

Пять проектов покорения углерода в трех стихиях

Новые способы удаления углекислого газа должны обеспечивать низкую стоимость процесса

Александр Майборода

Глобальный четырехлетний конкурс XPRIZE Carbon Removal, объявленный Фондом Маска, приглашает новаторов и команды из любой точки планеты для создания и демонстрации решений, которые могут извлекать углекислый газ непосредственно из атмосферы или океанов и надежно и устойчиво улавливать его. Они должны создать технологию, которая может улавливать 1 т углекислого газа в день. Чтобы выиграть главный приз (призовой фонд конкурса – 100 млн долл. – является крупнейшим поощрительным призом в истории), команды должны продемонстрировать работающее решение в объеме не менее 1 тыс. т, удаляемых в год; смоделировать их затраты в масштабе 1 млн т в год и показать путь к достижению низкой стоимости в гигатонном масштабе.

Верхние слои океана

Проблема улавливания CO₂ из воздуха – крайне высокая стоимость процесса, в отличие от его перехвата у источника загрязнения – завода или электростанции. Сейчас типовая станция по переработке атмосферного воздуха и очистке его от углерода, тратит на каждую тонну от 600 до 1000 долл. А ведь необходимо аккумулировать гигатонны газа. Например, международная команда, действующая под эгидой НИК AVANTA-Consulting, предлагает решать проблему, используя наиболее благоприятные условия в трех природных средах – воздухе, воде и почве. Комплексное решение необходимо также потому, что даже очень эффективное удаление диоксида углерода из атмосферы без его удаления из океана, точнее из его верхних слоев, не даст результата.

В долгосрочной тысячелетней перспективе океан может поглотить из атмосферы примерно 85% антропогенного CO₂. Пока концентрация углекислоты в атмосфере продолжает расти, океаны будут продолжать поглощать CO₂. Однако эта реакция обратима. Если в будущем содержание CO₂ в атмосфере снизится, океаны начнут выпускать накопленный газ обратно в атмосферу.

Кроме того, велика доля CO₂, поступающего в океаны через реки, которые собирают почвенный диоксид углерода со стоками из речных бассейнов. Эти основные источники и поглотители диоксида углерода показаны на рис. 1. Поэтому и предлагается не одно, а группа решений, охватывающих три природных среды.

Удаление CO₂ имеет смысл, если энергия на эту работу берется из возобновляемых источников, использующих энергию Солнца, ветровых и водных потоков. Возобновляемые источники – низкоконцентрированные источники энергии, и это требует материало- и дорогих преобразователей. Поэтому для снижения затрат необходимо использовать особые зоны планеты, в которых, к примеру, ветровые или водные потоки имеют высокую удельную мощность.

Такие зоны имеются. Сейчас они не используются главным образом по причине высокой стоимости передачи недорогой полученной энергии. Однако в случае с удалением CO₂ эта энергия может потребляться на месте ее генерации, а это может дать искомое решение проблемы снижения затрат. И тут возможны варианты.

В почве, в небесах и низовьях рек

1. Бесплотинные гидроэлектростанции имеют удельную мощность 1 кВт/м² поверхности рабочей лопасти при скорости потока, равного 2,5 м/с. Однако в реках обычная скорость потоков 0,3–0,5 м/с.

В океанах наибольшая скорость постоянных течений 2,5 м/с, и такой скорости достигает только Гольфстрим; большею же частью скорость течения в океанах не превышает 0,5 м/с. Вместе с тем есть участки со скоростью течения до 4,2 м/с (15 км/ч). Здесь сила водного потока в 2,8 раза больше, а удельная мощность гидрогенератора выше в 4,6 раза с соответствующим эффектом сокращения затрат на удаление CO₂.

2. Значительно больший эффект обеспечивают ветровые электростанции (ВЭС). Типовые ВЭС эксплуатируются в местах, где среднегодовая скорость ветра составляет 6 м/с. Причем они включаются начиная со средней скорости ветра от 4,5 м/с и отключается при ветре более 25 м/с. Вместе с тем есть районы, где 300 дней в году скорость

ветра составляет 30–50 м/с и выше. И главное, существует *техническая возможность создания ветровой станции для таких воздушных потоков*.

Отдаваемая мощность пропорциональна третьей степени скорости ветра. В этом случае сила ветра повышается в 25–70 раз, а удельная мощность станции увеличивается в 125–580 раз. Это многократно сокращает стоимость генерируемой энергии, потребляемой при удалении CO₂. Соответственно можно ожидать сокращения стоимости изъятия углекислого газа с 1000 долл. до как минимум 50–100 долл. за тонну.

3. На планете есть низкотемпературные зоны, использование которых сокращает затраты на выделение CO₂ из воздуха. В некоторых регионах среднегодовая температура может составлять –60,1°C. Несложно дополнительно охладить воздух еще на 20°C аппаратными средствами. При температуре –78,5°C диоксид углерода утрачивает газообразное состояние и может быть выделен из воздуха при минимальных затратах энергии и соответствующем сокращении стоимости до 50–100 долл. за тонну.

4. Высокая концентрация углекислоты наблюдается и в почвенном воздухе. Установлено, например, что атмосфера Земли на 90% обеспечивается углекислым газом, основным источником углеродного питания растений, за счет его диффузии из почвенного воздуха. Почвенный воздух имеет почти такое же количество азота, как и атмосфера Земли, кислорода обычно в два раза меньше, а диоксида углерода больше в десятки и сотни раз!

В почвах с большим содержанием органического вещества концентрация CO₂ летом и весной увеличивается до 3–9%, притом что в надпочвенном атмосферном воздухе доля диоксида углерода составляет всего 0,04%. При этом избыток углекислоты часто действует угнетающе на растения – ее излишек (более 1%) подавляет прорастание семян и рост корневой системы. Большинство растений будет угнетено при содержании в почвенном воздухе менее 9–12% кислорода и более 1% углекислого газа. И это позволяет без вреда откачивать определенную долю газа. В конечном счете почвенные воды все равно растворяют CO₂ и выносят его в реки, выбрасывая по пути значительные его количества в атмосферу.

Максимальное содержание углекислоты в почвенном воздухе отмечается на глубине 0,9–1,8 м, где концентрация углекислого газа в течение всего года составляет 8–12%. В поверхностных горизонтах вследствие активного газообмена с атмосферой она понижается до 2% и падает до 0,04% в открытой атмосфере.

С позиции выяснения перспектив извлечения CO₂ из почвенного воздуха следует принять во внимание: минимальная среднегодовая эмиссия CO₂ наблюдается в почвах тундры – 0,3–0,7 т С/(га·год), максимальная – в черноземах – 6–8 т С/(га·год). Это значит, что при создании относительно простой недорогой дренажной системы почвенных газов на черноземах с 1,5 кв. км можно извлекать в среднем 1000 т углерода в год при малых энергозатратах из-за высокой концентрации CO₂.

5. Высокая концентрация CO₂ наблюдается также в реках, несущих

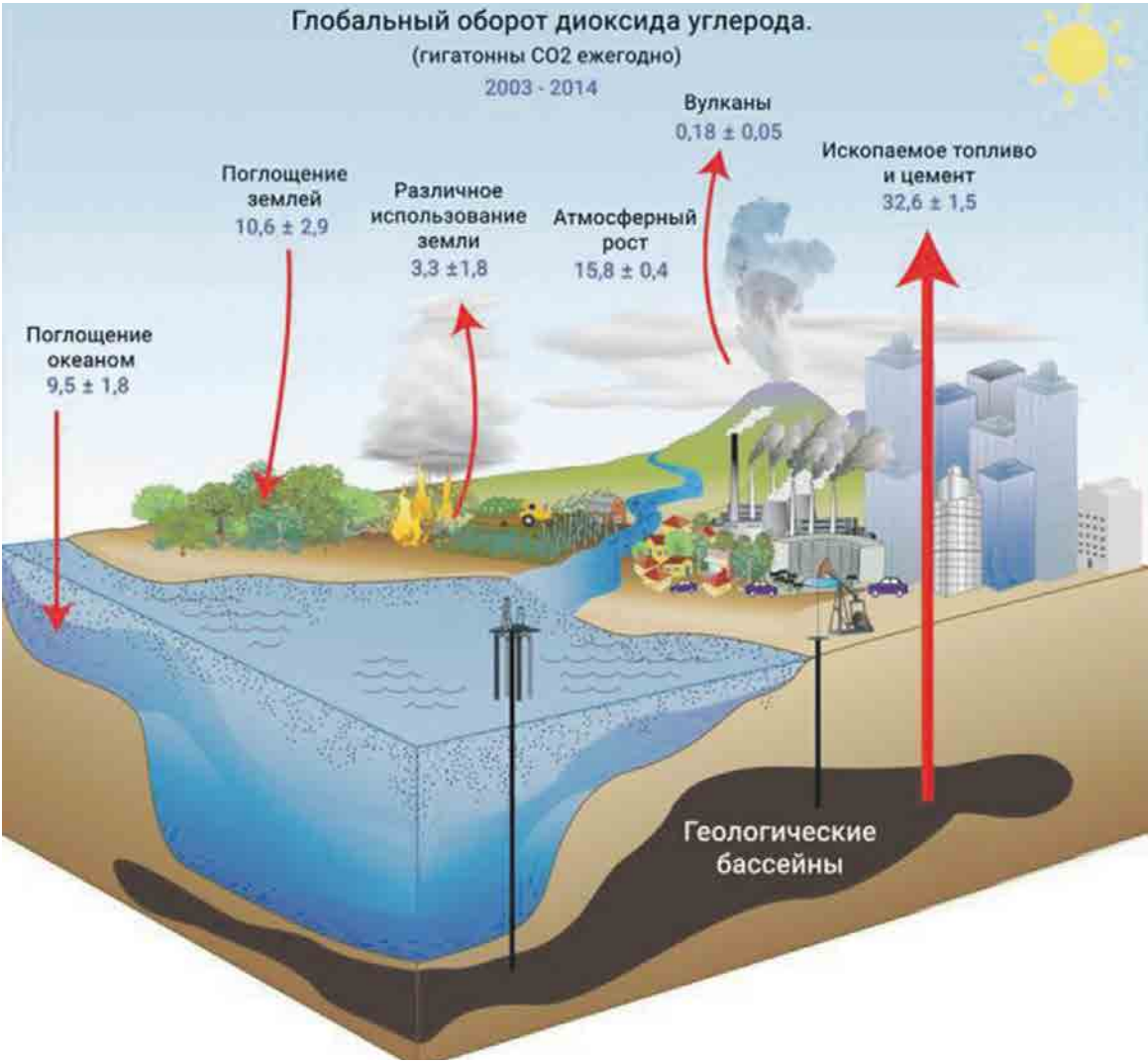


Рис. 1. Глобальный оборот CO₂.

Источник: авторская статья «Происхождение и открытие углекислого газа, круговорот его в природе и промышленности»

щих воды в океан. В речной воде концентрация диоксида углерода в 15–20 раз выше концентрации в океане. Если в океанской воде концентрация CO₂ равна 0,53 г/т, то в холодной речной – 8–11 г/т. Таковы реки, текущие на север: Енисей, Лена, Обь, Кола, Северная Двина и многие другие реки Сибири.

Пресные воды, обогащенные CO₂, растекаются из устьев рек по поверхности океана, где создают бинарный пресно-соленый слой, и концентрация газа постепенно снижается до обычных значений. Устья рек также должны характеризоваться повышенным выходом углекислого газа в атмосферу, так как его растворимость в соленой воде меньше, чем в пресной.

Таким образом, аппаратно-энергетические комплексы улавливания диоксида углерода разумно размещать не в океанах и морях, а в низовьях рек. Перехват диоксида углерода до его попадания в океан в 15–20 раз эффективнее благодаря его высокой концентрации и потоку обеспечивает требуемое радикальное снижение затрат.

Для перехвата CO₂ до его попадания в океан пригодны не только реки Сибири, но и реки Аляски и Канады. Реки регионов с теплым климатом также подходят: в их водах концентрация диоксида углерода все равно выше, чем в солевой воде. Исследования динамики углекислого газа в реках Wailuku и Wailoa и прибрежных водах «большого острова» Гавайев, показали значения, близкие к данным рек Сибири: концентрация газа 5–9,5 г/т, а залив был источником CO₂ в атмосферу.

6. Возможность использования геотермальной энергии для аккумуляции CO₂ и откачка его из газов, выходящих из трещин и разломов, называемых мофетами. Эти возможности хорошо исследованы и поэтому здесь не рассматриваются.

Углерод из пролива Дрейка

Рассмотрим возможные проекты использования перечисленных выше природных ресурсов для извлечения углекислого газа с учетом возможных условий реализации. Каждый из них имеет свои достоинства, и, наверное, некоторые из них могут быть реализованы в одной общей системе.

Первый проект достаточно прост с точки зрения реализации. Это автоматизированное надводное или подводное судно, зафиксированное в водном потоке, например, тросом, закрепленным на дне. Лопастный гидротурбинный приводится в движение океанским течением. Генерируемая энергия используется для улавливания CO₂ из атмосферы и/или воды. Там же на борту судна производится преобразование CO₂ в нелетучую форму – для последующего захоронения или продажи в зависимости от типа производимого вещества. В случае разложения диоксида на углерод и кислород пресованные блоки технического углерода могут сбрасываться за борт как биологически безвредные – подвергаться захоронению на дне океана.

В качестве источника энергии выгодно использовать океаническое течение Гольфстрим. Заметим, что размещение установки в проливе Дрейка в 4,6 раза выгоднее, чем в Гольфстриме. Однако из-за штормовых волн (до 15 м) и проходящих через пролив айсбергов (преимущественно в южной части пролива) судно желательно размещать под водой на глубине 25–50 м с возможностью регулировки глубины погружения. Пролив имеет глубины более 5000 м, что создает определенные, но некритичные сложности с постановкой судна на якорь.

В проливе Дрейка можно разместить большую группу таких судов: в самой узкой части его ширина составляет не менее 820 км.

Второй проект также одним из мест реализации предполагает пролив Дрейка. В проливе постоянный западный ветер, иногда достигающий 35 м/с (126 км/ч). Предполагается возможным использование закоренного подводного судна, которое при слабом волнении всплывает и раскрывает лопасти ветрогенератора. Такой аппарат для генерации энергии использует водный и воздушный потоки. Тем не менее лучшим местом ветрогенератора будет не океан, а суша, где нет проблем с устойчивостью из-за штормовых волн.

Перспективное место размещения улавливателя CO₂ – гренландский ледяной щит на восточном побережье Гренландии. Здесь дует холодный ветер Питераг (Pitærag). Скорость достигает 50–80 м/с зимой и 20–40 м/с – летом. Зимой мощность ветрогенератора в 580–2370 раз выше мощности тихоходного ветряка.

Другое выгодное место размещения – берега Восточно-Сибирского моря на подветренной стороне певекского хребта. Здесь дует южак – сильный юго-восточный арктический ветер, который по механизму возникновения относится к так называемым подветренным бурям. Скорость южака может достигать 35–50 м/с, а территория, на которой он проявляется, составляет 20–40 кв. км, что удобно для размещения большой группы установок. Ветер возникает в любое время года и может дуть неделями без остановок.

Ледяное плато Антарктиды, пожалуй, самое лучшее место для размещения энергогенерирующего оборудования для улавливателей CO₂. Здесь возникают стоковые ветры – перенос выхолаженного воздуха по наклону местности в сторону океана. По мере приближения воздуха к береговой линии в нижних 100–200 м могут развиваться очень большие скорости ветра (до 20 м/с и более). Стоковые ветры делают многие районы побережья Антарктиды самыми ветренными местами на земном шаре.

Частота и скорость ветров у окраин континента и над океаном весьма велики. Скорость стоковых ветров, например, составляет 30–50 м/с, а при отдельных порывах достигает 90 м/с. В отдельных районах побережья бури особенно часты. В таких областях за год бывает до 340 дней с бурями. Повторяемость ураганов и штормов очень велика. В Мирном, например, за год бывает около 250 штормовых дней, а на австралийской станции «Моусон» – более 300 дней.

Большая скорость ветра не является препятствием для использования ветрогенераторов: аналогичные системы работают в режиме электродвигателей винтомоторных самолетов при еще большей скорости потоков воздуха. Некоторые модели экранопланов с электродвигателями обеспечивают скорость полета 80 м/с (290 км/ч), что соответствует скорости максимального скорости стокового ветра. Поскольку электромоторы – это электрогенераторы наоборот, то силовая установка гидросамолета – это пример штормового ветрогенератора.

Проблему создают порывы ветра и обледенение трущихся частей. Однако известна конструкция генераторов (Vortex), которые вообще не содержат вращающихся частей и генерируют энергию за счет вибрации стержневого корпуса. В планах автора изобретения постройка 140-метровой установки мощностью 1 МВт. Такие устройства очень устойчивы к суровым условиям эксплуатации в Антарктике. На рис. 2 показана стержневая ветрогенерирующая установка.

Пока экспериментальный образец имеет в высоту всего 3 м. Он представляет собой вытянутый цилиндр на подвижной опоре, способный колебаться вперед-назад под действием напора ветра. В основании цилиндра имеются два кольцевых отталкивающих магнита, которые возвращают ее в исходное положение при наклоне. За счет таких движений, частота которых зависит от силы ветра, и происходит генерация электроэнергии. Отсутствие вращающегося генератора не позволит ему замерзнуть во время зимних штормов, как это происходило со многими ветряками в Техасе в феврале 2021 года.

Третий проект также связан с Антарктидой. Здесь удачно сочетаются постоянные ветры и низкие температуры, облегчающие вымораживание диоксида углерода из воздуха. В некоторых регионах Юго-Восточной Антарктиды среднегодовая температура может составлять –60,1°C. На российской станции «Восток» с апреля по сентябрь минимальная температура воздуха ниже –80°C, а среднемесячная ниже –70°C. При этом почти до середины апреля и с начала третьей декады сентября на станции средняя температура выше –70°C.

Экономия энергии на криогенной дистилляции CO₂ дает ресурс для разложения диоксида на углерод и кислород, например, методом электрофореза – карбоната лития или водного раствора газа. Прессованные брикеты углерода могут складироваться в углублениях ледяного плато или сбрасываться в океан для захоронения на дне.

Четвертый проект – дренажное плодородных почв для получения доступа к почвенному воздуху с высокой концентрацией CO₂ – от 3–9% до 20% в некоторых случаях. Предварительный анализ показывает, что газовый дренаж 1 кв. км площади может обойтись в 200–300 тыс. долл. С учетом 50-летнего срока службы пластиковых элементов дренажной системы и при улавливании до 800 т CO₂ ежегодно удельная стоимость выделения газа составит 5–7,5 долл. за тонну (без учета дисконтирования и энергозатрат). При высокой концентрации газа в воздухе издержки по его выделению в десятки и сотни раз меньше, чем при концентрации в 0,04%.

Пятый проект – улавливание CO₂ из речных вод Сибири, Аляски и Канады. Аппаратное решение очень простое. Поток речной воды пропускается через емкость с техническим вакуумом, что приводит к дегазации воды. Разряженный газ откачивается из емкости и утилизируется. Поскольку концентрация углекислого газа в воде этих рек в 15–20 раз выше, то энергозатраты пропорционально ниже в сравнении с дегазацией воды океанов. Получение 1 т CO₂ в сутки возможно при мощности насосов в диапазоне 130–150 кВт. Энергоснабжение должно обеспечиваться ветровой и гидростанциями.

Возможно, все рассмотренные направления будут реализованы. Некоторые из них, полностью новаторские, могут быть запатентованы по патентным правилам России и США в течение 6 и 12 месяцев соответственно. Однако на данный момент требуется предоставить одно эффективное решение, воплощенное в металле. Команда стартапа выберет одно из рассмотренных направлений для подготовки демонстрационного аппаратного комплекса с производительностью 1 т CO₂ в сутки. Наилучшее вероятным кандидатом является система выделения CO₂ из речной воды. Декarbonизация речных стоков решает сразу две проблемы: удаление диоксида углерода из верхних слоев океана и защиту атмосферы от CO₂, выделяющегося из воды. Конструктивно система проста – это комбинация труб, баллонов и насосов. ■

Александр Олегович Майборода – руководитель научно-исследовательской компании «АВАНТА-Консалтинг», участник рабочей группы SpaceNet, подразделения AeroNet НТИ, член организации содействия развитию космической деятельности «Московский космический клуб».



Рис. 2. Стержневая ветрогенерирующая установка (проект). Пока экспериментальный образец имеет в высоту 3 метра.

Фото из архива автора