_2 из дымовых газов котлов для геологического хранения; комбинат и хранилище не названы. Первый проект мощностью более 400 тыс. т CO_2 в год находится на стадии проектирования (FEED)[35]. Договоры с Microsoft (3,685 млн т за 12 лет), JPMorganChase (450 тыс. т за 13 лет, менее 200 долларов США за тонну) и участниками Frontier (224,5 тыс. т до 2030 г.) дают в сумме 4,36 млн т. Окончательные инвестиционные решения по четырём проектам компания ожидала в 2026–2028 гг.; к октябрю 2026 г. сообщений о них не найдено[36].
Девелопер: FS Проект: BECCS на этанольном заводе в Lucas do Rio Verde (Бразилия)	По сообщениям СМИ, к сентябрю 2026 г. строительство завершалось, но закачка ждала разрешения регулятора ANP; её начало переносилось с июля на сентябрь 2026 г. и на 17 октября 2026 г. не подтверждено[37].
Девелопер: BioCirc Проект: Vesthimmerland (Дания)	Биогазовый завод, первый из пяти объектов BECCS компании, рассчитан на удаление 32,5 тыс. т CO_2 в год; сжиженный CO_2 через порт Эсбьерг поступает в Project Greensand, начавший 18 сентября 2026 г. коммерческую закачку под дном Северного моря[38].
Девелопер: SunGas Renewables Проект: Beaver Lake Biofuels (США)	Проект газификации древесины с получением метанола и хранением 1,1 млн т биогенного CO_2 в год прекращён 12 июня 2026 г. из-за слабого спроса на низкоуглеродное морское топливо и неопределённости условий CCS и финансирования[39].

Что показывают проекты. Этанольные заводы с почти чистым потоком CO_2 уже поставляют единицы. ТЭЦ и целлюлозно-бумажные комбинаты улавливают CO_2 из разбавленных дымовых газов, требуют крупных вложений, господдержки и договоров с немногими покупателями, что повышает риск задержек (Ørsted); топливные проекты несут ещё и рыночный риск продукта.

35 $CO_2$80: пресс-релиз 16.09.2025 (FEED проекта в США, более 400 тыс. т/год).

36 $CO_2$80, договоры: Microsoft, 11.04.2025; JPMorganChase, 20.05.2025; Frontier, 17.12.2024; Global Cleantech 100, 14.01.2026 (сроки решений); сумма – расчёт редакции; поиск выполнен 19.10.2026.

37 Brasil Energia, 25.09.2026; Bloomberg Línea, 2025; Forbes Brasil, июнь 2026 (сообщения СМИ).

38 gasworld, 2026; Offshore Engineer, 18.09.2026; Reuters (Mining Weekly), 18.09.2026 (сообщения СМИ).

39 SunGas Renewables. SunGas Announces Cessation of Beaver Lake Biofuels Project, 12.06.2026.

5. Стандарты и методологии

Система и проверенный документ	Область применения и существенное условие
Verra VCS: VMD0059, v1.0	Модуль VM0049 для улавливания на установках тепло- и электроснабжения на устойчивой биомассе; производство биотоплива пока не охвачено (пересмотр на стадии оценки)[40].
Isometric: Biogenic Carbon Capture and Storage, v1.4	Хранение более 1000 лет; учёт сырья, базового сценария, выбросов и хранения; применяется совместно с модулями[41].
Puro.earth: Geologically Stored Carbon, 2024 v.5 (23.04.2026)	Атмосферный и биогенный CO_2; хранение не менее 1000 лет; хранилище – в юрисдикции с надёжным правовым режимом; исключены закачка для добычи углеводородов и совместное сжигание биомассы с углём[42].
Gold Standard: ферментация биомассы с CCS, v2.0 (28.05.2025)	Ферментация возобновляемой биомассы и геологическое хранение; правило от 05.09.2024 распространяет методологию на сбраживание, сжигание, газификацию и пиролиз[43].
GCC: GCCMT001 (апрель 2024 г.)	Улавливание, транспорт и геологическое хранение CO_2, включая биогенный; закачка для повышения нефтеотдачи не допускается[44].
EU CRCF: Регламент (ЕС) 2026/285	Методология BioCCS: улавливающая установка в ЕС; хранилище с разрешением по Директиве 2009/31/ЕС; CO_2 – побочный продукт производства товаров, энергии или услуг[45].

Для сертификации по CRCF Puro.earth в сентябре 2026 г. опубликовала отдельную методологию Puro CRCF BioCCS (v1.0)[46].

40 Verra. VMD0059, v1.0, действует с 22.04.2025; Methodology Idea Note (биотопливо).

41 Isometric. Biogenic Carbon Capture and Storage, v1.4, разделы 4, 6-9. Текущая версия на сайте на 17.10.2026.

42 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, Edition 2024 v. 5, Approved 23 April 2026, sections 1.2, 2.2, 3.2; действующая версия по библиотеке документов Puro (обновлена 30.09.2026).

43 Gold Standard. Biomass Fermentation with CCS: revision history; Rule Update, 05.09.2024.

44 Global Carbon Council. GCCMT001 (CCS methodology); GCC, новость 2025 г.: дата публикации, исключение EOR.

45 Commission Delegated Regulation (EU) 2026/285 of 3 February 2026 (OJ L, 17.4.2026; в силе с 07.05.2026), Art. 1(4), 3(2)-(3); Annex, Section 1.

46 Puro.earth. Document Library (страница обновлена 30.09.2026): CRCF methodologies; Approved Methodologies.

6. Преимущества

BECCS сочетает долговременное удаление CO_2 с выпуском энергии или топлива; действующие предприятия уже располагают частью оборудования, персоналом и каналами сбыта. Общие транспортные сети и хранилища (Greensand, Northern Lights) позволяют подключать предприятия, которым невыгодна собственная система закачки.

7. Вызовы и ограничения

① **Снабжение биомассой.** Вырубка лесов, потеря почвенного углерода, удобрения и перевозки могут существенно уменьшить чистое удаление; даже остатки производства имеют альтернативные применения и экологические функции. Поэтому оценивают происхождение сырья, восстановление запасов углерода и последствия изъятия, а условия закупок должны обеспечивать прослеживаемость биомассы и права местных и коренных сообществ[47]. Покупатели учитывают этот риск по-разному: Frontier не рассматривает закупки у этанольных и биогазовых установок с улавливанием, а методологию Puro для BECCS одобрила только для проектов с минимальным приростом потребления биомассы[48].

② **Инфраструктура и сроки.** Задержки разрешений, нехватка способности пласта принимать закачиваемый CO_2 или транспортной мощности откладывают выручку всей цепочки и могут повлечь санкции по контрактам господдержки (раздел 4); затраты энергии на улавливание снижают чистое удаление и повышают себестоимость.

③ **Дополнительность и косвенные выбросы.** Дополнительность (additionality) показывает, какой климатический результат создаёт проект по сравнению с ситуацией без него — базовым сценарием (baseline). Подходы различаются: Puro требует доказать, что хранение не предписано законом и стало возможным благодаря углеродному финансированию, а CRCF устанавливает для BioCCS стандартизированный нулевой

47 Carbon Direct. Sustainable Biomass Sourcing for Carbon Dioxide Removal: A Buyer's Guide, v1.2, январь 2025, с. 21, 23–24, 29.

48 Frontier. Biomass carbon removal & storage; Puro.earth, пресс-релиз 22.06.2026.

базовый сценарий и считает такие проекты дополнительными[49]. Учитывается и перенос выбросов за пределы проекта (leakage), например переход прежнего потребителя древесных остатков на более углеродоёмкое топливо[50].

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Мониторинг, отчётность и верификация (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) связывают происхождение биомассы с фактическим хранением CO_2: в основе расчёта — масса биогенного CO_2, переданного в долговременное хранение, за вычетом связанных выбросов и других корректировок методологии.

На производстве измеряют массу и состав газовых потоков, биогенную долю, расход энергии и материалов; при транспортировке сопоставляют переданные и принятые объёмы; на площадке хранения контролируют закачку, давление, состояние скважин и распространение CO_2, сверяя наблюдения с расчётной моделью[51].

Оценка жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA) требует обоснованного распределения выбросов между основной продукцией и удалением[52]. Puro учитывает выбросы улавливания, транспортировки и закачки, а методология ЕС прямо исключает выбросы обычной работы предприятия[53].

Независимая проверка охватывает документы на сырьё, калибровку приборов, полноту данных и расчёт неопределённости. После выпуска единиц сохраняются обязательства по наблюдению за хранилищем и действиям при обратном высвобождении углерода (reversal); порядок возмещения определяют стандарт и договоры участников[54]. В механизме по ст. 6.4 Парижского соглашения с 9 октября 2026 г. действует методический инструмент оценки риска обратного высвобождения[55].

49 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, 2024 v.5, rule 3.5.1; Commission Delegated Regulation (EU) 2026/285, recital 4; Annex, Section 2.1.2.

50 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, 2024 v.5, section 6; Isometric. Biogenic Carbon Capture and Storage, v1.4.

51 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, 2024 v.5, sections 7.3–7.7, 8.

52 Herbstritt et al. Strengthening Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) Protocols. CATF, март 2026, с. 5, 14–24; срез протоколов на 01.05.2025.

53 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, 2024 v.5, rule 4.5.1; Regulation (EU) 2026/285, Annex, Section 2.1.6.3.

54 Puro.earth. Geologically Stored Carbon, 2024 v.5, sections 4.7, 7.6, 8.

55 UNFCCC. A6.4-SBM023-A22, Reversal risk assessment tool (в силе с 09.10.2026).

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Модернизация ТЭЦ сохраняет теплоснабжение и добавляет доход от удаления CO_2; у Ørsted тепло процесса улавливания может дать около 50 МВт для теплосетей Kalundborg и 35 МВт для Большого Копенгагена[56]. Оценок эффектов для занятости не найдено. Экологические последствия определяются выбором сырья и площадки: изъятие остатков может обеднить почвы и местообитания, а производство и перевозки нагружают водные ресурсы, воздух и транспорт; их нужно сопоставлять с альтернативным использованием биомассы[57].

10. Российский опыт и потенциал реализации

Подтверждённых сведений о реализованных, пилотных или исследовательских проектах BECCS полного цикла в России в открытых источниках не найдено; опубликованные работы посвящены экономике улавливания и хранения CO_2 в целом и, например, оценивают кластерные проекты в России как пока нерентабельные[58].

56 Ørsted. Ørsted awarded contract – will capture and store 430,000 tonnes of biogenic CO_2, 15.05.2023 (оценка компании).

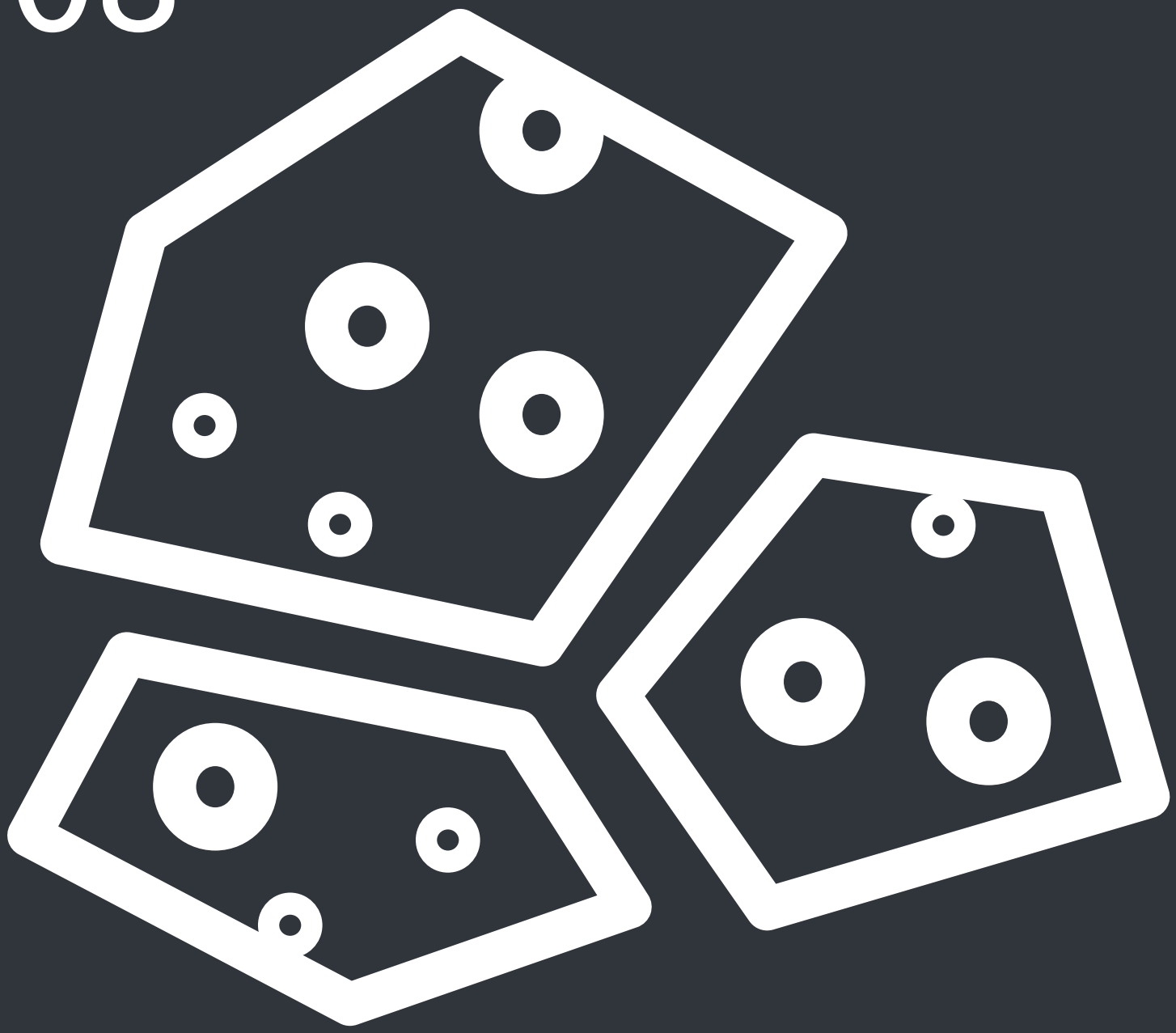
57 The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, с. 175, 238–239, 252, 256–257: системные границы, биомасса и побочные эффекты.

58 Проекты улавливания, хранения и использования CO_2 и их экономическая целесообразность (Санкт-Петербургский горный университет) // Тенденции развития экологии, 2024, т. 54, № 1, с. 117–131

11. Выводы

BECCS добавляет геологическое хранение биогенного CO_2 к производству энергии или топлива, поэтому её экономика и климатический результат зависят от основного производства; подтверждённая практика пока сосредоточена на этанольных заводах. Среди подходов к CDR BECCS даёт такую же геологическую долговечность хранения, как DACCS, при оценочной себестоимости в несколько раз ниже (раздел 2; глава о DACCS), но её масштаб ограничен ресурсом устойчивой биомассы. После сокращения закупок Microsoft применение BECCS будет определяться господдержкой, регулируемым спросом, доступом к общим хранилищам и доказуемой устойчивостью сырья. Для России, где проекты BECCS не найдены, первыми условиями станут доступные хранилища и разрешительная практика закачки CO_2 в недра (раздел 10).

08



Удаление CO_2 из атмосферы путём производства и хранения биочара

BIOCHAR



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ / 08
УДАЛЕНИЕ CO_2 ИЗ АТМОСФЕРЫ ПУТЁМ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ БИОЧАРА. BIOCHAR

1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Биочар (biochar; также «биоуголь») — богатый углеродом твёрдый продукт пиролиза, то есть нагревания биомассы почти без доступа кислорода. Пиролиз переводит часть углерода, который растения забрали из атмосферы, в устойчивые ароматические структуры, разлагающиеся в почве за сотни лет и дольше. Удалением CO_2 из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR) считается только углерод, который сохранится в биочаре к расчётному горизонту, за вычетом выбросов цепочки: заготовки и перевозки сырья, пиролиза, внесения. По оценке The State of CDR, чистое удаление составляет 60–92% CO_2, связанного в биочаре. Не засчитываются предотвращённые выбросы (например, от сжигания соломы), прирост почвенного углерода от внесения и биочар, сожжённый как топливо или использованный как восстановитель в металлургии[1].

Процесс производства. Сырьё (табл. 1) сначала измельчают и сушат, затем загружают в реактор и нагревают почти без доступа кислорода (рисунок 1). Для биочара обычно используют медленный пиролиз: сырьё нагревается постепенно и остаётся в реакторе долго, до нескольких часов. При этом 25–40% массы сырья превращается в биочар, 30–40% — в жидкие продукты, которые конденсируются из паров, и 20–30% — в газ. Газы и пары обычно сжигают на самой установке; полученное тепло используют для сушки поступающего сырья, а излишки продают[2]. При быстром пиролизе нагрев длится секунды, а главным продуктом становится жидкое топливо, бионефть: её выход достигает 75% при выходе биочара около 12%[3].

Результат во многом зависит от температуры. Чем она выше, тем меньше выход биочара, но тем больше в нём углерода и тем медленнее он разлагается в почве. Поэтому доля углерода исходной биомассы, которая сохранится в почве через 100 лет, по обобщению опубликованных данных составляет 25–50%; лучший результат, в среднем 41% (±4,5%), получается при 500–550 °C[4].

1 Smith S. M. et al. Chapter 7: Current levels of CDR // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 176.

2 Weber K. et al. Current State of Biochar as a Carbon Dioxide Removal Solution: Status Report for Mission Innovation Countries and Beyond // Gassnova SF, 2026, с. 31.

3 Bridgwater A. V. Challenges and Opportunities in Fast Pyrolysis of Biomass: Part I // Johnson Matthey Technology Review, 2018, 62 (1): 118–130, табл. I; IEA Bioenergy Task 34. Pyrolysis Explained

4 Li L. et al. Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: a meta-analysis // Soil Use and Management, 2023, 39: 43–52; Rodrigues L. et al. The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice // European Journal of Soil Science, 2023, 74 (4): e13396.

Содержание углерода в биочаре зависит от сырья и температуры. Минеральная часть сырья (зола) при пиролизе не сгорает и «разбавляет» углерод, поэтому древесный биочар богаче углеродом, чем соломенный или навозный, а с ростом температуры содержание углерода увеличивается. В результате органический углерод (Corg) составляет от 35 до 95% сухой массы[5]. Стандарты нормируют прежде всего устойчивость углерода, то есть отношение H/Corg (таблица 3). H/Corg — это отношение числа атомов водорода к числу атомов органического углерода. По мере обугливания оно снижается, и биочар с низким значением, как правило, разлагается в почве медленнее; поэтому стандарты используют его как показатель устойчивости. Для почвенного хранения наиболее эффективен биочар из растительного сырья, полученный при 500–550 °C: его H/Corg составляет 0,38–0,44, то есть ниже порога Isometric (0,5), хотя запас невелик[6]. Цель — не максимальное содержание углерода в самом биочаре, а наибольшая доля углерода сырья, которая надолго останется в почве: с ростом температуры выход биочара падает.

Несгоревший газ содержит метан: главное условие чистого процесса — сухое сырьё и полное дожигание газов. В полевых измерениях простых печей при влажности сырья выше 40% выбросы превышали 600 г метана на килограмм биочара, или около 15 кг CO_2-экв., тогда как килограмм биочара в почве связывает порядка 2 кг CO_2, так что такие выбросы многократно перекрывают климатическую пользу[7]. Чаще всего биочар вносят в почву. В бетоне и асфальте его только начинают использовать, а надёжной статистики о том, сколько единиц выпущено по каждому способу хранения, нет. Затраты и контроль качества во многом зависят от организации производства (табл. 2).

Рисунок 1. Потоки углерода при производстве и хранении биочара[8]



5 Adamsen A. P. S. Syntesens afgrænsninger og produktion af biokul (Biochar knowledge synthesis), DCA, Aarhus University, 03.10.2022; Li L. et al. // Soil Use and Management, 2023, 39: 43–52; Groot H. Comparison of Biochar Characteristics from Different Production Scales // Dovetail Partners, август 2025, с. 3–4.

6 Rodrigues L. et al. // European Journal of Soil Science, 2023, 74 (4): e13396.

7 Weber K. et al. Current State of Biochar as a Carbon Dioxide Removal Solution: Status Report for Mission Innovation Countries and Beyond // Gassnova SF, 2026, с. 39.

8 Схема составлена Ю.Фурса (ЦТУР) по данным Weber K. et al., 2026 (с. 31, 39) и Rodrigues L. et al., 2023.

Таблица 1. Основные категории сырья (допустимость определяет методология)

Категория и примеры	Ключевые вопросы для проекта
Остатки лесозаготовок: ветви, вершины, порубочные остатки	Устойчивость лесопользования, альтернативное использование
Отходы лесопиления и деревообработки: опилки, стружка, обрезки, кора	Происхождение древесины, клеи и пропитки, конкуренция за сырьё
Сельскохозяйственные и агропромышленные остатки: солома, лузга, стебли, жом	Почвенное органическое вещество, сезонность, затраты на сушку
Навоз и осадки сточных вод	Загрязнители, санитарные требования, ограничения применения
Специально выращиваемая биомасса: энергетические культуры, плантации	Землепользование; часть стандартов ограничивает (J-Credit исключает древесину главной рубки)

Таблица 2. Организация производства биочара[9]

Вариант	Принцип и стадия применения	Сильные стороны и ограничения
Промышленный	Непрерывные реакторы на постоянной площадке; основная часть выпущенных единиц (Exomad Green, Aperam BioEnergia)	Контроль процесса и выбросов, сбыт тепла; нужны стабильные сырьё и сбыт
Распределённый и мобильный	Малые установки у источников сырья или перевозимый реактор; модули Isometric с ноября 2025 г. (Varaha, Carboneers)	Короткая логистика, доход местных участников; сложнее контроль каждой партии
Кустарный	Ямы и открытые печи без контроля процесса; в 2024 г. около 47% единиц биочара на рынке	Дёшево, но метан и качество не контролируются; Isometric и требовательные покупатели такие проекты не принимают

9 Supercritical. The biochar supply crunch: Market intelligence for H2 2026, сентябрь 2026, с. 12; Isometric. Biochar Production in Distributed and Small Scale Projects v1.1, разд. 2; Jokubė M. et al. Biochar co-benefits are valued in the voluntary carbon market // Communications Sustainability, 2026, 1: 90.

Продолжительность хранения (durability)

› Углерод биочара неоднороден. Небольшая его часть разлагается легко, то есть возвращается в атмосферу в течение нескольких лет, а основная часть образует устойчивые ароматические структуры и сохраняется веками и дольше. Поэтому стандарты засчитывают не весь углерод, а только ту его долю, которая останется в почве к выбранному сроку: 100, 200 или 1000 лет. Устойчивость оценивают по отношению H/Corg. Isometric допускает биочар с H/Corg ниже 0,5 и предлагает два варианта. Для срока 200 лет сохраняемую долю рассчитывают по модели разложения Woolf и соавторов (2021), которая учитывает H/Corg и температуру почвы; коэффициенты выбраны консервативно. Срок 1000 лет допускается только для частиц, которые по оптической отражательной способности (не ниже 2%) сопоставимы с инертинитом — наиболее устойчивой составляющей ископаемых углей. В обоих случаях засчитывается не более 95% органического углерода[10]. Puro.earth по редакции Edition 2025 выпускает единицы CORC200+ (срок 200 лет), но площадки, сертифицированные ранее, могут до продления периода кредитования работать по редакции Edition 2022 и получать CORC100+ (100 лет)[11]. Поэтому единицы разных методов обещают 100, 200 или 1000 лет, и сравнивать их нужно по способу расчёта. Все эти оценки — экстраполяция лабораторных и полевых наблюдений на столетия.

Технологическая готовность и масштабируемость

› По девятиуровневой шкале технологической готовности (Technology Readiness Level, TRL) The State of CDR (2026) и WEF (март 2026 г.) дают биочару 7–9 (The State of CDR — ниже для применения вне почвы); RMI (октябрь 2026 г.) — TRL 9 при готовности к внедрению (adoption readiness level, ARL, шкала Министерства энергетики США) 6 из 9 [12]. По оценке The State of CDR, в 2025 г. биочар удалил 1,46 ± 0,16 млн т CO_2 — почти три четверти результата всех новых методов CDR. Технический потенциал оценивается до 11 млрд т CO_2 в год, устойчивый (с ограничением по сырью) — до 2,7 млрд т, экономический может быть ниже 0,1 млрд т; разброс задают допущения о доступной биомассе[13]. Физическое производ-

10 Isometric. Biochar Storage in Soil Environments v1.3, разд. 1.2, 3.3, 5.1.

11 Puro.earth. Advancing the Science of Biochar Permanence, 03.07.2025; Puro.earth. Public Consultation for Biochar Methodology Update, 2025.

12 Fuss S. et al. Chapter 10: Costs and Potentials // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 239; World Economic Forum. Carbon Dioxide Removal Technologies: Market Overview and Offtake, March 2026, с. 12; RMI. The New Frontiers Report for CDR, октябрь 2026, с. 41–42.

13 Smith S. M. et al. Chapter 7: Current levels of CDR // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 171; Fuss S. et al. Chapter 10: Costs and Potentials // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 239–240.

ство биочара, по опросу International Biochar Initiative, выросло с 0,18 млн т в 2023 г. до 0,52 млн т в 2025 г.[14]

2. Экономика CDR-проектов

Капитальные затраты (capital expenditures, CAPEX) включают реактор с дожиганием газов, подготовку сырья и проекта к валидации, эксплуатационные (operating expenditures, OPEX) – сырьё, логистику, энергию, персонал, анализы, внесение и верификацию. В иллюстративном расчёте RMI нынешняя себестоимость – 80–225 долларов США за тонну CO_2 с главными статьями в капитальных затратах и сырье; снижение на 40–60% связывают с непрерывной работой крупных установок и использованием тепла, хотя часть экспертов считает его маловероятным. The State of CDR приводит модельный диапазон будущих затрат 70–360 долларов США за тонну[15]. Для Китая средние чистые затраты – за вычетом доходов от газа и прибавки урожая – оценены примерно в 90 долларов США за тонну CO_2 при потенциале до 0,92 млрд т в год[16].

Средняя цена раскрытых договоров на биочар составила 132 долларов США за тонну в 2024 г. и 136 долларов США в 2025 г.[17] Средневзвешенная цена раскрытых сделок на CDR.fyi – также 136 долларов США, одна из самых низких среди всех проектов CDR: дешевле только прямое хранение биомассы (61 долларов США), у BECCS – 220 долларов США, у усиленного выветривания – 352 долларов США, у DACCS – 516 долларов США[18]. По оценке Platts, в ноябре 2025 г. единицы из США стоили 150, из Индии – 135 долларов США; в августе 2026 г. индийская оценка снизилась до 130 долларов США[19]. По опросу CDR.fyi и OPIS, к 2030 г. покупатели ждут снижения цен на 20%, поставщики – роста на 2% [20]. Разница между ценой и модельной себестоимостью не показывает маржу: у них разные периоды и границы расчёта.

14 International Biochar Initiative. Global Biochar Production Surges Nearly Threefold as Industry Enters New Era of Scale, 26.06.2026 (2025 Global Biochar Market Report, данные за 2023 и 2025 гг.); Carbon Herald. Exclusive: The 2023 Global Biochar Market Report Projects $3.3B Market Revenue By 2025, 2024.

15 RMI. The New Frontiers Report for CDR, октябрь 2026, с. 43; Fuss S. et al. Chapter 10: Costs and Potentials // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 240.

16 Deng X. et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China // Nature Communications, 2024, 15: 1085.

17 Johnstone I. et al. Chapter 4: Voluntary demand for CDR // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, табл. 4.3, с. 101.

18 CDR.fyi. Weighted Average Price: weighted average price per tonne, by method. Дата обращения: 30 октября 2026 г.

19 S&P Global Commodity Insights. Biochar carbon credit prices steady, but sentiment weakens, 13.11.2025; S&P Global Commodity Insights. Indonesia may emerge as next major biochar credits producer in SE Asia after India, 28.08.2026.

20 CDR.fyi, OPIS. 2026 Durable CDR Pricing Survey, май 2026.

3. Рыночная ситуация

Углеродные единицы, подтверждающие удаление CO_2 из атмосферы (carbon removal credits), по проектам биочара покупают технологические компании (Microsoft, Google), финансовые и страховые организации (Swiss Re) для добровольных климатических целей. Значительная часть сделок идёт через посредников: в I квартале 2026 г. через них прошло 74% тонн по всем методам[21].

Рынок описывают четыре разных показателя — договоры, поставки, выпуск и погашение единиц, — и смешивать их нельзя. На 30 октября 2026 г. по биочару законтрактовано 7,48 млн т CO_2 — 14,8% из 50,6 млн т долговременного CDR, а поставлено 1,37 млн т, около 76% всех поставок; это накопленные поставки по раскрытым сделкам, и их нельзя сопоставлять с годовой оценкой удаления из раздела 1. Поставки у биочара составляют 18% законтрактованного, по рынку в целом — 3,6%. На биочар приходится 55% сделок (6381 из 11 641) при средней сделке около 1,2 тыс. т против 4,3 тыс. т по рынку (расчёты редакции)[22]. Выпуск виден по реестрам: Puro.earth к ноябрю 2026 г. выпустил более 2 млн единиц (CORC), 49% из них — по биочару, то есть около 1 млн т (расчёт редакции)[23]. В I квартале 2026 г. заключены договоры на рекордные для начала года 2,3 млн т, из них 93% — биочар; 43% квартала — один договор Microsoft с Liferaft (США) на 1 млн т на 10 лет[24]. По объёму рынок при этом сосредоточен: Microsoft (2,7 млн т) и Altitude (1,6 млн т) обеспечивают 57,5% законтрактованного биочара[25]. Весной 2026 г. сообщалось о паузе Microsoft в новых закупках CDR [26]. Договоры на будущие поставки (offtake agreements) не равны выручке: по оценке Supercritical (платформа торговли единицами CDR, оценка основана на её собственных данных), в 2025 г. проекты биочара поставили на 54% меньше прогноза, а 55% проектов не поставили ничего[27].

Спрос будут формировать и правила. Стандарт SBTi Corporate Net-Zero Standard V2.0 (11.06.2026) предусматривает, что с 2035 г. крупные и средние компании стран с высоким доходом будут поддерживать удаление в объёме не менее 1% текущих выбросов с ростом до 100% к году нулевого баланса; эти критерии предварительные и будут пересмотрены в следующей версии стандарта[28]. Puro.earth как участник рынка называет также CRCF, пересмотр EU ETS с возможным включением постоянного удаления и государственные закупки в Канаде, Норвегии, Дании и Швеции[29].

21 CDR.fyi. Order Insights: All Methods; Biochar Carbon Removal (BCR); CDR.fyi. 2026 Q1 Durable CDR Market Update — From Promise to Proof.

22 CDR.fyi. Order Insights: All Methods; Biochar Carbon Removal (BCR)

23 Puro.earth. Two million tonnes removed: what this milestone means for CDR, and what it means for the planet, 03.11.2026 (данные на ноябрь 2026 г.).

24 CDR.fyi. 2026 Q1 Durable CDR Market Update — From Promise to Proof, 18.05.2026.

25 CDR.fyi. Order Insights: All Methods; Biochar Carbon Removal (BCR)

26 CDR.fyi. Durable CDR Market Update: From Ambition to Execution, 12.06.2026.

27 Supercritical. Delivered or delayed? How delivery risk is reshaping carbon removal procurement, 2026, с. 7–8.

28 SBTi. Corporate Net-Zero Standard V2.0, гл. 6 «Ongoing Emissions Responsibility», п. 6.5, 11.06.2026; ESG Dive. SBTi finalizes long-awaited update to its Corporate Net-Zero Standard, 2026.

29 Puro.earth. Two million tonnes removed: what this milestone means for CDR, and what it means for the planet, 03.11.2026.

4. Обзор ключевых проектов

Девелопер: Exomad Green **Проект: площадки в Консепсьоне и Рибералте (Боливия)**	Отходы лесопиления на двух действующих площадках. Единицы выпускает Puro.earth по методологии Biochar Edition 2022 (CORC100+)[30]. Это крупнейший поставщик биочара по объёму договоров (2,4 млн т); в мае 2025 г. компания заключила договор с Microsoft на 1,24 млн т.[31]
Девелопер: Aperam BioEnergia **Проект: Aperam BioEnergia (Бразилия, долина Жекитиньонья)**	В I квартале 2024 г. через платформу Patch компания продала единицы на 15 тыс. т CO_2 [32]. По реестру Puro, в 2022–2026 гг. проекту выпущено 161,5 тыс. CORC, из них 46,4 тыс. – в 2026 г. (расчёт редакции)[33]. Уголь, сгорающий в доменной печи, удалением не считается. В сентябре 2026 г. Global Forest Coalition и партнёры из-за истощения грунтовых вод и земельных конфликтов потребовали приостановить сертификацию; Puro.earth сослался на аудит без существенных несоответствий[34].
Девелопер: Varaha **Проект: распределённое производство биочара (Индия)**	Стебли хлопчатника, которые иначе сжигают в поле, и инвазивный кустарник Prosopis juliflora перерабатываются в сети небольших установок. В мае 2026 г. Varaha первой получила единицы по распределённому модулю Isometric v1.1; по объёму договоров это третий поставщик биочара (около 0,5 млн т)[35].

30 Carbon Pulse. Biochar developer's field study finds crop yield improvements in Bolivia, 2025; Puro Registry. Exomad Green, выпуск от 23.01.2026.

31 CDR.fyi. Order Insights: All Methods; Biochar Carbon Removal (BCR), снимок от 03.11.2026; Carbon Herald. CDR.fyi: Durable Carbon Removal Marks Milestone 1 Million Deliveries, 2025.

32 Aperam. Aperam BioEnergia kicks off Patch partnership by selling 15,000 metric tons of carbon removal, 02.04.2024.

33 Puro.earth. Aperam BioEnergia: Facility historical CORC issuance (данные 2022–2026 гг.).

34 Global Forest Coalition. Dry Streams in an Ocean of Eucalyptus, 21.09.2026; Carbon Pulse. Brazilian biochar developer faces scrutiny over environmental, social impacts, 2026.

35 Supercritical. The biochar supply crunch: Market intelligence for H2 2026, сентябрь 2026, с. 10; CDR.fyi. Durable CDR Market Recap: May 2026; CDR.fyi. Order Insights: All Methods; Biochar Carbon Removal (BCR)

5. Стандарты и методологии

Системы сертификации биочара различаются горизонтом хранения, требованиями к сырью и допустимыми применениями (табл. 3)[36].

Одобрение Совета по добросовестности добровольного углеродного рынка (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market, ICVCM) по Основным принципам углеродных единиц (Core Carbon Principles, CCP) относится к конкретной версии методологии (таблица 3)[37]. Рамка сертификации ЕС (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF) распространяется на операторов, работающих в ЕС.

Таблица 3. Основные методологии биочарного CDR

Документ и организация	Версия и статус на октябрь 2026 г.	Особенности
Biochar Methodology. Puro.earth	Edition 2025 (12.06.2025; версия 2 – 12.2025); ранее сертифицированные площадки – по Edition 2022	CORC200+ (ранее CORC100+); программа признана ICVCM (CCP-Eligible); с 06.2026 – методология под CRCF
Biochar Production and Storage. Isometric	v1.3; модули распределённого (v1.1) и мобильного (v1.0) производства – с 26.05.2026	200 или 1000 лет (малые установки – 200); H/Corg < 0,5; v1.0 одобрена ICVCM
VM0044. Verra	v1.2 с 27.06.2025 (новые установки); проект v2.0 – консультация 15.07–17.08.2026 [38]	Почва и непочвенное применение; v1.2 одобрена ICVCM

36 ICVCM. Integrity Council approves Biochar & Improved Forest Management methodologies, 13.08.2025; ICVCM. Integrity Council confirms carbon crediting program Puro.Earth as CCP-Eligible, 11.12.2025; Puro.earth. Puro.earth Biochar Methodology Update: A Collaborative Step Forward for Retail Use, 03.12.2025; Puro.earth. Puro Standard Document Library (Puro CRCF Biochar Carbon Removal, June 2026, v1); Verra. VM0044 Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications, v1.2; Isometric. A new certified module for mobile biochar production, 26.05.2026; Gold Standard. Production and Application for the Removal of Carbon via Biochar (PARC), апрель 2026; Global Carbon Council. GCC Opens Public Stakeholder Consultation on Draft Methodology for Durable Biochar Production, февраль 2026; Herbert Smith Freehills Kramer. A new EU framework for carbon removals and carbon farming, 2026.

37 ICVCM. Integrity Council approves Biochar & Improved Forest Management methodologies, 13.08.2025.

38 Verra. Consultation: Major Revision to Biochar Methodology VM0044, 2026; Verra. VM0044, v1.2.

Документ и организация	Версия и статус на октябрь 2026 г.	Особенности
U.S. and Canada Biochar Protocol. Climate Action Reserve	v1.0 (19.03.2024); готовится v1.1	США и Канада; почва, стройматериалы, полигоны, шахты, скважины; горизонт 100 лет; одобрен ICVCM [39]
BiCRS. Rainbow	BiCRS v1.1 и почвенный модуль v2.3 – с 21.01.2026	Для биочара – почва и почвенные смеси; программа признана ICVCM (CCP-Eligible)[40]
Global Biochar C-Sink, Global Artisan C-Sink. Carbon Standards International	Действуют; заявка программы в ICVCM – 05.2026	Промышленное и кустарное (печи Kon-Tiki) производство; готовится порядок под CRCF [41]
AG-004. J-Credit (Япония)	Государственная схема; новая редакция – 08.2026	Минеральные сельскохозяйственные почвы, отечественное сырьё; коэффициенты IPCC на 100 лет[42]
PARC. Gold Standard	Проект; консультация 22.04–22.05.2026	Засчитывается только удаление, предотвращённые выбросы исключены
GCCNMT008. Global Carbon Council	Проект v1.0; консультация с 02.2026	Ориентирована на правила ст. 6.4 Парижского соглашения
Регламент (ЕС) 2026/285 (CRCF). Европейская комиссия	Принят 03.02.2026, в силе с 07.05.2026	DACCS, BioCCS и биочар; только ЕС; H/Corg ≤ 0,7; из продуктов – цемент, бетон, асфальт

39 Climate Action Reserve. U.S. and Canada Biochar Protocol (v1.0, обновление до v1.1); Eligible Biochar End Uses List, 19.03.2024; Protocol Summary V1.0, 2024.

40 Rainbow. Biomass carbon removal and storage (BiCRS) v1.1, 21.01.2026; Biochar application to soils v2.3, 21.01.2026; DecarbonFuse. Rainbow Updates bioCCS Methodology to Align With EU's CRCF Framework, 02.07.2026.

41 Carbon Standards International. Global Artisan C-Sink: Guidelines, v1.0, 2022; ICVCM. Global C-Sink Standards: Copy of application, 18.05.2026; Biochar Today. Carbon Standards launches public consultation for EU-compliant biochar certification methodology, 2026.

42 J-Credit. 方法論 AG-004 Ver.2.1 «バイオ炭の農地施用», условия 1–4; Quantum Commodity Intelligence. Japan revises five J-Credit methods, including biochar, 13.08.2026.

6. Преимущества

① **Поставки уже сейчас.** На биочар приходится около трёх четвертей поставленных тонн долговременного CDR. Единицы выпускают после внесения партии, а не за годы до ввода установки.

② **Измеряемый продукт.** Массу, углерод и H/Corg каждой партии определяют в лаборатории до внесения; модельной остаётся лишь сохраняемая доля, тогда как в усиленном выветривании результат восстанавливают по пробам почвы и моделям.

③ **Энергия и масштаб.** Пиролиз сам даёт тепло, установки бывают от мобильных до промышленных, а до первого выпуска единиц, по оценке Senken (платформа закупки углеродных единиц для компаний), проходит 12–24 месяца[43]. Эти преимущества реализуются только при чистом сырье, контроле метана и подтверждённом конечном применении.

7. Вызовы и ограничения

① **Сырьё.** Остатки уже идут на топливо, корм и поддержание почвенного органического вещества, а за ту же биомассу конкурируют BECCS и биотопливо. Изъятие остатков может вызвать замещающие выбросы, а при полезном прежнем использовании сырья под вопросом и дополнительность[44].

② **Поставки.** По оценке Supercritical, поставки зависят прежде всего от финансирования (на первую коммерческую установку нужно 1–5 млн долларов США), а также от разрешений, работы оборудования и сырья[45]. Обзор для стран Mission Innovation главным барьером называет не технологию, а ограниченный спрос и нехватку договоров на сбыт[46].

43 CDR.fyi. Order Insights: All Methods; Biochar Carbon Removal (BCR); World Economic Forum. Carbon Dioxide Removal Technologies: Market Overview and Offtake, March 2026, с. 10–11; Senken. Carbon removal prices 2026 to 2040, август 2026, с. 3.

44 Supercritical. Bottlenecks and breakthroughs: Scaling biochar on the road to 2030, 2025, с. 17–18; RMI. The New Frontiers Report for CDR, октябрь 2026, с. 44.

45 Supercritical. Bottlenecks and breakthroughs: Scaling biochar on the road to 2030, 2025, с. 9–12.

46 Supercritical. Delivered or delayed? How delivery risk is reshaping carbon removal procurement, 2026, с. 10, 16–17; Weber K. et al. Current State of Biochar as a Carbon Dioxide Removal Solution: Status Report for Mission Innovation Countries and Beyond // Gassnova SF, 2026, с. 7.

③ **Качество продукта.** При пиролизе образуются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Isometric устанавливает для каждой партии пороги по ПАУ, тяжёлым металлам, диоксинам и полихлорированным бифенилам[47]. Для строительных материалов засчитываемая доля зависит от срока службы изделия: по перечню CAR это 100% для цемента, 30% для древесно-полимерных композитов и 20% для асфальта[48].

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Мониторинг, отчётность и верификация (monitoring, reporting and verification, MRV) охватывают происхождение и влажность сырья, параметры пиролиза, выбросы метана, сухую массу и состав каждой партии. Isometric рассчитывает сохранённый CO_2 по сухой массе внесённого биочара, доле органического углерода и сохраняемой доле за вычетом выбросов жизненного цикла. Органический углерод — это общий углерод за вычетом неорганического (карбонатов, входящих в золу)[49]. После смешивания с почвой отличить углерод биочара от почвенного рутинными методами нельзя, поэтому хранение подтверждают характеристиками до внесения, геопривязанными фотографиями, картами участков и документами о передаче каждой партии; данные проверяет независимый орган по валидации и верификации[50].

Базовый сценарий (baseline) описывает судьбу сырья без проекта. Дополнительность (additionality) труднее всего доказать для действующих производств: по данным Supercritical, площадка, выпускавшая биочар и до небольшой модернизации, проверку не прошла[51]. Утечки (leakage) возникают, если изъятое сырьё заменяют другим ресурсом. Продолжительность хранения (durability) заложена в расчёт сохраняемой доли, поэтому Isometric не формирует буферный резерв для почвенного хранения. Риск обратного высвобождения углерода (reversal) связан прежде всего с возгоранием при хранении и использованием биочара в качестве топлива; до внесения партию можно хранить не более 12 месяцев. Повторный зачёт предотвращают уникальные номера партий и единиц и их погашение в реестре[52].

47 Isometric. Biochar Storage in Soil Environments v1.3, табл. 2.

48 Climate Action Reserve. Eligible Biochar End Uses List, 19.03.2024.

49 Groot H. Comparison of Biochar Characteristics from Different Production Scales // Dovetail Partners, август 2025, с. 3.

50 Isometric. Biochar Storage in Soil Environments v1.3, разд. 1.2, 5.1, 8; Isometric. Biochar Production and Storage v1.3.

51 Supercritical. The biochar supply crunch: Market intelligence for H2 2026, сентябрь 2026, с. 4.

52 Isometric. Biochar Storage in Soil Environments v1.3, разд. 5.1.3, 7.

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Агрономический эффект зависит от почвы, продукта и дозы: метаанализ Jeffery и соавторов показал прибавку урожая в тропиках, прежде всего на кислых бедных почвах, и отсутствие среднего эффекта в умеренном климате. Заметный эффект обычно требует 20–60 т/га, и верхняя часть этого диапазона выходит за предел ЕС в 50 т/га; адресное внесение в зону корней снижает дозу примерно до 4 т/га[53]. Биочар может повышать влагоёмкость и удержание питательных веществ, но это нужно подтверждать на конкретном поле; Isometric исключает проекты, при которых урожайность устойчиво снижается[54].

Распределённый модуль Isometric требует отдавать местным участникам не менее 20% валовой выручки от единиц и получать их добровольное предварительное и осознанное согласие[55]. По 171 сделке до 2024 г. рост числа заявленных целей устойчивого развития на 1% повышал цену единицы на 0,14%, хотя эти заявления редко сертифицированы[56]. Возможный вред — загрязнение почв ПАУ и воздействие сырьевой цепочки на воду и землепользование, как в случае Aperam.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Наличие возможных нормативных ограничений в российском законодательстве

53 Jeffery S. et al. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields // Environmental Research Letters, 2017, 12: 053001; Weber K. et al. Current State of Biochar as a Carbon Dioxide Removal Solution: Status Report for Mission Innovation Countries and Beyond // Gassnova SF, 2026, с. 14.

54 Isometric. Biochar Storage in Soil Environments v1.3, разд. 1.1, 2.

55 Isometric. Biochar Production in Distributed and Small Scale Projects v1.1, разд. 3.

56 Jokubė M. et al. Biochar co-benefits are valued in the voluntary carbon market // Communications Sustainability, 2026, 1: 90.

В ноябре 2025 г. ТюмГУ сообщил о первом в России агроклиматическом проекте с биочаром на «Тюменском карбоновом полигоне». Полевые опыты заложены в Курганской области, где вносят берёзовый биочар из отходов фанерного производства[57].

Подтверждённый опыт ›

Ближе всего для России модель Exomad: в лесопилении и деревообработке образуются большие объёмы сухих концентрированных остатков с низкой зольностью, из которых получается биочар с более высоким содержанием углерода, чем из соломы или лузги (оценка редакции). В модели Isometric сохраняемая доля растёт с понижением температуры почвы: при H/Corg = 0,4 сохраняемая доля составит около 0,93 при температуре почвы 7 °C (минимальное значение, принимаемое модулем) и около 0,75 при 25 °C, то есть одна партия в холодной почве даст примерно на четверть больше единиц (расчёт редакции по формуле модуля). Это следствие допущений модели, а не измеренный в российских условиях результат[58]. Агрономическая прибавка в умеренном климате при этом не гарантирована.

Применимость зарубежного опыта ›

Нормативные условия ›

С 1 сентября 2026 г. действуют поправки к закону № 296-ФЗ, внесённые законом № 578-ФЗ: введены понятие высвобождения парниковых газов и обязательная внешняя оценка климатических проектов. Приказ Минэкономразвития № 361 требует законности проекта и результата сверх прогнозной оценки без проекта и сверх обязательных требований. С 1 марта 2027 г. исполнители проектов с риском высвобождения обязаны отслеживать сохранность результата[59]. По приказу Минэкономразвития № 364 методология климатического проекта утверждается как документ национальной стандартизации с опорой на ГОСТ Р ИСО 14064–2-2021[60]. Если сырьё относится к отходам I–IV классов опасности, работы с ним требуют лицензии по статье 9 закона № 89-ФЗ, а если биочар продаётся как агрохимикат, он подлежит государственной регистрации по закону № 109-ФЗ[61].

57 ТюмГУ. ТюмГУ запустил первый в России CDR-проект в агросекторе на основе биоугля, 28.11.2025.

58 Isometric. Biochar Storage in Soil Environments v1.3, разд. 5.1.2.2.1.

59 Федеральный закон от 29.12.2025 № 578-ФЗ «О внесении изменений в статью 7 Федерального закона «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации», ст. 4 (изменения в закон № 296-ФЗ, КонсультантПлюс); Приказ Минэкономразвития России от 05.05.2026 № 361 «Об утверждении критериев соответствия проектов климатическим проектам»; Постановление Правительства РФ от 01.09.2026 № 1121 (обзор документа).

60 Приказ Минэкономразвития России от 05.05.2026 № 364 «Об утверждении требований к методологиям климатических проектов, включая классификацию методологий климатических проектов».

61 Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», ст. 9; Федеральный закон от 19.07.1997 № 109-ФЗ «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами».

11. Выводы

Биочар сегодня — основной источник поставок долговременного CDR: около 76% поставленных тонн (1,37 млн т на 30 октября 2026 г.) и почти три четверти оценённого удаления новыми методами в 2025 г. (1,46 млн т CO_2, нижняя оценка) при цене около 136 долларов США за тонну, одной из самых низких. Но поставки составляют лишь 18% законтрактованного объёма, а два покупателя дают 57,5% договоров. Ограничения лежат за пределами реактора: сырьё, финансирование площадок, долгосрочная модель разложения и узкий круг покупателей. Единицы разных систем нужно сравнивать не только по цене, но и по сроку хранения (100–1000 лет), порогу H/Corg и допустимым способам применения. Для России разумно начинать с остатков лесопиления и деревообработки: они сухие, малозольные и дают биочар с высоким содержанием углерода.

09



Минерализация углерода

CARBON / IN-SITU MINERALIZATION

ПРОЕКТ CDR АЛРОСА. «УВЕЛИЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА МИРНИНСКО-НЮРБИНСКОМ ГОК ГРУППЫ АЛРОСА



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Проект АЛРОСА увеличивает поглощение атмосферного CO_2 хвостами обогащения кимберлитовой руды трубки «Интернациональная» на хвостохранилище обогатительной фабрики № 3 (ОФ № 3) Мирнинско-Нюрбинского ГОКа (МНГОК), Республика Саха (Якутия). Исследования, которые компания провела вместе с геологическим факультетом МГУ имени М. В. Ломоносова, показали, что естественную карбонизацию кимберлита подавляет примесь песков россыпных месторождений. В сентябре 2025 г. АЛРОСА перешла на раздельное складирование хвостов коренных и россыпных месторождений и тем самым запустила минерализацию в хвостохранилище. Действующих аналогов проекта в отечественной практике нет.

По типу проект относится к категории CDR «минерализация углерода» (carbon mineralization), а внутри неё — к минерализации извлечённого минерального сырья в открытой системе (open-system ex-situ mineralization, OSEM). Для таких процессов используют также термин «поверхностная минерализация» (surficial mineralization). Для этой категории Isometric разработал отдельный протокол, который распространяется на хвосты горного производства[1].

Кимберлит — ультраосновная порода, богатая силикатами магния и кальция. При контакте с водой и воздухом эти минералы высвобождают кальций и магний, которые связывают растворённый в атмосфере CO_2 в нерастворимые карбонаты. Проект отвечает трём ключевым критериям CDR: связывается углерод атмосферного происхождения, он хранится в устойчивых минералах, а к учёту принимается только поглощение сверх базовой линии.

Научная основа. Решение о научно-исследовательской работе компания приняла в декабре 2021 г. В 2022–2023 гг. геологический факультет МГУ совместно с Центром инноваций и технологий АЛРОСА изучил руду коренных месторождений Группы и хвосты Удачнинского, Айхальского, Ломоносовского ГОКов и МНГОК[2]. Цель работы — модель поглощения CO_2 хвостохранилищами и коэффициенты поглощения для каждой площадки.

1 Isometric. Open System Ex-situ Mineralization Protocol v1.1, разд. 1 и 6.

2 Масанов А. Ю., Дубовичев М. А., Толстов А. В. и др. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита // Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008. Масанов А. Ю., Бычков А. Ю., Горячкина Д. Ю. Прямое поглощение углекислого газа из атмосферы кимберлитовыми породами при разработке коренных алмазных месторождений Якутии и Архангельской области и его вклад в достижение углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса Группы АЛРОСА // Рациональное освоение недр. 2025. № 1. С. 56–73. doi: 10.26121/2219-5963-81-1-56-73.

Исследование прошло три этапа:

① Термодинамическое моделирование системы «кимберлит — вода — воздух» в программном комплексе HCh (кафедра геохимии МГУ) подтвердило протекание реакций карбонизации и дало максимальный потенциал поглощения.

② Эксперименты по двум оригинальным методикам: кимберлит в смеси с жидкостью взаимодействует с воздухом. Все образцы, включая отработанную руду, поглощали CO_2.

③ Полевые измерения. В хвостах Удачнинского, Айхальского и Ломоносовского ГОКов содержание карбонатного углерода растёт с возрастом хвостов, а концентрация CO_2 в поровом воздухе ниже атмосферной. Атмосферное происхождение связанного углерода подтвердил изотопный анализ. В хвостах МНГОК накопления карбонатов не обнаружили, и это стало отправной точкой проекта.

В 2025 г. МГУ проверил гипотезу о роли песков на руде трубки «Интернациональная» и донных отложениях хвостохранилища ОФ № 3 [3]. Максимальный потенциал поглощения составил 21–25 г CO_2 на 100 г породы, то есть 210–250 кг CO_2 на тонну. Чистый кимберлит поглощал больше всего, добавление песка снижало поглощение, а смеси с 20 и 50 % песка не поглощали CO_2. Донные отложения дали ту же картину. Причина — плёнки минералов железа, которые песок образует на поверхности зёрен кимберлита.

Производственная схема. При совместном складировании частицы песка образуют на зёрнах кимберлита плёнки минералов железа, которые почти изолируют минералы кимберлита от воды и CO_2. При раздельном складировании поверхность кимберлита остаётся открытой: кальций и магний свободно переходят в раствор и связывают CO_2 в карбонаты. Поэтому, по расчётам проекта, поглощение в проектном сценарии примерно в 38 раз выше, чем по базовой линии (347 678 т против 9 106 т CO_2 за зачётный период).

Хвосты коренных и россыпных месторождений подаются в магистральный, а затем в распределительный пульпопровод не смешанно, а очередями: по тому же пульпопроводу поочерёдно идут партии хвостов одного типа, затем другого. Через торцевые сбросы хвосты каждого типа распределяются по своей зоне пляжа хвостохранилища (пляж — намытая поверхность хвостов выше уреза воды). Границы зон и порядок размещения хвостов закреплены в технологической карте предприятия и уточняются по данным маркшейдерской съёмки.

При температуре воздуха ниже −5 °C хвосты укладываются под лёд, в майну. Незамерзающие майны поддерживает барботаж — перемешивание водной толщи пузырьками воздуха. Пузырьки воздуха предотвращают сплошной ледостав в зонах сброса и усиливают массообмен между атмосферой и водой. Хвосты под водой не промерзают, поэтому карбонизация идёт круглый год.

3 Масанов А. Ю., Бычков А. Ю., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Габрашитова А. В. Ускоренное выветривание хвостов переработки руды трубки «Интернациональная» как основа для реализации климатического проекта CDR-типа на Мирнинско-Нюрбинском ГОКе // Экология и промышленность России. 2026. Т. 30. № 8. С. 11–17. doi: 10.18412/1816-0395-2026-8-11-17.

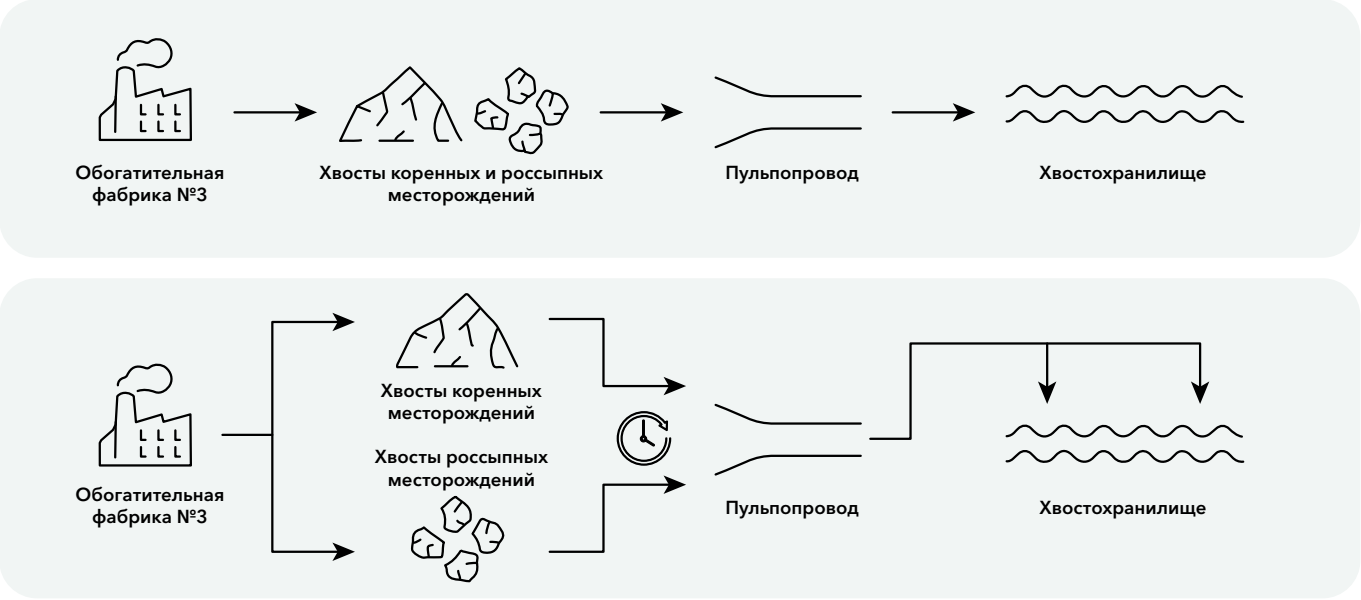


Рисунок 1. Совместное (базовая линия, вверху) и раздельное (проектный сценарий, внизу) складирование хвостов. Источник: АЛРОСА.

Продолжительность хранения (durability)

› Углерод, связанный в карбонатах (кальцит, доломит, магнезит), хранится в геологических масштабах времени. Протокол Isometric для этой категории проектов задаёт горизонт хранения более 1 000 лет[4]. Обратное высвобождение CO_2 возможно только при термическом разложении карбонатов выше 750 °C. Высокотемпературная переработка хвостов исключена правовым режимом обращения с ними, поэтому риск обратного высвобождения низкий. Зачётный период проекта (15 лет) – это срок учёта поглощения, а не срок хранения углерода.
На основе опыта проекта сейчас разрабатывается национальный стандарт ГОСТ Р «Методология климатического проекта по интенсификации минеральной карбонизации горных пород» для проектов международного сотрудничества. На ноябрь 2026 г. его первая редакция находится на стадии обсуждения. Проект ГОСТ Р относит проекты минеральной карбонизации к проектам без риска высвобождения ПГ при выполнении четырёх условий: исключена высокотемпературная переработка карбонизированной породы; исключено кислотное разложение карбонатов (нет сульфидов в количестве, достаточном для кислотного дренажа, или порода обладает достаточной щелочностью); pH водной фазы не ниже 6; обеспечена физическая сохранность объекта размещения, в том числе после его закрытия. Выполнение этих условий подтверждается мониторингом.

4 Isometric. Open System Ex-situ Mineralization Protocol v1.1, разд. 1 и 6.

Технологическая готовность и масштабируемость

› Решение внедрено в промышленном масштабе на действующем предприятии. Первая версия проекта для национального рынка прошла валидацию в июне 2026 г. и зарегистрирована в Российском реестре углеродных единиц[5]. На данный момент идёт стадия обсуждения первой редакции ГОСТ Р для проектов международного сотрудничества с целью его последующего утверждения и перевалидации климатического проекта по новой методологии. Методология ГОСТ Р учитывает критерии приемлемости единиц CORSIA и стандарты механизма статьи 6.4 Парижского соглашения. Способность кимберлитовых хвостов поглощать CO_2 подтверждена на всех изученных ГОКах. На других площадках, где карбонизация уже идёт, её ограничивают иные факторы, поэтому АЛРОСА прорабатывает другие способы интенсификации: рыхление поверхности пляжей и донных отложений, орошение сухих хвостов, изменение соотношения кальция и магния. Сам принцип проекта – устранить фактор, подавляющий реакцию, – применим к другим горнодобывающим предприятиям со щелочными хвостами.
Проект ГОСТ Р расширяет область применения подхода на все горнодобывающие предприятия, где размещаются основные и ультраосновные породы, включая добычу железных и цветных руд, на существующих и новых объектах. Помимо раздельного складирования, он предусматривает физико-механическую активацию (дробление, сортировка, рыхление), химическую активацию реагентами и управление влажностью и газообменом.

2. Экономика CDR-проектов АЛРОСА

Экономическое преимущество проекта в том, что он использует уже добытые и измельчённые хвосты в месте их образования. Для CDR не нужна отдельная добыча, дробление или транспортировка породы. Не нужны и улавливание, концентрирование и закачка CO_2: атмосферный углекислый газ связывается пассивно.

5 Российский реестр углеродных единиц. Карточка проекта.

Проект не увеличивает потребление топлива, электрической и тепловой энергии, поэтому не создаёт ни энергетических затрат, ни связанных с ними выбросов. Раздельное складирование внедрено на действующей системе гидротранспорта хвостов. Основные затраты проекта — это научные исследования, расширенная программа мониторинга и дополнительные инженерные изыскания на хвостохранилище.

Проект не приносит иной финансовой выгоды, кроме дохода от продажи углеродных единиц. Именно это лежит в основе его дополнительности: без углеродных единиц компании выгоднее сохранить совместное складирование. Доход от единиц АЛРОСА планирует направлять на развитие аналогичных проектов внутри компании.

3. Рыночная ситуация

На международном рынке спрос на долговременное удаление CO_2 через минерализацию горнопромышленных материалов уже подтверждён крупными покупателями. 30 октября 2025 г. Isometric сообщила о договоре компании Arca с Microsoft на поставку почти 300 тыс. т долговременного удаления CO_2 за десять лет[6]. Arca выступает поставщиком, Microsoft — покупателем, Isometric — системой сертификации и реестром. Сделки такого типа заключаются на будущие поставки, то есть покупатели готовы финансировать проекты этой категории заранее.

Углеродные единицы проекта АЛРОСА будут выпускаться в Российском реестре углеродных единиц по результатам мониторинга и верификации отчёта о ходе реализации проекта и смогут обращаться на внутреннем рынке. Потенциал выхода на международный рынок связан с двумя факторами: аккредитацией российской программы по парниковым газам в CORSIA и одобрением соответствующей методологии ГОСТ-Р CORSIA. Для российского рынка это новая категория — единицы удаления CO_2 через минерализацию. От единиц природных проектов и проектов по сокращению выбросов их отличает долговременное минеральное хранение углерода.

6 Isometric. Arca selects Isometric as the registry for Microsoft offtake agreement, 30.10.2025.

4. Преимущества климатического проекта АЛРОСА

Главное преимущество проекта в том, что удаление CO_2 встроено в действующий производственный процесс и достигается изменением схемы обращения с уже образующимися хвостами.

① **Долговременное хранение.** Углерод связывается в устойчивых карбонатах, одной из самых долговечных форм хранения CO_2.

② **Нет связанных с проектом выбросов.** Проект не увеличивает потребление топлива и энергии, поэтому всё дополнительное поглощение идёт в чистый результат.

③ **Не нужны дополнительная добыча сырья и технологическое улавливание CO_2.** Используются уже измельчённые хвосты, а атмосферный CO_2 связывается пассивно.

④ **Научная доказательная база.** Механизм подтверждён моделированием, экспериментами и полевыми данными с четырёх ГОКов, результаты опубликованы в рецензируемых журналах[7].

⑤ **Круглогодичная работа в арктическом климате.** Подлёдное размещение и барботаж позволяют карбонизации продолжаться зимой.

⑥ **Простота тиражирования.** Решение не требует уникального оборудования и может быть адаптировано для других предприятий со щелочными хвостами.

7 Масанов А. Ю., Дубовичев М. А., Толстов А. В. и др. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита // Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008. Масанов А. Ю., Бычков А. Ю., Горячкина Д. Ю. Прямое поглощение углекислого газа из атмосферы кимберлитовыми породами при разработке коренных алмазных месторождений Якутии и Архангельской области и его вклад в достижение углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса Группы АЛРОСА // Рациональное освоение недр. 2025. № 1. С. 56–73. doi: 10.26121/2219-5963-81-1-56-73. Масанов А. Ю., Бычков А. Ю., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Габрашитова А. В. Ускоренное выветривание хвостов переработки руды трубки «Интернациональная» как основа для реализации климатического проекта CDR-типа на Мирнинско-Нюрбинском ГОКе // Экология и промышленность России. 2026. Т. 30. № 8. С. 11–17. doi: 10.18412/1816-0395-2026-8-11-17.

5. Вызовы и ограничения

Ключевой вызов для всех проектов поверхностной минерализации — перенос лабораторных результатов на неоднородное хвостохранилище. Скорость реакций зависит от минерального состава, крупности частиц, температуры, доступности воды и атмосферного CO_2[8]. В проекте АЛРОСА этот вызов учтён заранее: в расчёт введён понижающий коэффициент лабораторной модели. Он учитывает неоднородность среды, воздухообмен и потоки углерода в толще донных отложений.

Для МНГОК существенны три особенности:

① **Сезонный ледовый режим.** Зимой газообмен с атмосферой ограничен. Барботаж поддерживает незамерзающие майны и насыщение воды CO_2, а его вклад в поглощение будет подтверждаться мониторингом.

② **Сохранение раздельных зон.** Зоны складирования закреплены технологической картой, а на МНГОК назначен ответственный за учёт и проверку данных по раздельному складированию.

③ **Инженерная безопасность сооружения.** Хвосты коренных и россыпных месторождений различаются по гранулометрическому составу и фильтрационным свойствам. Поэтому расширен объём ежегодных инженерных изысканий на хвостохранилище, относящемся к гидротехническим сооружениям I класса.

Основной климатический риск в том, что фактическое поглощение окажется ниже прогнозного. Вероятность этого риска оценена как низкая: на подготовительном этапе несколько независимых методов дали согласующиеся результаты, а прогноз построен на консервативных допущениях. Углеродные единицы выпускаются только по фактическим результатам мониторинга.

6. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Поглощение рассчитывается помесячно как произведение массы размещённых хвостов переработки руды на коэффициент поглощения, зависящий от возраста хвостов,

8 Kelemen P. et al. An Overview of the Status and Challenges of CO2 Storage in Minerals and Geological Formations // Frontiers in Climate. 2019. 1:9. doi: 10.3389/fclim.2019.00009.

и на понижающий коэффициент. Расчёт ведётся отдельно для базовой линии и проектного сценария; разница между ними с вычетом неопределённости определяет число углеродных единиц.

Масса добытых и переработанных горных пород, размещенных на объекте складирования. Персонал МНГОК ежедневно учитывает переработанный кимберлит в MES-системе. Ежемесячно данные сверяются с маркшейдерской съёмкой спутниковыми GNSS-приёмниками и корректируются при расхождении более 2 %. Учёт ведётся по каждой точке сброса и типу сырья.

Коэффициенты поглощения. Их определяет геологический факультет МГУ на двух лабораторных моделях: «кимберлит — вода хвостохранилища — атмосфера» (проектный сценарий) и «кимберлит — песок россыпей — вода хвостохранилища — атмосфера» (базовая линия). В установках воспроизводятся состав воды, фракция хвостов, температура и режим газообмена. Пробы отбираются не реже четырёх раз в год, содержание карбонатов определяется поверенным карбонатометром по аттестованным методикам.

Качественный контроль на площадке. Дважды в год, после схода льда и перед морозами, контролируется состав воды хвостохранилища. Рост pH и устойчивый рост отношения Mg/Ca подтверждают, что карбонизация кимберлита идёт в натурных условиях. Вместе с лабораторными моделями это даёт и количественную оценку, и подтверждение процесса на объекте. Натурные пробы отбирались на этапе исследований: в 2022–2023 гг. — переработанный кимберлит разного возраста на четырёх ГОКах (карбонатный углерод, CO_2 в поровом воздухе, изотопный анализ), в 2025 г. — донные отложения хвостохранилища ОФ № 3. Эти данные подтвердили механизм, на котором построены лабораторные модели. Отбор и анализ проб ведутся по утверждённому техническому заданию с фиксированной периодичностью, а их результаты хранятся в электронном виде в течение всего срока реализации проекта и двух лет после его завершения.

Базовая линия. Она не принята нулевой: в неё включено осаждение доломита на частицах песка из пересыщенной воды хвостохранилища. Этот процесс вычтен из результата проекта, хотя поглощения CO_2 из атмосферы при нём практически не происходит.

Консервативность оценки заложена в нескольких параметрах:

— для прогноза взят коэффициент для смеси кимберлита с 5 % песка — 0,20 г CO_2/(100 г · √сут), тогда как для чистого кимберлита в среднем получено 0,30;
— учитываются только хвосты не старше пяти лет, хотя исследования показывают поглощение в течение 20–30 лет;
— применяется понижающий коэффициент лабораторной модели; его значение будет определено до первого отчёта о ходе реализации проекта;
— итог уменьшается на неопределённость 10,2 % (95 %-ный доверительный интервал, подход МГЭИК 2006 «распространение ошибок»).

Утечки, обратное высвобождение и двойной учёт. Хвосты не имеют альтернативного применения, их единственный способ утилизации — складирование в хвостохранилище. Поэтому проект не вытесняет другие виды использования и не создаёт утечек. Риск обратного высвобождения исключен. Двойной учёт исключён: поглощение не учитывается в других системах.

7. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Проект превращает отходы обогащения в инструмент удаления CO_2, не создавая дополнительной нагрузки на окружающую среду. Хвосты относятся к V классу опасности (неопасные отходы). Раздельное складирование не увеличивает мощность и площадь объекта, не затрагивает естественные экосистемы и гидрологический режим прилегающих территорий.

Важная сопутствующая выгода — научная. Сотрудничество АЛРОСА и МГУ дало новые данные о карбонизации кимберлитов в условиях криолитозоны, опубликованные в рецензируемых журналах[9]. Регулярный мониторинг состава воды и хвостов также даёт предприятию более подробную информацию для эксплуатационного контроля хвостового хозяйства.

8. Российский опыт и потенциал реализации

Наличие возможных нормативных ограничений в российском законодательстве

Проект на МНГОК — первый в России климатический проект CDR-типа на основе минерализации углерода на действующем горно-обогатительном производстве. Он реализуется в соответствии с Федеральным законом от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбро-

9 Масанов А. Ю., Дубовичев М. А., Толстов А. В. и др. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита // Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008. Масанов А. Ю., Бычков А. Ю., Горячкина Д. Ю. Прямое поглощение углекислого газа из атмосферы кимберлитовыми породами при разработке коренных алмазных месторождений Якутии и Архангельской области и его вклад в достижение углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса Группы АЛРОСА // Рациональное освоение недр. 2025. № 1. С. 56–73. doi: 10.26121/2219-5963-81-1-56-73. Масанов А. Ю., Бычков А. Ю., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Габрашитова А. В. Ускоренное выветривание хвостов переработки руды трубки «Интернациональная» как основа для реализации климатического проекта CDR-типа на Мирнинско-Нюрбинском ГОКе // Экология и промышленность России. 2026. Т. 30. № 8. С. 11–17. doi: 10.18412/1816-0395-2026-8-11-17.

сов парниковых газов»; соответствие критериям климатического проекта было подтверждено по действовавшему на момент регистрации Приказу Минэкономразвития № 248 (впоследствии заменён Приказом от 05.05.2026 № 361).

Нормативных ограничений не выявлено: хвостохранилище эксплуатируется по разрешению Ростехнадзора, раздельное складирование выполняется сверх обязательных требований, а оценка воздействия на окружающую среду и консультации с заинтересованными сторонами не требуются, поскольку меняется только порядок складирования неопасных отходов V класса.

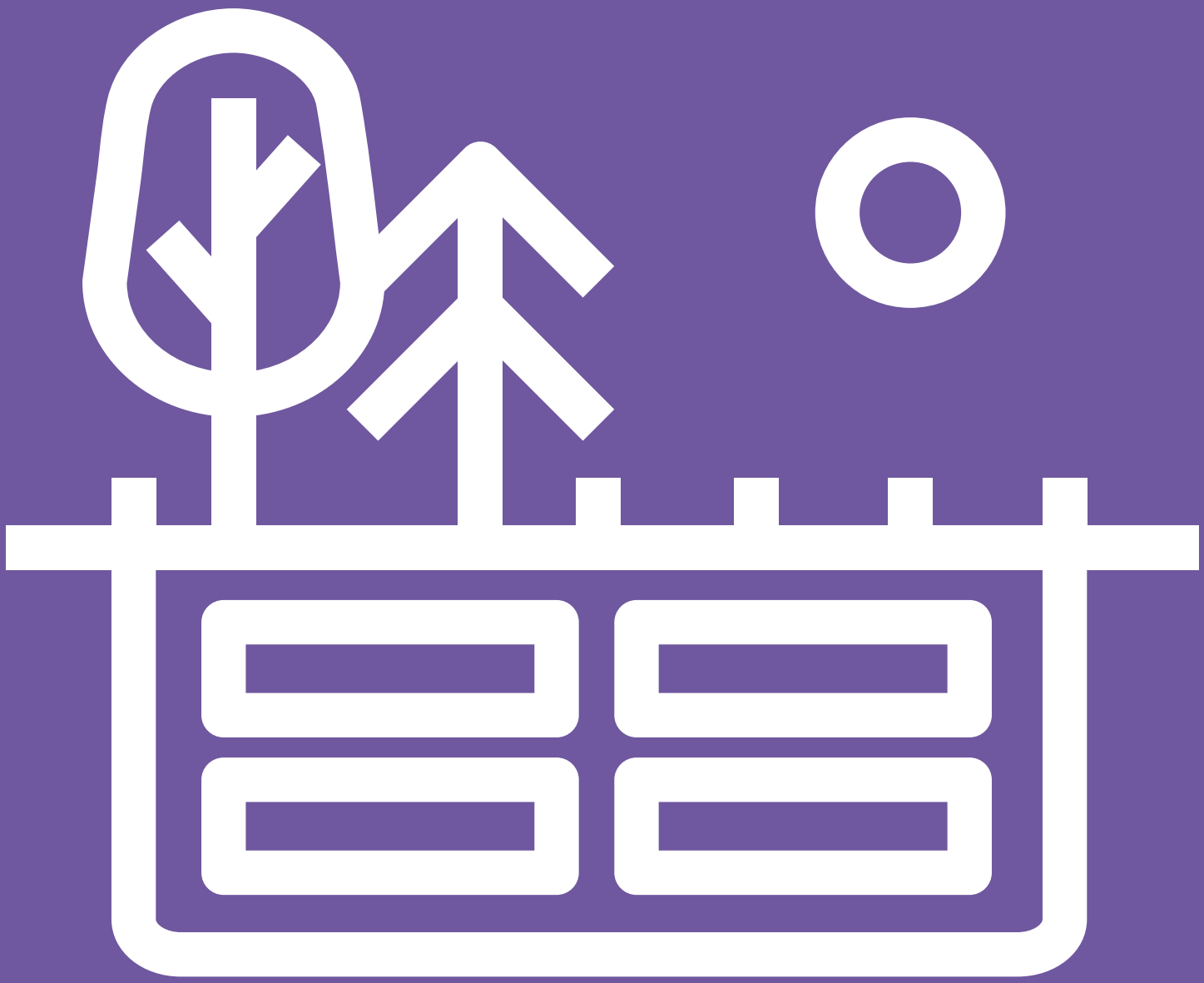
Российское законодательство о климатических проектах (296-ФЗ и приказы Минэкономразвития) не выделяет CDR-проекты в отдельную категорию: они реализуются как климатические проекты по увеличению поглощения парниковых газов. На момент регистрации проект МНГОК соответствовал всем действовавшим требованиям. После вступления в силу приказов Минэкономразвития от 05.05.2026 № 361 и № 364 проект планируется перевалидировать в соответствии с новыми требованиями — по ГОСТ Р, который разрабатывается как методология международного сотрудничества.

9.

Выводы

Проект АЛРОСА показывает, как научно обоснованное изменение схемы складирования хвостов превращает хвостохранилище в объект долговременного удаления атмосферного CO_2. Компания вместе с МГУ нашла способ увеличить поглощение CO_2 хвостами, внедрила решение в производство и зарегистрировала проект в российском реестре. За 15 лет проект должен принести 304 тыс. т CO_2 дополнительного поглощения, причём оценка построена на консервативных допущениях, а единицы выпускаются по результатам мониторинга.

Подводное и подлёдное размещение хвостов в арктическом климате пока не охвачено международными протоколами. Поэтому данные мониторинга МНГОК будут ценны и для развития методологий минерализации в мире, и для тиражирования подхода на других горнодобывающих предприятиях России.



Хранение углерода биомассы

ПРЯМОЕ ХРАНЕНИЕ БИОМАССЫ
BIOMASS DIRECT STORAGE

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ХРАНЕНИЕ БИОМАССЫ И БИО-МАСЛА
BIOMASS GEOLOGICAL STORAGE



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Хранение биомассы позволяет надолго сохранить углерод, который растения уже извлекли из атмосферы при фотосинтезе. Без проекта этот углерод вернулся бы в атмосферу при разложении или сжигании остатков. Удаление CO_2 из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR) возникает в той мере, в какой дополнительное сохранение углерода превышает выбросы проекта — при сборе, перевозке, сушке или переработке сырья и обслуживании хранилища. Сырьём служат остатки лесного и сельского хозяйства и деревообработки, а для закачки в недра — также осадки сточных вод, навоз и другие влажные органические отходы[1].

Вариант А: прямое хранение биомассы (Terrestrial Storage of Biomass; Biomass Burial; Biomass Direct Storage). Древесные остатки, в том числе древесину, погибшую при лесных пожарах, рисовую шелуху, опилки и кору высушивают, при необходимости прессуют и размещают в инженерных хранилищах — наземных камерах или неглубоких подземных ячейках с изолирующими покрытиями. Покрытия ограничивают доступ воды и кислорода и тем самым замедляют разложение. Протокол Isometric распространяется на размещение на глубине не более 100 м.[2]

Вариант Б: геологическое хранение биомассы и био-масла (Biomass Geological Storage; Bio-oil Geological Storage). Биомассу измельчают и смешивают с водой, получая пульпу (slurry), либо перерабатывают быстрым пиролизом или гидротермальным ожижением в жидкое био-масло (bio-oil). Затем вещество закачивают через скважины в соляные каверны, нефтегазовые пласты или водоносные горизонты. Протокол Isometric для пульпы допускает только объекты в США со скважинами классов I или V по федеральной программе контроля подземной закачки (Underground Injection Control, UIC)[3].

Границы вариантов в обзорах проводятся по-разному. The State of CDR относит закачку органических отходов компанией Vaulted Deep к захоронению биомассы (biomass burial), RMI включает её в более широкую категорию прямого хранения (Biomass Direct Storage), а платформа CDR.fyi объединяет пульпу и био-масло в категорию Biomass Geological

1 Isometric. Biomass Geological Storage, 2026, разд. «Applicability».

2 Isometric. Subsurface Biomass Carbon Removal and Storage, 2026, разд. 1; RMI. The New Frontiers Report for CDR, 2026, с. 35.

3 Isometric. Biomass Geological Storage, 2026, разд. «Applicability».

Sequestration[4]. В главе варианты разграничены, как в протоколах Isometric, по способу размещения, поэтому показатели разных обзоров напрямую не сопоставимы.

Продолжительность хранения (durability)

› **Вариант А.** Методология Puro.earth предусматривает сохранение углерода не менее 100 лет, протокол Isometric — более 1000 лет, если расчёт подтверждён испытаниями и оценкой скорости потерь.[5] Для этого нужно доказать, что сухость и изоляция сохранятся при повреждениях, пожарах и затоплении.
Вариант Б. Isometric предусматривает расчётное хранение более 1000 лет, разработчик Vaulted Deep заявляет более 10 000 лет.[6] Срок обосновывают тем, что малопроницаемые породы удерживают жидкость и образующийся биогаз, а био-масло в пласте при 35–60 °C за 2–15 лет густеет и затем затвердевает. До этого риск его миграции сохраняется.[7]

Технологическая готовность и масштабируемость

› Оценки уровня технологической готовности (Technology Readiness Level, TRL) расходятся из-за разных границ категорий. The State of CDR приводит для захоронения биомассы TRL 4–6, для хранения био-масла — TRL 5. Закачку пульпы обзор характеризует как давно применяемую при утилизации отходов нефтегазовой отрасли, но отдельной оценки TRL не даёт.[8] RMI, используя подход Министерства энергетики США, оценивает прямое хранение биомассы вместе с закачкой пульпы в TRL 7–8, а био-масло — в TRL 6–7.[9] Более высокая оценка RMI отражает включение в категорию действующих проектов Vaulted Deep. Высокий TRL не доказывает долговечности: объекты работают несколько лет при заявленных сроках хранения в сотни и тысячи лет.

Масштаб применения пока невелик. По оценке The State of CDR, в 2025 г. захоронение биомассы обеспечило около 0,05 млн т удаления CO_2 — в 21 раз больше, чем в 2023 г., в основном за счёт Vaulted Deep и Graphyte, хранение био-масла — около 0,006 млн т.[10] Прямое хранение наращивают строительством новых ячеек, но каждая площадка требует подходящих грунтов, разрешений и обслуживания на десятилетия; для варианта Б ограничением служит доступ к разрешённым скважинам и пригодным пластам.

4 The State of CDR. The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, гл. 7, с. 171; RMI. The New Frontiers Report for CDR, 2026, с. 36; CDR.fyi. Order Insights, данные на 29.10.2026.

5 Puro.earth. Terrestrial Storage of Biomass, Edition 2023 v.1, 2023, разд. 1, 4–7; Isometric. New protocol for Subsurface Biomass Carbon Removal and Storage, 2024.

6 Isometric Registry. Great Plains Organic Waste Sequestration, 2026.

7 Isometric. Biomass or Bio-oil Storage in Permeable Reservoirs, 2026.

8 The State of CDR. The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, гл. 10, с. 240–241.

9 RMI. The New Frontiers Report for CDR, 2026, с. 36, 48.

10 The State of CDR. The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, гл. 7, с. 171.

Таблица 1. Сопоставление вариантов хранения углерода биомассы

Параметр	Вариант А	Вариант Б
Сырьё и подготовка	Древесные и растительные остатки; сушка, прессование, изоляция	Влажные отходы и остатки в виде пульпы; био-масло после пиролиза или гидротермального ожижения
Тип хранилища	Наземные камеры и подземные ячейки глубиной до 100 м	Соляные каверны, пласты и водоносные горизонты, закачка через скважины
TRL	4–6 (The State of CDR); 7–8 для категории RMI, включающей закачку пульпы	Био-масло: 5 (The State of CDR), 6–7 (RMI); для пульпы отдельной оценки нет

2. Экономика CDR-проектов

Вариант А. Затраты определяются прежде всего местом размещения объекта: близость к сырью сокращает перевозки, а влажность биомассы — затраты на сушку; выбросы этих операций вычитаются из результата проекта. Капитальные затраты (capital expenditures, CAPEX) включают подготовку площадки, оборудование для сушки и прессования, строительство ячеек с изолирующими покрытиями. Эксплуатационные затраты (operating expenditures, OPEX) включают сбор и перевозку сырья, сушку, упаковку, обслуживание хранилища и мониторинг. На первых объектах отходы часто достаются бесплатно, поэтому главными статьями затрат становятся перевозка и долгосрочное содержание хранилища. The State of CDR приводит литературные оценки затрат при масштабировании порядка 10–200 долларов США/т CO_2 без учёта затрат на мониторинг, отчётность и верификацию (monitoring, reporting and verification, MRV); в условном примере RMI текущие затраты составляют 95–170 долларов США/т, а за счёт масштаба, логистики и автоматизации могут снизиться до 55–110 долларов США/т.[11] Graphyte сообщала о себестоимости ниже 100 долларов США/т при цене продажи около 150 долларов США/т; это сведения разработчика без независимой проверки.[12]

11 The State of CDR. The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, гл. 10, с. 240–241; RMI. The New Frontiers Report for CDR, 2026, с. 37.

12 Graphyte. CCP label emerges as credibility test in maturing carbon removal market, 2025.

Вариант Б. Капитальные затраты включают изучение геологии, скважины, ёмкости и насосы, для био-масла — пиролизные установки; эксплуатационные — подготовку и перевозку сырья, закачку и контроль скважин. Пульпа не требует пиролиза, но вода увеличивает объём перевозок. Для закачки пульпы The State of CDR приводит оценки ниже 100 долларов США/т CO_2; для био-масла — модельную оценку 100–200 долларов США/т для сети небольших децентрализованных установок и около 550 долларов США/т по данным, которые компания-поставщик представила Frontier в 2024 г.[13] RMI оценивает текущие затраты условного проекта био-масла в 350–620 долларов США/т, а в перспективе — в 60–160 долларов США/т; основные статьи — пиролизное оборудование, подготовка и перевозка биомассы.[14] Сопоставимых фактических данных о полной себестоимости обоих способов закачки пока нет.

3. Рыночная ситуация

Углеродные единицы, подтверждающие удаление CO_2 из атмосферы (carbon removal credits), в обоих вариантах покупают в основном технологические и финансовые, а также авиастроительные, страховые и консалтинговые компании для компенсации остаточных выбросов. Через Frontier — механизм совместных закупок от имени группы компаний — в варианте Б были заключены первые крупные договоры. Крупные договоры на будущие поставки (offtake agreements) обеспечивают разработчикам спрос на годы вперёд.

Наиболее полную открытую статистику ведёт аналитическая платформа CDR.fyi, собирающая сведения о раскрытых сделках. Её данные неполны, могут пересматриваться и не являются официальной статистикой; один из сооснователей платформы работает в Charm Industrial.[15] По данным CDR.fyi на октябрь 2026 г., по всем методам долговременного удаления законтрактовано 50,6 млн т CO_2, поставлено 1,7 млн т, учтено 11 542 транзакции.[16]

Таблица 2. Рыночные показатели вариантов по данным CDR.fyi на октябрь 2026 г.[17]

Показатель	Вариант А (Biomass Direct Storage)	Вариант Б (Biomass Geological Sequestration)
Законтрактовано, т CO_2	208 012	5 839 123

13 The State of CDR. The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition, 2026, гл. 10, с. 240–241.

14 RMI. The New Frontiers Report for CDR, 2026, с. 49.

15 CDR.fyi. This Week in CDR — Week 17, 2025, 2025.

16 CDR.fyi. Order Insights, данные на 29.10.2026.

17 CDR.fyi. Order Insights, категории Biomass Direct Storage и Biomass Geological Sequestration, данные на 29.10.2026; доли рассчитаны по данным платформы.

Показатель	Вариант А (Biomass Direct Storage)	Вариант Б (Biomass Geological Sequestration)
Поставлено, т CO_2	35 316	85 050
Поставлено от законтрактованного	17%	1,5%
Доля в законтрактованном объёме CDR	0,4%	11,5%
Крупнейшие покупатели, т	JPMorgan Chase – 61 тыс.; Microsoft – 44 тыс.; Zurich Insurance Group – 16 тыс.	Microsoft – 4,9 млн; Frontier – 389 тыс.; Google – 219 тыс.
Крупнейшие поставщики, т	Graphyte – 115 тыс.; Carba – 45 тыс.; InterEarth – 30 тыс.	Vaulted Deep – 5,2 млн; Charm Industrial – 533 тыс.; NULIFE GreenTech – 124 тыс.

Разница в доле поставок объясняется структурой договоров. В варианте Б около 84% законтрактованного объёма приходится на соглашение Microsoft с Vaulted Deep о поставке до 4,9 млн т в течение 12 лет, до 2038 г.[18] Поставки по нему только начинаются, тогда как в варианте А преобладают небольшие договоры на несколько лет.

Цены сделок в основном не раскрываются. Опрос OPIS и CDR.fyi 2026 г. объединяет оба варианта в группу Other Biomass: цена, необходимая поставщикам для разумной прибыли, превышает готовность покупателей платить примерно на 250 долларов США/т. По сравнению с опросом 2025 г. ожидания поставщиков выросли на 93% для прямого хранения и на 110% для геологического; авторы связывают это отчасти с малой выборкой.[19] Это ожидания участников рынка, а не цены сделок.

Вариант А. В апреле 2026 г. JPMorgan Chase заключил с Graphyte договор на 60 тыс. т на десять лет; поставки предусмотрены с действующего проекта Loblolly и с проекта Ponderosa в Аризоне, ввод которого компания планирует в 2027 г. Цена не раскрыта.[20] Microsoft в 2025 г. законтрактовал у Carba 44 тыс. т с поставками в течение пяти лет.[21] Единственная раскрытая цена — предоплата Frontier в ноябре 2025 г.: 250 тыс. долларов США за 450 т, около 556 долларов США/т; эти тонны уже поставлены.[22] Цена предоплаты не характеризует рыночный уровень.

18 Isometric. Vaulted Deep selects Isometric for Microsoft offtake agreement, 2025.

19 CDR.fyi, OPIS. Pricing, Attributes, and Blockers: Durable CDR Market Dynamics 2026–2030, 2026, с. 8–9.

20 Graphyte. Graphyte Announces 60,000 Ton Carbon Removal Agreement with JPMorganChase, 2026; Graphyte. JPMorganChase commits to 60,000-metric-ton CO_2 removal agreement with Graphyte, 2026.

21 CDR.fyi. This Week in CDR — Week 17, 2025, 2025.

22 Graphyte. Graphyte Enters into Carbon Removal Prepurchase Agreement with Frontier, 2025; Frontier. Our portfolio, 2026.

Вариант Б. Через Frontier в 2024 г. заключены договоры с Vaulted Deep на 152 480 т за 58,3 млн долларов США (около 382 долларов США/т) с поставками в 2024–2027 гг., в 2023 г. — с Charm Industrial на 112 003 т за 52,9 млн долларов США (в среднем около 472 долларов США/т) с поставками в 2024–2030 гг. Цены включают затраты на MRV; по договору с Charm цена за тонну снижается не менее чем на 37% к 2030 г., а поставкам предшествует выполнение контрольных этапов.[23] К октябрю 2026 г. Vaulted Deep поставил покупателям Frontier 60 251 т из 154 146 т с учётом предоплаты 2023 г., Charm Industrial — около 234 т из 112 003 т, хотя всего выпустил около 12 тыс. единиц для разных покупателей.[24] В июне 2026 г. JPMorgan Chase заключил с Charm договор на 61 500 т и отдельно предоставил долговой кредит 20 млн долларов США на расширение производства в Колорадо, выступив одновременно покупателем и кредитором.[25]

4. Обзор ключевых проектов

Данные о проектах приведены по состоянию на октябрь 2026 г.

Девелопер: Graphyte
Проект: Loblolly.

Пайн-Блафф, штат Арканзас, США; вариант А.

Graphyte сушит и прессует рисовую шелуху, опилки и кору местных фермеров и лесопильных предприятий, запечатывает блоки в водонепроницаемую оболочку и размещает их в облицованных ячейках на бывшем гравийном карьере площадью около 28 га; разрешение на хранение выдал природоохранный орган штата в июле 2024 г., заполненные ячейки закрывают и рекультивируют.[26] Объект работает с апреля 2024 г. В реестре Isometric выпущено 27 587 единиц, включая 5% в буферном резерве, погашено 13 237.[27] Сведения компании о мощности расходятся: на странице проекта указаны и «более 40 тыс. т в год», и около 50 тыс. т в год с возможностью расширения до 300 тыс. т, тогда как, по её же сообщению, в 2025 г. выпущено 15 тыс. единиц.[28]

23 Frontier. Vaulted, 2024; Frontier. Charm Industrial, 2023.
24 Frontier. Our portfolio, 2026; Isometric Registry. Charm Bio-oil Geologic Storage, 2026.
25 Charm Industrial. Charm Industrial Secures 61,500-Ton Carbon Removal Purchase and $20 Million Debt Financing, 2026.
26 Graphyte. Loblolly, 2026.
27 Isometric Registry. Loblolly Project, 2026.
28 Graphyte. Graphyte Announces 60,000 Ton Carbon Removal Agreement with JPMorganChase, 2026.

Девелопер: Vaulted Deep
Проект: Great Plains Organic Waste Sequestration

Хатчинсон, штат Канзас, США; вариант Б.

На площадке 60 соляных каверн общей ёмкостью 2–3 млн т органических отходов; закачиваются биосолиды, отходы животноводства и растениеводства, бумажный шлам. В реестре Isometric выпущено 74 920 единиц, включая 2% в буферном резерве, погашено 17 869.[29] После расширения в 2025 г. объект, по данным CDR.fyi, рассчитан на 50 тыс. т удаления в год при полной загрузке.[30] Ёмкость каверн выражена в тоннах отходов: вода увеличивает массу закачки, но не количество углерода, поэтому пересчитать её в будущий выпуск единиц без данных о составе сырья нельзя.

Девелопер: Charm Industrial
Проект: Charm Bio-oil Geologic Storage

США; вариант Б.

Как и другие проекты раздела, он работает в условиях отлаженной в США системы разрешений на закачку отходов. Charm производит био-масло из остатков противопожарных рубок в Колорадо и закупает его у сторонних производителей, перерабатывающих отходы лесопромышленных предприятий; жидкость доставляют железной дорогой и автотранспортом к переоборудованным нефтяным скважинам в Канзасе и Луизиане. В реестре Isometric выпущено 11 917 единиц, включая 5% в буферном резерве, погашено 7 377.[31] Наращивание идёт медленнее планов: проектная документация предполагала выход на 25 тыс. т в год к 2025 г.; эта цель сохраняется, но срок её достижения не определён.[32] Поскольку производство жидкости и закачку выполняют разные участники, к контролю скважин добавляется прослеживание происхождения и состава каждой партии.

5. Стандарты и методологии

Методологии определяют допустимое сырьё, расчёт единиц и доказательства долговечности; единицы выпускаются после регистрации проекта и верификации результата

29 Isometric Registry. Great Plains Organic Waste Sequestration, 2026.
30 CDR.fyi. Mega CDR Deal Alert: Vaulted Deep – Microsoft, 2025.
31 Isometric Registry. Charm Bio-oil Geologic Storage, 2026.
32 RMI. The New Frontiers Report for CDR, 2026, с. 48.

независимым органом. Для варианта А применяются методология Puro.earth и протокол Isometric Subsurface Biomass Carbon Removal and Storage; все три проекта Isometric из раздела 4 верифицирует 350Solutions.[33]

Вариант А. Puro.earth применяет методологию Terrestrial Storage of Biomass (Edition 2023, v.1). Она, в частности, требует юридически подтвердить сохранение назначения участка на 100 лет.[34]

Вариант Б. Isometric применяет протоколы Biomass Geological Storage для пульпы (только объекты в США) и Bio-oil Geological Storage для био-масла; требования к соляным кавернам и проницаемым пластам вынесены в отдельные модули.[35]

Метку Ключевых углеродных принципов (Core Carbon Principles, CCP) Совета по добросовестности добровольного углеродного рынка (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market, ICVCM) получают единицы, выпущенные по конкретным одобренным версиям правил. В октябре 2025 г. ICVCM одобрил Subsurface Biomass версии 1.0, Biomass Geological Storage и Bio-oil Geological Storage версий 1.0–1.1.[36] Great Plains и Loblolly работают по одобренным версиям, Charm — по версии 1.2, не вошедшей в решение. Puro.earth в декабре 2025 г. признан программой, соответствующей CCP, для версии 4.2 своего стандарта; единицы по Terrestrial Storage of Biomass получат метку только после одобрения самой методологии.[37]

6. Преимущества

Углерод поступает в проект уже связанным в биомассе, поэтому не нужна установка для его извлечения из воздуха, а энергия расходуется в основном на подготовку и перевозку сырья. Массу и содержание углерода размещённого вещества можно измерить напрямую. Эти преимущества проявляются, если сырьё не имеет иного использования и находится недалеко от хранилища.

Вариант А. Технология проста, ячейки вводят по мере поступления сырья, хранилище доступно для осмотра и ремонта.

Вариант Б. Закачка пульпы использует отработанную технологию и уже разрешённую инфраструктуру утилизации отходов и позволяет размещать влажные отходы без сушки. Био-масло в 5–7 раз плотнее исходной биомассы, поэтому его выгоднее перевозить от нескольких мобильных установок к общей скважине.[38]

33 Isometric Registry. Great Plains Organic Waste Sequestration; Charm Bio-oil Geologic Storage; Loblolly Project, 2026.

34 Puro.earth. Terrestrial Storage of Biomass, Edition 2023 v.1, 2023; Puro.earth. Preliminary Assessment Public Summary: Terrestrial Storage of Biomass, 2024, критерий c3.3.

35 Isometric. Biomass Geological Storage, 2026; Isometric. Bio-oil Geological Storage, v1.2, 2026; Isometric. Biomass or Bio-oil Storage in Salt Caverns, 2026.

36 Isometric. ICVCM approves five new Isometric protocols to use CCP label, 2025.

37 ICVCM. Integrity Council confirms carbon crediting program Puro.Earth as CCP-Eligible, 2025.

38 Frontier. Charm Industrial, 2023.

7. Вызовы и ограничения

Главное ограничение обоих вариантов — доступность устойчивого сырья. Остатки, не имеющие покупателя, поддерживают плодородие почв и служат местообитаниями, другие уже используются для материалов или энергии. Если проект забирает такое сырьё, прежние потребители могут перейти на заменители и создать дополнительные выбросы — утечку (leakage), а доход от продажи остатков может стимулировать избыточную заготовку.[39]

Вариант А. Увлажнение и повреждение покрытий могут возобновить разложение, в бескислородных условиях — с выделением метана (CH4), поэтому герметизация сама по себе не доказывает сохранности углерода. Риск обратного высвобождения (reversal) сохраняется после закрытия хранилища: нужны защита от затопления и пожаров, обследование покрытий, средства на ремонт и права на участок на весь срок.[40] Полевых данных о поведении таких хранилищ за десятилетия пока нет.

Вариант Б. Скважина должна сохранять герметичность при контакте с закачиваемым веществом, а давление — оставаться допустимым для пласта. Разложение органики может давать биогаз, поэтому миграцию газа и жидкости оценивают отдельно; полимеризация био-масла снижает его подвижность, но затрудняет закачку.[41] Расширение ограничивают разрешения и доступ к пластам.

Исследований требуют долговременное поведение органики в хранилищах и пластах, образование биогаза и методы прямого контроля потерь.

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Базовый сценарий (baseline) описывает, что произошло бы с биомассой без проекта и когда её углерод вернулся бы в атмосферу. Если древесина сохранялась бы десятилетиями, зачёт всей массы завысил бы удаление: дополнительность (additionality) требует учитывать только

39 WRI. Biomass Can Fight Climate Change, But Only If You Do It Right, 2025; Frontier. Biomass sourcing principles, 2024.

40 Puro.earth. Terrestrial Storage of Biomass, Edition 2023 v.1, 2023, разд. 4–7.

41 Isometric. Biomass or Bio-oil Storage in Permeable Reservoirs, 2026.

сохранение сверх этого сценария, а чистое удаление рассчитывают за вычетом выбросов жизненного цикла — сбора, перевозки, переработки сырья и материалов хранилища.[42]

Независимый орган проверяет данные о сырье, переработке и размещении; прослеживаемость партий и публичный реестр предотвращают повторный зачёт. При пиролизе учитывают баланс углерода между био-маслом, газом и твёрдым остатком: хранимой жидкости нельзя приписать весь исходный углерод.[43] Риск обратного высвобождения покрывается буферным резервом: в реестре Isometric это 2% выпуска для Great Plains и 5% для Charm и Loblolly.[44]

Вариант А. Массу партии определяют взвешиванием, влажность и содержание углерода — по представительным пробам. Затем контролируют влажность, кислород, температуру и газы, включая метан, и обследуют покрытия. Isometric требует прямых наблюдений за условиями хранения во времени, плана закрытия и наблюдений после него, а также юридически обязывающего ограничения использования участка на 1000 лет или бессрочно. Срок мониторинга при этом не совпадает с расчётным сроком хранения.[45]

Вариант Б. Для закачиваемого вещества определяют состав и содержание углерода, в скважинах измеряют расход и давление и проверяют герметичность; наблюдения сопоставляют с моделью движения жидкости и биогаза в пласте. Отдельные модули для проницаемых пластов и соляных каверн задают требования к закрытию скважин и наблюдениям после закачки, в том числе за образованием биогаза.[46]

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Сопутствующие выгоды зависят от прежнего обращения с сырьём. Там, где остатки сжигали открытым способом, их вывоз снижает задымление; Graphyte связывает с проектом Loblolly сокращение загрязнения воздуха твёрдыми частицами (сведения компании).[47]

42 Isometric. Biomass Geological Storage, v1.2: Referenced modules, 2026; Clean Air Task Force. Strengthening Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) Protocols, 2026, с. 11–14.

43 Isometric. Bio-oil Geological Storage, v1.2, 2026.

44 Isometric Registry. Great Plains Organic Waste Sequestration; Charm Bio-oil Geologic Storage; Loblolly Project, 2026.

45 Isometric. Subsurface Biomass Storage, 2026; Isometric. Subsurface Biomass Carbon Removal and Storage: requirements, 2026.

46 Isometric. Biomass or Bio-oil Storage in Permeable Reservoirs, 2026; Isometric. Biomass or Bio-oil Storage in Salt Caverns, 2026.

47 Graphyte. Loblolly, 2026.

Вывоз сухостоя и порубочных остатков может дополнять противопожарные мероприятия, как в проектах Charm в Колорадо, а продажа остатков даёт хозяйствам дополнительный доход. Чрезмерный вывоз вреден: мёртвая древесина важна для местообитаний, растительные остатки — для почвенного углерода и питания растений.[48]

10. Российский опыт и потенциал реализации

Наличие возможных нормативных ограничений в российском законодательстве.

По состоянию на октябрь 2026 г. российских проектов, пилотных работ или исследований по прямому и геологическому хранению биомассы как способу удаления CO_2 не выявлено. Сырьевой базой могут стать отходы лесозаготовок, деревообработки и сельского хозяйства, а также осадки сточных вод; доступный объём зависит от их нынешнего использования и затрат на сбор.

По оценке авторов доклада, потенциал обоих вариантов в России велик. Сырьевая база для варианта А – порубочные остатки, отходы лесопиления и деревообработки, солома, шелуха — очень значительна, но её первичных оценок с учётом нынешнего использования, затрат на сбор и экологических ограничений нет. Холодный климат замедляет разложение биомассы, однако на переувлажнённых и мерзлотных территориях и при близких грунтовых водах размещение ячеек потребует отдельного изучения грунтов. Для варианта Б в стране есть соляные толщи, в которых уже работают подземные хранилища газа — Калининградское и Волгоградское[49], и многолетний опыт закачки жидких отходов в глубокие горизонты: промышленных стоков на объектах «Газпром добыча Астрахань» и жидких радиоактивных отходов в Северске, Димитровграде и Железногорске.[50] Сдерживают применение отсутствие утверждённых российских методологий для таких климатических проектов и девелоперов, готовых их реализовать.

С 1 сентября 2026 г. действуют изменения Федерального закона № 296-ФЗ, внесённые Федеральным законом от 29.12.2025 № 578-ФЗ. Введены понятия высвобождения парниковых газов и счёта резервирования, на который зачисляется часть углеродных единиц климатических проектов с риском высвобождения; порядок реализации таких проектов устанавливает Правительство РФ.[51] Оба варианта, по-видимому, будут отнесены к проектам с таким риском, и их регистрация будет зависеть от этого порядка и от утверждённой методологии.

48 WRI. Biomass Can Fight Climate Change, But Only If You Do It Right, 2025.

49 ПАО «Газпром». 50 лет подземного хранения газа в России.

50 Астраханский государственный университет. Захоронение промышленных стоков в геологические недра; Томский политехнический университет. Пункты глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, 2024.

51 Российская Федерация. Федеральный закон от 29.12.2025 № 578-ФЗ, ст. 4, 2025; дата вступления в силу — «Российская газета», 12.01.2026.

Вариант А. Если размещаемая биомасса имеет статус отхода, хранилище становится объектом размещения отходов: размещение отходов I–IV классов опасности лицензируется, а захоронение отходов с полезными компонентами, подлежащими утилизации, запрещено; проектная документация таких объектов подлежит государственной экологической экспертизе, а участок должен использоваться в соответствии с целевым назначением.[52]

Можно ли считать подготовленную биомассу продуктом, а не отходом, зависит от конкретного вещества и процесса.

Вариант Б. Закачка требует права пользования недрами для строительства и эксплуатации подземных сооружений; лицензия на добычу такого права не даёт, а Федеральный закон «Об охране окружающей среды» запрещает сброс отходов в недра и подземные водные объекты. Поэтому допустимость закачки органических отходов требует отдельной правовой оценки для конкретного вещества и объекта.[53]

11. Выводы

Хранение углерода биомассы уже обеспечивает выпуск углеродных единиц в объёме десятков тысяч тонн в год при сравнительно простой технологии. Прямое хранение отличается невысокими затратами и модульностью, но его долговечность подтверждена пока расчётами и наблюдениями за несколько лет. Геологический вариант опирается на инфраструктуру закачки отходов; его рынок по объёму договоров более чем на порядок больше, но сосредоточен в одной сделке, а производство био-масла наращивается медленнее планов. В России при большом потенциале сырья применение сдерживают неопределённый правовой статус размещаемой биомассы, отсутствие методологий и девелоперов.

52 Российская Федерация. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», ст. 9, 12; Федеральный закон от 23.11.1995 № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе», статья 11, ст. 11; Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ, статья 42, ст. 42.

53 Российская Федерация. Закон Российской Федерации от 21.02.1992 № 2395-1 «О недрах», ст. 6, 11, 23.2; Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», статья 51, ст. 51.



Ускоренное выветривание горных пород

ENHANCED ROCK WEATHERING, ERW



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

Ускоренное выветривание горных пород (enhanced rock weathering, ERW; в протоколах сертификации также enhanced weathering, EW) — способ удаления CO_2 из атмосферы (Carbon Dioxide Removal, CDR), который ускоряет природное химическое выветривание. Породу, богатую кальцием и магнием, дробят и вносят в почву — чаще всего на пашне, а также на рисовых чеках и пастбищах. В природе выветривание силикатов связывает 0,1–0,3 млрд т CO_2 в год, является одним из регуляторов климата. Помол многократно увеличивает поверхность частиц и тем самым скорость реакции[1].

Как идёт процесс. Почвенная влага содержит угольную кислоту — растворённый CO_2 атмосферы и почвенного воздуха. Она растворяет минералы породы: в раствор переходят катионы кальция и магния, а углерод — в форму бикарбонат-иона. Для магниевого оливина (форстерита) суммарная реакция выглядит так: $Mg2SiO4 + 4CO_2 + 4H2O \rightarrow 2Mg2+ + 4HCO3- + H4SiO4$. Бикарбонат с почвенными и грунтовыми водами уходит в реки, затем в океан и остаётся там в растворённом виде. По пути часть катионов теряется: их поглощают растения, удерживает почвенный поглощающий комплекс, они входят во вторичные карбонаты и глины, их связывают более сильные кислоты, например азотная, образующаяся из аммонийных удобрений. Поэтому чистое удаление всегда меньше максимума, рассчитанного по составу породы. Измерить связанный CO_2 напрямую нельзя: о нём судят по продуктам выветривания в почве и поровой воде и по моделям[2].

Что считается удалением. Углерод поступает из атмосферы, хранится долговременно, а удаление вызвано деятельностью человека, поэтому ERW относится к CDR. Удаление засчитывается только сверх того, что дали бы обычные практики: известкование кислых почв, по сути, тоже форма выветривания, и его эффект нельзя приписывать проекту. Дополнительность ERW по отношению к уже распространённому известкованию пока полностью не оценена[3]. Вид сырья определяет и химию, и риски (таблица 1).

1 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3, разд. 1, 4, 5, 8, 9 (действующая версия на октябрь 2026 г.); Frontier. Enhanced weathering (purchasing perspective) (накопленные показатели договоров на октябрь 2026 г.).

2 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3; ICF, Cerulogy, Ecodiversity. Review of carbon removals through enhanced rock weathering. Отчёт для Европейской комиссии (DG CLIMA), декабрь 2025, Executive summary, разд. 1.1, 3.4.

3 Fuss S. et al. Chapter 10: Costs and Potentials // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 244–245.

Таблица 1. Основные виды сырья для ERW [4]

Сырьё	Особенности	Ограничения и риски	Примеры применения
Базальт	Распространённая магматическая порода; основное сырьё коммерческих проектов	Выветривается медленнее оливина; нужен большой тоннаж на тонну CO_2	Terradot (Бразилия), InPlanet (Бразилия), полевой опыт в Иллинойсе (США)
Оливин, дунит (ультраосновные породы)	Выветриваются быстрее базальта	Никель и хром, возможна примесь асбестоподобных минералов; нужен контроль накопления в почве	Eion (США), с 2026 г. в составе Terradot
Карбонатные породы (известняк)	Применяются при известковании; допускаются протоколом Isometric	Связывают вдвое меньше CO_2 на тонну катионов; при осаждении карбонатов в почве удаление сводится к нулю	Известкование как базовый сценарий
Отходы (шлаки, отсевы карьеров)	Не требуют добычи, часть — помола	Загрязнители; надо вычитать выветривание, которое шло бы в отвале и без проекта	Ограниченные объёмы мелких фракций

Продолжительность хранения (durability)

› Основной резервуар — растворённый неорганический углерод океана; при относительно постоянной кислотности морской воды он устойчив тысячелетиями. Isometric оценивает срок хранения более чем в 10 тыс. лет и требует от проектов расчётной продолжительности хранения не менее 1000 лет. По действующей версии протокола (1.3) и модулю Isometric о хранении углерода в океане буферный резерв для ERW не формируется, поскольку обратное высвобождение нельзя наблюдать напрямую; проекты, начатые по более ранним версиям (в том числе Carcará), отчисляют в резерв 2% единиц. Срок хранения не равен сроку мониторинга: период, в течение которого по проекту выпускают единицы (crediting period), составляет несколько лет. Главная неопределённость — в том, сколько катионов и за какое время дойдёт до океана: в почве они могут задерживаться годами[5].

4 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3; Frontier. Enhanced weathering; Beerling D. J. et al. Enhanced weathering in the US Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits // PNAS, 2024, 121(9), e2319436121; University of Sheffield. Field trials reveal crushed rock boosts carbon removal and improves crop yields, 2024 г.

5 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3; Isometric. Storage Module: DIC Storage in Oceans; ICF и др. Review of carbon removals through enhanced rock weathering, 2025; Isometric Registry. Project Carcará (данные реестра на октябрь 2026 г.).

Технологическая готовность и масштабируемость

› В докладе The State of CDR (2026 г.) консервативные оценки уровня технологической готовности (Technology Readiness Level, TRL) составляют 3–4, оценки поставщиков — 8–9; Всемирный экономический форум (WEF) приводит диапазон 3–7 по девятиуровневой шкале, Supercritical — TRL 5 по собственной шкале[6]. Разброс объясняется тем, что внесение породы — освоенная агротехника, а надёжное измерение удаления — нет. По данным The State of CDR, в 2025 г. документально подтверждено удаление лишь 3,8 тыс. т CO_2, хотя только Mati Carbon в Индии и Terradot в Бразилии к тому времени внесли около 50 тыс. и 48 тыс. т базальта: удаление растягивается на годы после внесения[7].

Технический потенциал ERW на сельскохозяйственных землях оценивается в 0,2–2 млрд т CO_2 в год, устойчивый — около 0,7 млрд т; в сценариях к 2050 г. — от менее 0,1 до 1,5 млрд т в год. Глобальные оценки опираются на лабораторные скорости реакции, а в поле выветривание идёт медленнее и со временем замедляется. Масштаб ограничивают логистика, работа с множеством фермеров и стоимость измерений[8].

2. Экономика CDR-проектов

Капитальные затраты (CAPEX) у ERW невелики: проект использует действующие карьеры, дробильные мощности и сельскохозяйственную технику и не требует крупных новых объектов. В них входят оборудование для помола, техника внесения, лабораторная база и подготовка проекта к валидации. Эксплуатационные затраты (OPEX) включают покупку или добычу породы, помол, перевозку, внесение, отбор и анализ проб, моделирование, верификацию и работу с фермерами[9].

Себестоимость удаления по современным оценкам — от 50 до более чем 300 долларов США за тонну CO_2, а оценки с полным учётом жизненного цикла превышают 1000 долларов США; основные статьи — дробление и перевозка породы. В четырёхлетнем полевом опыте в Иллинойсе ежегодно вносили 50 т базальта на гектар; консерватив-

6 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 244–245; World Economic Forum. Carbon Dioxide Removal Technologies: Market Overview and Offtake. White Paper, март 2026, с. 12 (шкала TRL из 9 уровней, данные ClimeFi); Supercritical. Delivered or delayed?, февраль 2026, с. 24–25 (данные посредника, TRL по шкале Supercritical, дата среза не указана).

7 Smith S. M. et al. Chapter 7: Current levels of CDR // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 171–172 (данные за 2025 г.).

8 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 244–245; Frontier. Enhanced weathering.

9 Frontier. Enhanced weathering.

ный потенциал
удаления (CDR potential) по убыли кальция и магния в почве, без учёта потерь на пути к океану, составил 10,5 ± 3,8 т CO_2 на гектар. По расчёту редакции, это около 0,05 т CO_2 на тонну породы за четыре года, то есть порядка 20 т породы на тонну CO_2 за этот срок; дальнейшее выветривание той же породы может увеличить итог. Поэтому решающие факторы — расстояние от карьера до поля (Terradot, например, берёт породу в карьерах в пределах 50 км от участков), тонкость помола, скорость выветривания в данном климате и использование готовых отсевов[10].

Существенную долю затрат даёт мониторинг: компании тратят на отбор и анализ проб значительную часть привлечённого капитала. По оценке Terradot, верификация может добавлять более 100 долларов США на тонну; в проекте с Google компания рассчитывает снизить эти расходы, проводя верификацию реже, по накопленному удалению. По опросам CDR.fyi и OPIS, цена безубыточности поставщиков ERW в 2025 г. составляла в среднем 272 долларов США за тонну; в опросе 2026 г. цена, нужная поставщикам для разумной прибыли, у ERW (в отличие от большинства методов) не выросла, а разрыв с готовностью покупателей платить был узким. Это ожидания участников рынка, а не фактическая себестоимость[11]. Договоры на будущие поставки (offtake agreements) с фиксированной ценой открывают доступ к заёмным деньгам: в октябре 2026 г. Terradot получила от HASI кредит 34 млн долларов США под проекты, обеспеченные такими договорами с Frontier (по сообщению компаний, это крупнейшее раскрытое долговое финансирование в ERW)[12].

3. Рыночная ситуация

Углеродные единицы, подтверждающие удаление CO_2 из атмосферы (carbon removal credits), по проектам ERW покупают прежде всего крупные технологические компании — Google и Microsoft — и объединение покупателей Frontier. Сводные данные о рынке публикует аналитическая платформа CDR.fyi.

По данным CDR.fyi на 30 октября 2026 г., по проектам ERW заключено 472 сделки на 1,90 млн т CO_2, а поставлено 67,7 тыс. т. Это 3,6% законтрактованного объёма (расчёт редакции); по долговременному CDR в целом показатель близок: поставлено 1,7 млн из 50,6 млн т, или 3,4%. На ERW приходится 3,7% всех тонн по договорам долговременного удаления. Крупнейшие покупатели — Google (1,3 млн т), участники Frontier (335 тыс. т) и Microsoft (146 тыс. т); крупнейшие поставщики — Terradot (1,3 млн т), Lithos (189 тыс. т), Eion (102 тыс. т), UNDO (77 тыс. т) и Alt Carbon (71 тыс. т). Рынок сильно сосредоточен: по расчёту редакции, около 70% тонн покупает одна компания (Google) и около 70% продаёт одна

10 Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 244–245; Beerling D. J. et al., PNAS, 2024; Carbon Pulse. US ERW developer reaches deal with Microsoft for 12k CDR credits, 2025 г. (сообщение СМИ).

11 World Economic Forum. Carbon Dioxide Removal Technologies: Market Overview and Offtake. White Paper, март 2026, примеч. 15, с. 31; Carbon Pulse. Google signs its largest-ever CDR offtake, backs Brazilian super pollutant-ERW project, 16.09.2026; AJOT. Google agrees biggest carbon removal deal yet, сентябрь 2026 г. (сообщения СМИ); Senken. Carbon removal prices 2026 to 2040, август 2026, с. 3 (со ссылкой на опрос CDR.fyi и OPIS); CDR.fyi, OPIS. Pricing, Attributes, and Blockers: Durable CDR Market Dynamics 2026–2030, 2026, с. 8–9.

12 Business Wire. Terradot and HASI Close $34M Investment for Carbon Removal Projects, 27.10.2026 (пресс-релиз компаний).

компания (Terradot)[13]. Средневзвешенная цена публично раскрытых сделок ERW по данным CDR.fyi — 352 долларов США за тонну: дороже биоугля (136 долларов США) и BECCS (220 долларов США), но дешевле DACCS (516 долларов США). Близкие значения дают Frontier (333 тыс. т на 121,0 млн долларов США; в среднем 362 долларов США за тонну, диапазон 270–500) и The State of CDR (303 долларов США в 2024 г. и 407 долларов США в 2025 г.)[14].

Крупнейшая сделка заключена в сентябре 2026 г.: Google купит у Terradot 1 млн т удаления CO_2 к 2040 г. и ещё 1 млн т CO_2-эквивалента сокращения выбросов метана в рисоводстве Бразилии к 2030 г. (по 20-летнему потенциалу глобального потепления); цена не раскрыта, и складывать эти объёмы нельзя[15]. Первый крупный договор на ERW заключили в декабре 2023 г. участники Frontier — с Lithos Carbon на 154 240 т за 57,1 млн долларов США с поставкой в 2024–2028 гг. Все эти договоры относятся к будущим поставкам, и их стоимость не равна полученной выручке[16].

4.

Обзор ключевых проектов

Девелопер: Terradot
Проект: Carcará (Бразилия)

Terradot вносит базальт из карьеров южной Бразилии на соседние фермы. Проект Carcará в штате Парана занимает 100 га и в августе 2025 г. прошёл валидацию по протоколу Isometric; за удаление с 16.10.2024 по 18.08.2025 реестр выпустил 204,95 единицы, из них 44,3 погашены[17]. По всем договорам у компании около 1,3 млн т, а поставлено, по данным CDR.fyi, 167 т; это поставки покупателям на дату среза платформы, они не равны выпуску единиц в реестре. В феврале 2026 г. Terradot купила активы американской Eion, работавшей с оливином, с договорами более чем на 100 тыс. т. У крупнейшего поставщика подтверждённое удаление пока на порядки меньше заключённых договоров; Carcará при этом небольшой пилот, и обобщать его результаты на всю отрасль нельзя[18].

13 CDR.fyi. Order Insights: Enhanced Weathering (портал по подписке, снимок от 30.10.2026; данные по раскрытым сделкам, доли — расчёт редакции).

14 CDR.fyi. Weighted Average Price by method (по публично раскрытым ценам; снимок от 30.10.2026); Frontier. Enhanced weathering; Johnstone I. et al. Chapter 4: Voluntary demand for CDR // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, табл. 4.3 (с. 101; средние цены по небольшому числу раскрытых сделок).

15 Carbon Pulse (Google — Terradot), 16.09.2026.

16 Frontier. Frontier buyers sign world's first enhanced weathering offtake agreements with Lithos Carbon, 07.12.2023.

17 Isometric Registry. Project Carcará; Carbon Pulse. Backed by big tech, ERW startup expects to issue first carbon credits in Brazil by the end of 2025, 2025 г. (сообщение СМИ со ссылкой на документы Isometric).

18 CDR.fyi. Terradot: Carbon Removal Supplier Profile (данные платформы на октябрь 2026 г.); Business Wire. Terradot Acquires Eion to Form Leading Global Enhanced Rock Weathering Carbon Removal Platform, 06.02.2026; Carbon Herald. Terradot Acquires Eion, февраль 2026 г.

Девелопер: Lithos Carbon **Проект: внесение базальта на фермах США**	Lithos вносит на поля мелкодисперсные отходы базальта. По договору с Frontier компания должна удалить 154 240 т в 2024–2028 гг.; ожидалось, что больше половины будет поставлено к концу 2025 г. Первые единицы Lithos выпустил реестр Puro.earth в декабре 2025 г.: по данным CDR.fyi, 5160 единиц по проектам в Северной Каролине, Висконсине, Пенсильвании, Мэриленде и Мичигане — на тот момент крупнейший выпуск ERW. В апреле 2026 г. CarbonPlan поставил под сомнение заявленную по проекту Lithos Mid-West скорость удаления 8,3 т CO_2 на гектар в год (в полевом опыте Beerling и др. — 3–4 т) и указал на нехватку открытых данных. Пример показывает, что достоверность первых выпусков ERW в умеренном климате пока обсуждается[19].
Девелопер: InPlanet **Проект: Serra da Mantiqueira (Бразилия)**	По проекту Isometric выпустила 235,53 единицы; по заявлению Isometric и InPlanet, это первые в мире независимо верифицированные единицы ERW. Об их поставке компании Adyen через платформу ClimeFi объявили в январе 2025 г.[20]
Девелопер: Mati Carbon и Alt Carbon **Проект: рисовые поля и чайные плантации Индии**	Mati Carbon вносит базальт на поля мелких фермеров бесплатно, а доход получает от продажи углеродных единиц; в апреле 2025 г. компания выиграла главный приз конкурса XPRIZE Carbon Removal — 50 млн долларов США. Alt Carbon работает на чайных плантациях Дарджилинга и, по данным CDR.fyi, поставила около 22% проданного объёма — намного больше среднего по ERW[21].

19 Frontier. Portfolio: Lithos (данные на октябрь 2026 г.); Frontier (Lithos), 07.12.2023; CDR.fyi. Durable CDR Market Recap: December 2025, январь 2026 г; CarbonPlan. Questions about Lithos' first ERW credit issuance, 20.04.2026; Puro Registry. Lithos Mid-West Facility (выпуск 03.12.2025: 2362 единицы); University of Sheffield. Field trials reveal crushed rock boosts carbon removal and improves crop yields, 2024 г.

20 Isometric. World's first independently verified Enhanced Weathering credits; InPlanet. World's first enhanced rock weathering carbon removal credits issued, 06.01.2025.

21 Yale News. Yale-related nonprofit wins global carbon removal prize, 23.04.2025; IEEE Spectrum. XPrize Carbon Removal, апрель 2025 г; CDR.fyi. Durable CDR Market Recap: June 2026; CDR.fyi. Alt Carbon: Carbon Removal Supplier Profile (данные на октябрь 2026 г.).

5. Стандарты и методологии

Isometric › Протокол Enhanced Weathering in Agriculture (первая версия сертифицирована в апреле 2024 г., действующая — 1.3) охватывает внесение силикатных и карбонатных пород и промышленных отходов, например шлаков, на пашню и пастбища. Чистое удаление рассчитывают как CO_2, сохранённый в растворе или почве, за вычетом удаления, которое произошло бы в базовом сценарии, и всех выбросов проекта. Единицы выпускают по 30-му процентилю расчётного распределения, а при успешной независимой проверке вторым методом — по 40-му[22].

Puro Standard (оператор — Puro.earth) › Методология Enhanced Rock Weathering впервые опубликована в 2022 г., обновлена в 2024 г.; действующая редакция Edition 2025 выпущена 17 ноября 2025 г. Она требует сочетать два метода — для количественной оценки и для её проверки — и применять скидку на неопределённость. Единицы выпускаются под названием CORC (CO_2 Removal Certificate). В июне 2026 г. Frontier одобрил эту методологию для своих поставщиков[23].

Другие системы › Методологии ERW есть также у Rainbow (версия 1.0, 2025 г.) и Carbon Standards International (версия 0.9, октябрь 2022 г., только для пашни). Совет по добросовестности добровольного углеродного рынка (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market, ICVCM) присвоил программам Isometric, Puro.earth и Rainbow статус CCP-Eligible (соответствие Основным принципам углеродных единиц, Core Carbon Principles, CCP, на уровне программы), но оценку методологий ERW для статуса CCP-Approved на октябрь 2026 г. не завершил. В рамке сертификации EC CRCF (Carbon Removals and Carbon Farming, Регламент (ЕС) 2024/3012) методология для ERW пока только рассматривается: Делегированный регламент (ЕС) 2026/285 охватывает DACCS, BioCCS и биоуголь, а для ERW Еврокомиссия заказала технический обзор[24].

22 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture: requirements (дата сертификации v1.0 — апрель 2024 г.); Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3, разд. 4, 6, 8.3.1, 9.2, 10.1.

23 Puro.earth. Puro.earth Launches Enhanced Rock Weathering Methodology Update, 17.11.2025; Decarbonfuse. Frontier approves Puro.earth's Enhanced Rock Weathering methodology, 24.06.2026 (пресс-релиз Puro.earth); ICF и др., 2025, разд. 3 (версии 2022 и 2024 гг.).

24 ICF и др., 2025, разд. 3.4 и список литературы (Rainbow, Enhanced rock weathering v1.0, 13.06.2025; CSI, версия 0.9, октябрь 2022 г.); ICVCM. Integrity Council confirms carbon crediting program Rainbow as CCP-Eligible, 2026 г; Calyx Global. ICVCM CCP-label tracker (просмотрено в октябре 2026 г.); Herbert Smith Freehills Kramer. A new EU framework for carbon removals and carbon farming, май 2026 г.; ICF и др., 2025.

6. Преимущества

ERW опирается на природный процесс и существующую инфраструктуру горной добычи и сельского хозяйства, поэтому может расти без крупных капиталовложений и мало зависит от энергосистемы: при помоле до частиц около 100 мкм расход энергии сравнительно невелик. Для фермеров метод может заменять известкование и давать прибавку урожая (раздел 9); эффект сильнее в тёплом влажном климате, на кислых почвах, при коротком плече перевозки и чистом сырье[25].

7. Вызовы и ограничения

Главное ограничение — **измерение**. Удаление идёт годами после внесения, полевые скорости ниже лабораторных и падают со временем, а часть потерь по пути к океану изучена плохо, особенно реакции с сильными кислотами и задержка катионов в глубоких слоях почвы. Поэтому реестры выпускают единицы консервативно: даже при внесении породы точно по графику выпуск может оказаться намного меньше модельной оценки[26].

Второе ограничение — **логистика**. На тонну удалённого CO_2 приходится порядка 20 т породы (по опыту в Иллинойсе, раздел 2), поэтому выбросы от добычи, помола и перевозки вычитаются из результата: в действующих проектах вычеты составляют от 5 до 43%, в среднем 6%. Проекту нужно договориться с множеством фермеров и встроиться в их график полевых работ[27].

Третье — **экологические риски**: накопление никеля, хрома и других потенциально токсичных элементов при использовании ультраосновных пород, асбестоподобные минералы в сырье и мелкая пыль при внесении. При плохом контроле сырья возможно загрязнение почв[28]. Четвёртое — рынок: спрос сосредоточен у немногих покупателей, а регулируемых рынков для ERW пока нет[29]. Практической проверки требуют скорость выветривания в разных климатах, потери при переносе к океану и модели, сокращающие число проб.

25 Frontier. Enhanced weathering.

26 Frontier. Enhanced weathering; Supercritical. Delivered or delayed?, февраль 2026, с. 24–25.

27 Smith S. M. et al. Chapter 7: Current levels of CDR // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 176–177, 182 (данные реестров по действующим проектам); Frontier. Enhanced weathering.

28 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3; Fuss S. et al. Chapter 10: Costs and Potentials // The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd ed., 2026, с. 257–258.

29 CDR.fyi. Order Insights, снимок от 30.10.2026; Herbert Smith Freehills Kramer. A new EU framework for carbon removals and carbon farming, май 2026 г.; ICF и др., 2025.

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Мониторинг, отчётность и верификация (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) в ERW основаны на сравнении участков с внесённой породой и контрольных участков, где сохраняются обычные практики, включая известкование. Измеряют убыль катионов из внесённой породы в верхнем слое почвы (обычно до 20 см) или щёлочность поровой воды на той же глубине. Рассчитывают или моделируют потери: вынос катионов с урожаем, образование карбонатов и глин, удержание в почвенном поглощающем комплексе, нейтрализацию некарбонатных кислот, дегазацию CO_2 в реках и океане. За дегазацию в океане многие проекты вычитают единые 20%, хотя величина неопределённа; в среднем чистое удаление в реестрах — 68% от валового удаления[30].

Независимый орган по валидации и верификации посещает участки и проверяет данные; порог существенности ошибок — 5%. Базовый сценарий — продолжение обычного земледелия. Дополнительность подтверждают, если проект не обязателен по закону и зависит от углеродного финансирования. Утечки оценивают как минимум по замещению сырья, которое отвлекли от прежнего использования. Риск обратного высвобождения углерода после поступления в океан считается ненаблюдаемым: неопределённость учитывают прежде всего скидками при выпуске единиц, а буферный резерв по действующей версии протокола не требуется. Повторный зачёт предотвращают единственным владельцем единиц на всю цепочку (карьер, перевозчик, фермер) и погашением единиц в реестре[31].

30 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3, разд. 6.2–6.4, 7.2, 8.3–8.5, 10.1; Smith S. M. et al., SoCDR 2026, гл. 7, с. 176–177, 182.

31 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3.

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

Для сельского хозяйства ERW может работать как средство улучшения почв: снижает кислотность, добавляет калий, магний, кальций и микроэлементы. В четырёхлетнем опыте в Иллинойсе урожай кукурузы и сои на участках с базальтом вырос на 12–16%, а содержание металлов в зерне по сравнению с контролем значимо не изменилось. Доклад The State of CDR указывает на возможное снижение выбросов других парниковых газов, Isometric и Frontier — закиси азота. Эти результаты зависят от почвы, культуры и породы и не переносятся на любой проект. Социальный эффект определяют условия работы с фермерами: Mati Carbon вносит породу бесплатно, получая доход от продажи единиц. Неблагоприятные последствия — накопление металлов в почве, пыль при внесении, воздействие карьеров и перевозок; Isometric требует проверять накопление металлов уже по итогам первого отчётного периода[32].

10. Российский опыт и потенциал реализации

Российский опыт. Подтверждённых сведений о реализованных, пилотных или исследовательских проектах ERW на сельскохозяйственных землях России в открытых источниках не найдено. Есть научные работы о природном выветривании базальтов, в том числе в Центральной Сибири в условиях мерзлоты: они дают основу для оценки скоростей реакции в холодном климате, но не являются опытом CDR-проектов[33]. Ближайший рос-

32 Isometric. Enhanced Weathering in Agriculture v1.3; Beerling D. J. et al., PNAS, 2024; Fuss S. et al., SoCDR 2026, гл. 10, с. 257–258; Frontier. Enhanced weathering; Yale News (XPRIZE), 23.04.2025.

33 Pokrovsky O. S., Schott J., Kudryavtzev D. I., Dupré B. Basalt weathering in Central Siberia under permafrost conditions // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69, 5659–5680.

сийский пример — проект АЛРОСА по ускорению карбонизации хвостов кимберлитовой руды. По сообщению компании, мощность проекта — около 25 тыс. углеродных единиц в год (в проектных данных компании — до 26 тыс.), а валидация прошла в начале 2026 г.[34] Это отдельный тип CDR проектов, который называется: «Минерализация», а не ERW: углерод связывается в твёрдых карбонатах в хвостохранилище, а не выносится в океан. Проект рассматривается отдельно в Докладе.

Условия применимости. Выветривание быстрее идёт в тёплых и влажных условиях и медленнее в холодных и сухих. Для большей части российской пашни это означает меньшее удаление на тонну породы и более долгий срок до выпуска единиц, но не исключает метод: единицы ERW выпущены и по проектам в умеренном климате США (Lithos), хотя заявленная ими скорость удаления оспаривается (раздел 4). Количественных оценок для российских почв нет; там, где почвы известкуют, проект получит единицы только сверх эффекта известкования[35].

11. Выводы

ERW отличается относительно низкими капитальными затратами благодаря возможности использовать существующую горнодобывающую и сельскохозяйственную инфраструктуру. Связывание CO_2 происходит в ходе естественных химических реакций, а основные энергозатраты связаны с подготовкой, перевозкой и внесением породы. По раскрытым сделкам средневзвешенная цена удаления составляет около 350 долларов США за тонну CO_2 – выше, чем для биоугля и BECCS, но ниже, чем для DACCS. Углерод, поступивший в океан в форме растворённых гидрокарбонатов, может сохраняться там на протяжении тысячелетий. Слабое место — подтверждение результата: удаление растягивается на годы, часть его теряется по пути и оценивается моделями, поэтому выпуск единиц отстаёт от договоров, а реестры закладывают в расчёт консервативный запас. Рынок сосредоточен у немногих покупателей; дальше многое решат удешевление измерений и признание методологий ICVCM и ЕС. Для России сначала нужны полевые опыты на местных почвах, оценка скорости выветривания в умеренном климате и ясность с регистрацией молотой породы как агрохимиката.

34 АКМ. АЛРОСА выводит климатические инициативы на новый уровень, 26.05.2026 (сведения компании); АЛРОСА. Описание климатического проекта на Мирнинско-Нюрбинском ГОК (материалы участника доклада, 2026).

35 Supercritical. Delivered or delayed?, февраль 2026, с. 24–25; CarbonPlan (Lithos), 20.04.2026.

12



Накопление углерода в продуктах

CARBON STORAGE IN PRODUCTS



1. Описание технологии, включая масштабируемость и технологическую готовность

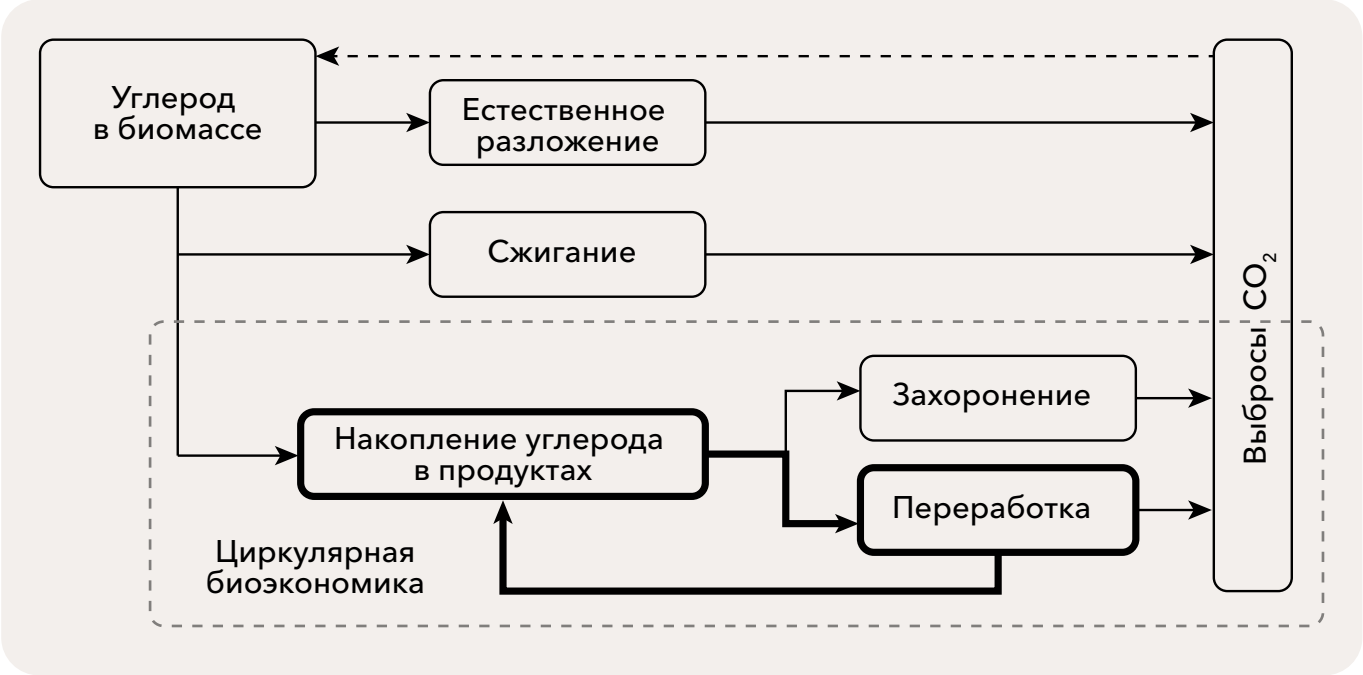
Carbon Storage in Products – это деятельность, направленная на долговременное хранение CO_2, ранее поглощенного из атмосферы, в продуктах с длительным сроком службы. В терминологии европейской рамки CRCF (Carbon Removals and Carbon Farming) к этой категории относится хранение углерода не менее 35 лет[1]. Наибольшим потенциалом обладают материалы растительного происхождения – прежде всего древесина, а также сельскохозяйственное сырье (солома, конопля, бамбук), поскольку углерод, поглощенный растением в процессе роста, сохраняется в составе материала на всем протяжении его использования.

Важно подчеркнуть, что продукт лишь «консервирует» уже поглощенный углерод природными пулами: лес, почва и др. и откладывает его возврат в атмосферу. Поэтому климатическая ценность этого направления определяется двумя параметрами – **сроком хранения и сценарием окончания жизненного цикла продукта.**

Основные механизмы хранения. Углерод, накопленный в биомассе, может вернуться в атмосферу тремя путями: через естественное разложение, сжигание или – с задержкой – через продукты длительного пользования (рис. 1)[2]. В последнем случае углерод остается в «технологическом пуле» до тех пор, пока продукт эксплуатируется, а затем либо высвобождается (сжигание, захоронение с разложением), либо снова возвращается в оборот через переработку и повторное использование. Именно каскадное использование (например, переработка конструкционной древесины в плиты) позволяет продлить срок хранения и формирует модель циркулярной биоэкономики.

1 European Commission. Carbon removals and carbon farming: Carbon storage in products. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en#carbon-storage-in-products

2 Carbon storage in wood products (ResearchGate). https://www.researchgate.net/publication/320375411_Carbon_storage_in_wood_products



3

Из этой схемы следуют две ключевые особенности направления:

— **хранение носит временный характер (temporary removal):** в отличие от геологического хранения или минерализации, углерод в продуктах хранится десятилетия, а не тысячелетия;

— **итоговый эффект зависит от сценария окончания жизненного цикла (end-of-life):** при сжигании углерод высвобождается сразу, при переработке – хранение продлевается.

Для оценки скорости высвобождения углерода используются периоды полураспада продуктовых пулов. По умолчанию МГЭИК принимает 35 лет для пиломатериалов, 25 лет для древесных плит и 2 года для бумаги[4]. Для конструкций зданий сроки полураспада существенно выше: оценки для частных домов достигают 100 лет, для многоквартирных – около 70 лет[5]. Во многих стандартах углерод, хранящийся 100 лет и более, условно считается постоянно удаленным, а более короткие сроки учитываются через кривые разложения[6].

Инструменты расчета. У Verra действует модуль VMD0005 для оценки пула долговечных древесных продуктов в лесных проектах[7]; кроме того, разрабатывается отдельный инструмент для расчета долговременного хранения углерода в продуктах лесозаготовки (Tool for Calculating Long-Term Carbon Storage in Harvested Wood Products, M0314), призванный обновить устаревшие коэффициенты пересчета, данные о сроках службы и сценариях утилизации[8].

3 Carbon storage in wood products (ResearchGate). https://www.researchgate.net/publication/320375411_Carbon_storage_in_wood_products

4 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

5 Valatin G. Carbon storage and substitution benefits of harvested wood products. Forest Research Note FRRN041, 2021. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2021/07/frrn041.pdf

6 Valatin G. Carbon storage and substitution benefits of harvested wood products. Forest Research Note FRRN041, 2021. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2021/07/frrn041.pdf

7 Verra. VMD0005 Estimation of Carbon Stocks in the Long-Term Wood Products Pool (CP-W). https://verra.org/methodologies/vmd0005-estimation-of-carbon-stocks-in-the-long-term-wood-products-pool-cp-w-v1-1/

8 Verra. Tool for Calculating Long-Term Carbon Storage in Harvested Wood Products (M0314, стадия разработки). https://verra.org/methodologies/tool-for-calculating-long-term-carbon-storage-in-harvested-wood-products/

Типы продуктов. Ниже приведены основные группы продуктов, рассматриваемых как носители долговременного хранения углерода (табл. 1).

Таблица 1. Основные типы продуктов для хранения углерода

Тип продукта	Примеры	Особенности хранения
Строительные материалы (несущие конструкции)	CLT, клееный брус (глюлам), каркасные конструкции, LVL	Наиболее длительный срок службы (50–100 лет); около 0,8 т CO_2 на 1 м^3 CLT или глюлама[9]; основной объект методологий
Биоизоляция и отделочные материалы	Древесноволокнистая изоляция, соломенные панели, хемпкрит	Меньшая плотность углерода (около 0,16 т CO_2/м^3 для древесноволокнистой изоляции[10]), но широкое применение
Мебель и интерьер	Мебель из массива, напольные покрытия, двери	Срок службы порядка 30 лет[11]; сложно отслеживать судьбу продукта
Долговечные изделия из биоматериалов	Древесные плиты, биокомпозиты, биопластики длительного пользования	Сроки хранения сильно варьируются; часто ниже 35-летнего порога

Технологическая готовность

› Технологии деревянного строительства являются зрелыми: уровень технологической готовности оценивается как TRL 8–9[12], а ряд исследователей характеризует использование древесины в строительстве как «немедленно применимый» (TRL 9) метод удаления[13]. Узким местом является не технология производства материалов, а инфраструктура учета: методологии количественной оценки, отслеживание судьбы продуктов и механизмы обращения углеродных единиц.

9 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

10 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

11 Valatin G. Carbon storage and substitution benefits of harvested wood products. Forest Research Note FRRN041, 2021. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2021/07/frrn041.pdf

12 Smith S. et al. The State of Carbon Dioxide Removal, 1st edition (2023). https://unfccc.int/sites/default/files/GST/2023-06/SoCDR-1st-edition.pdf

13 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

Масштабируемость › По оценкам State of CDR, перенос углерода в долговечные древесные продукты в мире составляет около 0,8 Гт CO_2 в год (в среднем за 2013–2022 гг.), а с учетом высвобождения из ранее созданного пула чистый сток – около 0,33 Гт CO_2 в год[14]. Потенциал масштабирования связан прежде всего с двумя направлениями:

— **строительный сектор:** при переходе к массовому деревянному строительству для новых городских жителей здания могут накапливать от 0,01 до 0,68 Гт углерода в год (в зависимости от сценария доли древесины – от 10 до 90 %), тогда как сегодня на древесину приходится около 0,5 % несущих конструкций[15];

— **замещение углеродоемких материалов:** использование древесины вместо цемента, стали и пластика дополнительно снижает выбросы, хотя этот эффект относится к сокращению выбросов, а не к удалению, и в существующих углеродных протоколах, как правило, не кредитуется[16].

Европейский союз рассматривает накопление углерода в продуктах как одну из трех категорий удалений в рамках CRCF – наряду с постоянными удалениями и углеродным земледелием[17].

2. Экономика CDR-проектов

Стоимость углеродной единицы. Прозрачного ценового индикатора для единиц хранения углерода в продуктах пока нет: рынок находится на стадии пилотов, сделки единичны и заключаются преимущественно напрямую. В качестве примера можно использовать следующую информацию:

— пилотная сделка Aureus Earth по зданию Founders Hall (Вашингтонский университет, США): общий объем поддержки 150 тыс. долларов при хранении более 1 тыс. т CO_2[18], что расчетно соответствует примерно 150 долларов за т CO_2[19].

14 The State of Carbon Dioxide Removal, 2nd edition (2024), Chapter 7. https://www.stateofcdr.org/asset/SoCDR-2nd-Edition-Chapter-7.pdf

15 Churkina G. et al. Buildings as a global carbon sink // Nature Sustainability, 2020. https://www.nature.com/articles/s41893-019-0462-4

16 FAO. Estimating carbon stocks in harvested wood products. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/10648ca9-bac4-4b7b-8ba5-231e739d8b36/content

17 European Commission. Carbon removals and carbon farming: Carbon storage in products. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en#carbon-storage-in-products

18 Aureus Earth and the University of Washington Execute Ground-Breaking Carbon Offset Transaction for a Mass Timber Building (2022). https://www.prweb.com/releases/2022/9/prweb18906508.htm

19 Senken. Carbon Credit Prices in 2026. https://www.senken.io/academy/carbon-credit-price

Особенности CAPEX / OPEX — цена за углеродную единицу. Специфика экономики направления состоит в том, что основные капитальные затраты (строительство здания, производство материалов) несет девелопер вне зависимости от наличия углеродного проекта, а доход от углеродных единиц составляет лишь небольшую долю стоимости строительства. Затраты на переход с традиционных материалов на древесину оцениваются как незначительные, однако затраты на стимулирование этого перехода остаются неопределенными[20].

Собственно затраты углеродного проекта включают:

— расчет углеродного баланса здания (LCA) и подготовку проектной документации;
— сбор подтверждающих данных о происхождении древесины (сертификаты FSC/PEFC, цепочка поставок);
— валидацию, верификацию и регистрацию единиц;
— долгосрочный мониторинг и формирование страхового (буферного) фонда на период хранения.

Высокая доля фиксированных затрат на MRV делает экономически оправданными в первую очередь крупные объекты (многоэтажное и коммерческое строительство), что отражено в требованиях методологий – например, Aureus Earth принимает проекты коммерческих и многоквартирных зданий площадью более 20 тыс. кв. футов (около 1,9 тыс. м²) [21].

3. Рыночная ситуация

Рынок находится в стадии формирования. Показательно, что крупнейший реестр CDR Puro.earth с января 2023 г. прекратил выпуск единиц по методологии Wooden Building Elements из-за недостаточной длительности хранения[22]. Это отражает общую тенденцию: ведущие покупатели CDR смещаются к долговечным удалениям, тогда как «продуктовые» единицы формируют отдельную нишу с собственными правилами учета.

На добровольном рынке единицы хранения в продуктах представлены в основном специализированными инициативами (Aureus Earth в США, Timber Finance в Швейцарии) и в составе лесных проектов (учет пула древесных продуктов в IFM-проектах). Ожидается, что ключевым драйвером развития станет не столько добровольный рынок, сколько регулирование ЕС: принятие методологии CRCF для хранения углерода в зданиях позволит выпускать сертифицированные единицы, признаваемые на уровне ЕС.

Основными источниками спроса являются:

— **крупные организации, стремящиеся к net zero,** — в первую очередь для компенсации остаточных выбросов в рамках портфеля удалений;

20 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

21 Think Wood. In Conversation: Aureus Earth. https://www.thinkwood.com/blog/in-conversation-aureus-earth

22 Senken. Buyer's Guide to Puro.earth Registry. https://www.senken.io/academy/puro

— **строительный сектор и девелоперы,** для которых единицы хранения служат инструментом инсетинга (учета в собственном углеродном балансе) и подтверждения низкоуглеродного профиля объектов;
— **институциональные инвесторы и банки,** заинтересованные в финансировании «зеленого» строительства и устойчивого лесопользования.

4. Обзор ключевых проектов

Политические инициативы. Политика стимулирования использования древесины в строительстве распространена в странах, где лесное хозяйство имеет большое экономическое значение: Австралии, Канаде, Японии, Финляндии и Новой Зеландии[23]. Одним из наиболее известных примеров является Wood First Act провинции Британская Колумбия (Канада), действующий с 2009 г. и обязывающий рассматривать древесину как основной материал при строительстве объектов с государственным финансированием[24].

Государственное регулирование:

— В соответствии с пересмотренной Директивой об энергетической эффективности зданий (EPBD) с 1 января 2028 г. в сертификате энергоэффективности новых зданий площадью более 1000 м² должен раскрываться показатель потенциала глобального потепления на протяжении жизненного цикла (life-cycle GWP), а с 1 января 2030 г. – для всех новых зданий[25]. Это создает стимул к применению материалов с низким воплощенным углеродом и учету хранящегося в них биогенного углерода.
— В рамках CRCF разрабатывается методология хранения углерода в зданиях. Проект технического документа, вынесенный на консультацию в декабре 2025 г., охватывает несущие конструкции из массивной древесины, CLT и клееного бруса, а также биоизоляцию; минимальный срок хранения — 35 лет, расчет основывается на экологических декларациях продукции (EPD)

23 FAO. Estimating carbon stocks in harvested wood products. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/10648ca9-bac4-4b7b-8ba5-231e739d8b36/content

24 FAO. Estimating carbon stocks in harvested wood products. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/10648ca9-bac4-4b7b-8ba5-231e739d8b36/content

25 CIF. EPBD: Current state of play (12.02.2026). https://cif.ie/2026/02/12/epbd-current-state-of-play/

по EN 15804[26]. По состоянию на начало 2026 г. Еврокомиссия завершает подготовку соответствующего делегированного акта[27].

Частные проекты:

- **Aureus Earth (США)** выпускает углеродные единицы за биогенный углерод в несущих конструкциях из массивной древесины по собственному протоколу Mass Timber Building Protocol. В пилотном проекте Founders Hall (шестиэтажное здание площадью 96 тыс. кв. футов) хранение превышает 1 тыс. т CO_2; углерод зарегистрирован как передаваемое имущественное право, а Aureus Earth гарантирует единицы на 100 лет через страховой фонд[28].
- **Timber Finance (Швейцария)** разработала методологию сертификации удалений в несущих конструкциях деревянных зданий. Первый объект – жилой комплекс Pünt (кантон Цюрих, 7050 м^2), в конструкциях которого хранится 1462 т CO_2; пилотная программа охватывает около 20 объектов, единицы могут продаваться на добровольном рынке или использоваться для инсетинга[29].
- **Проекты Verra и других стандартов,** в которых пул долговечных древесных продуктов учитывается как часть лесных проектов (прежде всего IFM).

5. Стандарты и методологии

Стандарты и климатические методологии

› Учет углерода в продуктах исторически развивался внутри лесных стандартов, где пул древесных продуктов (HWP) рассматривается как продолжение лесного углеродного пула:

26 European Panel Federation. Feedback on Carbon Storage in Buildings CRCF methodology (2026). https://europanels.org/wp-content/uploads/2026/01/EPF-Feedback-on-Carbon-Storage-in-Buildings-CRCF-methodology.pdf

27 Carbon removals and carbon farming: recent EU developments (03.2026). https://www.globalelr.com/2026/03/carbon-removals-and-carbon-farming-recent-eu-developments/

28 Aureus Earth and the University of Washington Execute Ground-Breaking Carbon Offset Transaction for a Mass Timber Building (2022). https://www.prweb.com/releases/2022/9/prweb18906508.htm

29 Timber Finance. Decarbonizing Buildings Now Possible Through Carbon Removal Credits (27.08.2024). https://timberfinance.ch/en/pr-decarbonizing-buildings-through-carbon-removal-credits/

— **American Carbon Registry (ACR)** – учет пула древесных продуктов в методологиях улучшенного лесопользования с горизонтом 100 лет;
— **California Air Resources Board (CARB)** – протокол U.S. Forest Projects для комплаенс-рынка Калифорнии учитывает углерод, остающийся в продуктах через 100 лет;
— **Climate Action Reserve (CAR)** – Forest Protocol с аналогичным подходом к учету древесных продуктов;
— **Verra (VCS)** – модуль VMD0005 и разрабатываемый инструмент M0314[30].

Специализированные «строительные» методологии пока единичны: собственные протоколы Aureus Earth и Timber Finance, а также будущая методология CRCF. Методология Puro.earth Wooden Building Elements выведена из обращения[31].

Методологии сертификации продуктов ›

Учет углерода в заготовленной древесине (Harvested Wood Products, HWP) регулируется руководящими принципами МГЭИК и применяется в национальных кадастрах парниковых газов. Существуют несколько подходов к учету: подход по производству (углерод приписывается стране, где заготовлена древесина), подход по потреблению и подход атмосферного потока. Например, в Великобритании, использующей подход по производству, импортная древесина (около 85 % конструкционных пиломатериалов) в учет не попадает[32]. Выбор подхода напрямую влияет на то, кто – лесовладелец, производитель или застройщик – может заявлять климатический эффект, и является источником риска двойного учета.

6. Преимущества

① **Двойной климатический эффект.** Помимо хранения углерода, древесина замещает цемент и сталь – одни из наиболее углеродоемких материалов, – снижая воплощенный углерод здания.

30 Verra. VMD0005 Estimation of Carbon Stocks in the Long-Term Wood Products Pool (CP-W). https://verra.org/methodologies/vmd0005-estimation-of-carbon-stocks-in-the-long-term-wood-products-pool-cp-w-v1-1/

31 Senken. Buyer's Guide to Puro.earth Registry. https://www.senken.io/academy/puro

32 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

② **Более низкая стоимость.** Дополнительные затраты на климатический эффект невелики: основной CAPEX несет девелопер в рамках обычного строительства, а углеродный проект требует преимущественно затрат на расчет и MRV.

③ **Сопряженность с регулированием.** Требования EPBD и CRCF в ЕС формируют устойчивый регуляторный спрос на учет хранения углерода в зданиях.

7. Вызовы и ограничения

① **Непостоянство хранения.** Хранение является временным (десятки лет), а риски реверсии связаны с пожарами, сносом, реконструкцией и сценарием утилизации. В LCA по умолчанию предполагается полное высвобождение биогенного углерода в конце жизненного цикла[33].

② **Экологические риски на стороне лесопользования.** Рост спроса на древесину может стимулировать интенсификацию лесозаготовок, создание монокультурных плантаций, увеличение применения удобрений и распространение инвазивных видов, что ведет к снижению биоразнообразия; в ряде регионов возрастают риски лесных пожаров.

③ **Методологические ограничения.** Риск двойного учета между лесными проектами (ARR, IFM), национальными кадастрами и проектами хранения в продуктах; спорность отнесения продуктов из существующих лесов к CDR[34]; временной фактор – неопределенность в оценке климатической ценности временного хранения по сравнению с постоянным.

④ **Дополнительность.** Сложно доказать, что решение о деревянном строительстве принято благодаря доходу от углеродных единиц, учитывая их малую долю в бюджете проекта.

⑤ **Утечка (leakage).** Сокращение заготовок в одном месте может компенсироваться ростом заготовок в другом.

33 Newman G., Spear M., Corbey S. Using Wood in Construction as a Significant Greenhouse Gas Removal Mechanism. Wood Knowledge Wales. https://woodknowledge.wales/wp-content/uploads/Using-Wood-in-Construction-as-a-Significant-GGR-Mechanism-FINAL.pdf

34 The State of Carbon Dioxide Removal, 2nd edition (2024), Chapter 7. https://www.stateofcdr.org/asset/SoCDR-2nd-Edition-Chapter-7.pdf

8. Особенности MRV (мониторинг, отчётность и верификация)

Что нужно отслеживать ›

— **Пул углерода** – объем и плотность использованных материалов, доля углерода, перевод в CO_2-эквивалент (на основе проектной документации и EPD).
— **Срок хранения** – подтверждение сохранности конструкций в течение всего периода (не менее 35 лет), фиксация сноса или реконструкции.
— **LCA** – выбросы на стадиях заготовки, производства, транспортировки и монтажа (модули A1–A5), вычитаемые из объема хранения, а также базовая линия (что было бы построено без проекта).

Специфика ›

— **Цепочка поставок.** Необходимо подтвердить происхождение древесины из устойчиво управляемых лесов и исключить двойной учет углерода с лесовладельцем – через сертификаты цепочки поставок (FSC/PEFC).
— **Конец жизненного цикла.** Методологии должны определять ответственность за реверсию после сноса и порядок учета повторного использования или переработки; в ЕС обсуждается освобождение от ответственности при документально подтвержденной переработке древесины в долговечные продукты [35].
— **Сравнительная простота мониторинга.** В отличие от запасов почвенного углерода, объемы материалов известны точно на стадии проектирования и монтажа, а здание является физически и юридически идентифицируемым объектом.

35 European Panel Federation. Feedback on Carbon Storage in Buildings CRCF methodology (2026). https://europanels.org/wp-content/uploads/2026/01/EPF-Feedback-on-Carbon-Storage-in-Buildings-CRCF-methodology.pdf

9. Социальные, экономические и экологические сопутствующие выгоды (co-benefits)

— **Экологические:** снижение воплощенного углерода зданий, стимулирование устойчивого лесопользования, развитие циркулярной биоэкономики через каскадное использование древесины.
— **Социальные:** улучшение микроклимата и благополучия жильцов, комфорт внутренней среды деревянных зданий.
— **Экономические:** сокращение сроков строительства за счет заводской готовности элементов (CLT, каркасные панели), развитие лесопромышленного комплекса и занятости в лесных регионах, дополнительный доход для лесовладельцев и девелоперов.

10. Российский опыт и потенциал реализации

Россия обладает крупнейшими в мире запасами леса и развитой традицией деревянного домостроения: по данным Росреестра, в январе–сентябре 2024 г. около трети (28%) площади введенного индивидуального жилья построено из дерева[36]. Тем не менее развитие направления сталкивается со следующими ограничениями:

— **Регуляторные.** Отсутствуют аналоги международных фреймворков (CRCF, требований EPBD к life-cycle GWP), а также специальная методология хранения углерода в продуктах среди климатических методологий, применяемых в российском реестре углеродных единиц. Учет углерода в продуктах слабо интегрирован в строительное регулирование; многоэтажное деревянное строительство ограничено противопожарными требованиями, нормативная база для CLT находится в стадии формирования.

36 РБК-Недвижимость со ссылкой на Росреестр (31.10.2024). https://realty.rbc.ru/news/672238659a7947c22ac3739e

— **Рыночные.** Российский рынок CDR развит слабо, спрос на углеродные единицы удаления низкий, а доступ к международному добровольному рынку ограничен. Производство CLT в стране находится на начальном этапе, а основная доля деревянного строительства приходится на малоэтажное ИЖС с низкой концентрацией объема и высокими удельными затратами на MRV.
— **Методологические.** Риск двойного учета с лесными климатическими проектами и национальным кадастром, а также необходимость подтверждения устойчивого происхождения древесины.

Вместе с тем наличие сырьевой базы и традиций деревянного домостроения создает предпосылки для развития направления при условии разработки национальной методологии и интеграции учета биогенного углерода в строительные нормы.

Глоссарий доклада по CDR

Основные понятия и учёт результата

Удаление CO_2 из атмосферы (carbon dioxide removal, CDR). Деятельность человека по извлечению атмосферного CO_2 и долговременному хранению углерода в геологических, наземных или океанических резервуарах либо продуктах. Естественное поглощение, непосредственно не вызванное человеком, к CDR не относится.

Сокращение и предотвращение выбросов (emission reductions and avoidance). Уменьшение поступления парниковых газов в атмосферу по сравнению с базовым сценарием. Сохранение существующего запаса углерода само по себе не является новым удалением CO_2.

Ч**истое удаление и валовое улавливание (net removal; gross capture).** Чистое удаление – объём долговременно сохранённого атмосферного CO_2 за вычетом связанных выбросов парниковых газов в пересчёте на CO_2-эквивалент в заданных границах расчёта. Для проекта учитывают базовый сценарий. Валовое улавливание – масса уловленного CO_2 до этих корректировок.

CO_2-эквивалент (CO_2 equivalent, CO_2-eq). Количество CO_2, эквивалентное климатическому воздействию данного количества другого парникового газа или смеси газов при выбранной метрике и временном горизонте.

Нетто-нулевые и нетто-отрицательные выбросы (net zero; net negative emissions). Нетто-нулевые выбросы CO_2 означают баланс антропогенных выбросов и удалений CO_2 за заданный период; нетто-отрицательные – превышение удалений над выбросами. Для баланса всех парниковых газов используют выбранную метрику пересчёта.

Улавливание и хранение CO_2 (carbon capture and storage, CCS). Улавливание CO_2 с последующим геологическим хранением. При происхождении CO_2 из ископаемого топлива или минерального сырья это сокращение выбросов; в составе CDR хранится углерод атмосферного происхождения.

Природные решения (nature-based solutions, NbS). Меры по охране, восстановлению, устойчивому использованию и управлению экосистемами для решения социальных, экономических и экологических задач с одновременной пользой для людей и биоразнообразия. Применяются, в частности, для смягчения изменения климата и адаптации к нему. Понятие шире CDR: удаление CO_2 – один из возможных результатов.

Базовый сценарий (baseline). Обоснованное описание того, что происходило бы без проекта; основа для сравнения выбросов, удалений и запасов углерода.

Дополнительность (additionality). Условие, при котором заявленное сокращение выбросов или удаление CO_2 не произошло бы без соответствующего вмешательства. В углеродном кредитовании оценивается роль стимулов от продажи единиц.

Мониторинг, отчётность и верификация (monitoring, reporting and verification, MRV). Процедуры количественной оценки, документирования и независимой проверки выбросов и удалений парниковых газов.

Продолжительность и постоянство хранения (durability; permanence). Продолжительность характеризует срок удержания углерода вне атмосферы; постоянство – сохранение результата во времени с учётом риска обратного высвобождения. Единого порога длительности для всех методов и программ нет.

Обратное высвобождение углерода (reversal). Возврат ранее сохранённого углерода в атмосферу, например вследствие пожара, изменения землепользования или нарушения хранилища.

Утечка выбросов (leakage). Рост выбросов за границами проекта, вызванный его реализацией, например переносом рубок. Отличается от физической утечки CO_2 из хранилища.

Основные типы проектов и способы хранения

Лесоразведение, лесовосстановление и восстановление растительности (afforestation, reforestation and revegetation, ARR). Создание леса на нелесных землях, возвращение леса на ранее обезлесенные земли и восстановление иного растительного покрова для увеличения запасов углерода.

Улучшенное лесопользование (improved forest management, IFM). Изменение управления существующими лесами. Компонент CDR связан с дополнительным увеличением долговременно сохраняемых запасов углерода; предотвращённые потери учитывают отдельно.

Накопление углерода в почвах (soil carbon sequestration). Увеличение запасов органического углерода в почвах вследствие изменения землепользования и методов ведения хозяйства.

Вторичное обводнение осушенных торфяников (rewetting of drained peatlands). Восстановление гидрологического режима осушенных торфяников. Относятся к проектам CDR смешанного типа.

Проекты голубого углерода (blue carbon projects). Сохранение и восстановление мангровых лесов, приливных солёных маршей и зарослей морских трав. Компонент CDR – дополнительное долговременное накопление атмосферного углерода в этих экосистемах.

Прямое улавливание CO_2 из воздуха с геологическим хранением (direct air carbon capture and storage, DACCS). Извлечение CO_2 непосредственно из атмосферного воздуха с последующим геологическим хранением. Улавливание без этапа хранения обозначается DAC (direct air capture).

Биоэнергетика с улавливанием и хранением CO_2 (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS). Получение энергии или топлива из биомассы с улавливанием образующегося биогенного CO_2 и его геологическим хранением.

Производство и хранение биочара (biochar carbon removal). Преобразование биомассы нагреванием при ограниченном доступе кислорода в богатый углеродом материал – биочар (биоуголь) – с последующим долговременным хранением, например в почве.

Ускоренное выветривание горных пород (enhanced rock weathering, ERW). Ускорение связывания CO_2 за счёт химического выветривания измельчённых горных пород, например базальта, содержащего силикаты кальция и магния. Породы обычно вносят в почву. Углерод сохраняется в растворённой неорганической форме и/или карбонатных минералах.

Минерализация углерода (carbon mineralization). Химическое связывание CO_2 в твёрдых карбонатных минералах. Для результата CDR связываемый углерод должен иметь атмосферное происхождение.

Хранение углерода биомассы (biomass carbon storage). Изоляция биомассы или продуктов её переработки, например биомасла, в инженерных или геологических хранилищах для ограничения разложения и долговременного удержания ранее поглощённого атмосферного углерода.

Хранение углерода в продуктах (carbon storage in products). Долговременное удержание атмосферного углерода в материалах и изделиях, например деревянных конструкциях или минерализованных строительных материалах. Углерод ископаемого происхождения к CDR не относится.

Проектная оценка и углеродный рынок

Стандарт, методология и реестр (standard; methodology; registry). Стандарт содержит требования программы; методология определяет правила оценки и мониторинга результата; реестр обеспечивает учёт проектов, выпуска, передачи и погашения единиц.

Валидация и верификация (validation; verification). Валидация – независимая оценка соответствия проекта установленным требованиям. Верификация – независимая проверка заявленного результата за отчётный период.

Углеродная единица и единица удаления (carbon credit; carbon removal credit). Единица учёта одной тонны CO_2-эквивалента подтверждённого сокращения выбросов или удаления по правилам программы. Единица удаления относится именно к удалению CO_2.

Двойной учёт (double counting). Повторный зачёт одного сокращения выбросов или удаления CO_2 в достижение климатических целей: через повторный выпуск или использование единиц либо зачёт одного результата несколькими сторонами.

Оценка жизненного цикла (life cycle assessment, LCA). Оценка экологических воздействий продукта или процесса на протяжении жизненного цикла. Для CDR позволяет учитывать выбросы всей цепочки, от получения сырья до хранения углерода.

Уровень технологической готовности (technology readiness level, TRL). Девятиуровневая шкала зрелости технологии: от наблюдения базовых принципов (TRL 1) до подтверждённой работы технологии в условиях эксплуатации (TRL 9).

Капитальные и эксплуатационные затраты (capital expenditures, CAPEX; operating expenditures, OPEX). CAPEX – вложения в создание и оснащение объектов; OPEX – расходы на их эксплуатацию.

Сопутствующие выгоды (co-benefits). Положительные экологические, социальные и экономические последствия проекта помимо основного климатического результата, например восстановление местообитаний или создание рабочих мест.

Основные принципы углеродных единиц (Core Carbon Principles, CCP). Десять принципов качества ICVCM (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market). Маркировка CCP применяется к единицам одобренных категорий в одобренных программах.

Сделки на спотовом рынке (spot transactions). Покупка уже выпущенных углеродных единиц с передачей покупателю в ближайший срок по условиям сделки. Такие сделки не предполагают ожидания будущего выпуска единиц.

Договор на будущие поставки (offtake agreement). Обязательство приобрести будущие объёмы углеродных единиц на согласованных условиях. Заключение договора не означает, что удаление уже произошло.

В ПОДГОТОВКЕ ДОКЛАДА ПРИНЯЛИ УЧАСТИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЛЕДУЮЩИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ООО «Центр технологий устойчивого развития»
ООО «ЦТУР»

Европейский университет в Санкт-Петербурге

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
НИУ ВШЭ

АК «АЛРОСА» (ПАО)

Kept (Кэпт)

Vlinder

2026