

УДК 574.22 : 334.021.1

УГЛЕРОДНЫЕ ПОЛИГОНЫ КАК ИСТОЧНИК ДАННЫХ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

© 2023 А.В. Власов, В. И. Глотов

Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 10.08.2023

Круговорот углерода играет важную роль в экосистеме Земли и имеет решающее значение для понимания изменения климата. В этой статье рассматриваются концепции углеродных полигонов и углеродных ферм как инновационных подходов к сокращению выбросов углерода и продвижению методов устойчивого развития. Эти участки облегчают разработку и адаптацию технологий измерения связывания углерода, агрохимических исследований почвы и сравнения выбросов и поглотителей парниковых газов в различных экосистемах. Создание углеродных полигонов в России, таких как проект «Карбон», позволяет проводить точные измерения поглощения углерода и тестировать различные методы связывания углерода. С другой стороны, углеродное земледелие, которое рассматривается как дальнейшее развитие, направлено на максимальное поглощение углекислого газа наземными экосистемами. Этот подход включает в себя стратегическое внедрение высокоэффективных технологий и выращивание растений, которые преуспели в улавливании и хранении углерода. Успех углеродных полигонов и инициатив по выращиванию углерода зависит от различных факторов. Международное сотрудничество и обмен знаниями имеют решающее значение для продвижения исследований, разработки стандартизированных методологий и создания глобальной системы измерения поглощения углерода.

Ключевые слова: накопление углекислого газа, полевые исследования, углеродный полигон, экологический след.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-300-305

EDN: PDESGF

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность в значительной степени зависит от добычи ископаемого топлива, которое представляет собой органические остатки, такие как нефть, сланец и уголь. Они обеспечивают энергию для накопления органического углерода. Сжигание этих остатков выбрасывает в атмосферу углекислый газ и водяной пар. По мере использования большего количества источников углерода в атмосфере накапливается больше углекислого газа, что затрудняет его удаление. Избыток углерода в атмосфере может привести к экстремальным изменениям климата, таким как глобальное потепление, повышение уровня моря, опустынивание и таяние вечной мерзлоты, а также к другим необратимым последствиям для глобальных экосистем.

Чтобы предотвратить угрозу человечеству, нужны технологии удаления накопленного углекислого газа из атмосферы и перехода на альтернативные источники энергии, такие как солнечная или ветровая энергия [1]. Декар-

бонизация является глобальным трендом 21 века. Климатическая повестка, установленная Киотским протоколом и Парижским соглашением, призывает страны сократить выбросы углекислого газа и уменьшить свой «экологический след» [2]. Однако достижение целей декарбонизации — сложная задача, требующая значительных инвестиций в исследования и разработки, инфраструктуру и изменения политики.

Одним из решений по снижению выбросов углерода является улавливание и хранение углерода (CCS), то есть процесс улавливания углекислого газа из промышленных выбросов или непосредственно из атмосферы с последующим его хранением под землей или в других решениях для долгосрочного хранения. Другие альтернативные источники энергии включают ядерную энергию, гидроэнергетику, геотермальную энергию и биотопливо [3]. Усилия по декарбонизации имеют решающее значение для ограничения глобального потепления менее чем на 2 градуса Цельсия выше доиндустриального уровня, что является целью, установленной Парижским соглашением.

Европейский Союз подготовил и уже поэтапно внедряет «Механизм корректировки углеродных лимитов (Carbon Border Adjustment Mechanism

Власов Александр Владимирович.

E-mail: alexvv220@gmail.com

Глотов Владимир Иванович, кандидат экономических наук, профессор, академик РАН, помощник директора.

E-mail: v.glotov@lebedev.ru

(СВАМ)) [4]. Подписав регламент 10 мая 2023 года, сам СВАМ должен вступить в силу 1 октября 2023 года, а первый отчетный период завершится 31 января 2024 года. СВАМ — это важный инструмент для установления справедливой цены налога на углерод, выбрасываемый в атмосферу при производстве углеродоемких товаров, поступающих в ЕС, и для поощрения более чистого промышленного производства в странах, не входящих в ЕС [4]. Постепенное введение СВАМ согласуется с поэтапным отказом от предоставления бесплатных разрешений в рамках Системы торговли выбросами ЕС (ETS) для поддержки декарбонизации промышленности ЕС [4].

Россия также готовится к новым экологическим вызовам с помощью научных средств, разрабатывая углеродные полигоны и фермы под эгидой Министерства науки и высшего образования Российской Федерации [3]. Министерство намерено создать в стране не менее 80 таких научных площадок, начиная с семи пилотных регионов от Калининграда до Сахалина. Проекты по захоронению углеродных отходов позволят эффективно оценивать количество углерода в атмосфере [5]. Эти проекты помогут России достичь своих климатических целей и внести свой вклад в глобальные усилия по декарбонизации.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ УГЛЕРОДНЫХ ПОЛИГОНОВ

Первый углеродный полигон был открыт в Калужской области компанией Ctrl2GO в сентябре 2020 года в Национальном парке «Угра» площадью 600 га. Его роль заключается в измерении точного количества поглощенного CO_2 [3]. Первое на что следует обратить внимание, что вся территория сканируется со спутника в различных спектральных диапазонах для получения всей полноты картины выработки углерода. Потом этот же участок сканируется с помощью беспилотных летательных аппаратов. Сам полигон нужен для сопоставления данных полученных в результате космического зондирования и данных полученных с дронов. Получение точных данных, их последующие обработка и анализ позволят обозначить тестируемые зоны для дальнейшей экстраполяции результатов. Более того, полученные данные позволяют также мониторить поглощающую способность разных типов ландшафтов [6]. Вихревая ковариация и почвенные камеры являются двумя наиболее точными методами точечных оценок потоков парниковых газов [7]. Однако инструменты дистанционного зондирования, такие как сканирующие мультиспектральные камеры на дронах или спутниках, предпочтительнее при оценке общего потока парниковых газов на больших территориях, таких как леса или даже целые страны. Данные дистанционного зондирования

могут обеспечить комплексные пространственные и временные оценки выбросов и поглощения парниковых газов, хотя они могут быть не такими точными, как наземные методы [7].

Одним из перспективных способов повышения поглощающей способности территорий является накопление углерода за счет роста зеленой массы. Деревья и кустарники поглощают углекислый газ из атмосферы в процессе фотосинтеза и сохраняют его в своей биомассе [8]. Различные виды деревьев и кустарников обладают разной способностью накапливать углерод во время роста, и исследователи изучают, какие виды наиболее эффективно улавливают углерод [8]. Кроме того, исследователи изучают способность морских культур и растительных сообществ в болотах поглощать углерод, что может предоставить дополнительные возможности для связывания углерода.

Секвестрация углерода — еще один подход к сокращению выбросов парниковых газов. Он включает улавливание и хранение атмосферного углекислого газа с помощью естественных процессов, таких как фотосинтез, или технологических средств, таких как улавливание и хранение углерода. CCS включает в себя улавливание углекислого газа в промышленных процессах, его транспортировку к месту хранения и хранение под землей [7]. Хотя CCS обладает потенциалом для значительного сокращения выбросов парниковых газов, это все еще относительно новая технология, которая сталкивается с такими проблемами, как высокая стоимость и потенциальные риски для окружающей среды.

Другой подход к увеличению поглощающей способности территорий заключается в использовании методов управления почвой, таких как нулевая обработка почвы и посев покровных культур. Эти методы могут увеличить количество углерода, хранящегося в почве, что может помочь смягчить изменение климата [1]. Также важно отметить, что на поглощающую способность территорий могут влиять различные факторы, включая изменения в землепользовании, вырубку лесов и деградацию почв.

ПРОБЛЕМАТИКА И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПОЛИГОНОВ

Важной составляющей проекта углеродных полигонов является международное сотрудничество и государственное участие.

Оценка углеродного цикла в природных экосистемах сложна и многогранна и требует знаний в области метеорологии, почвоведения, биологии и химии. Точное измерение потоков газообразных примесей также необходимо для понимания углеродного цикла и разработки эффективных стратегий смягчения последствий изменения климата [1]. Несмотря на важность этих областей

науки, у молодых исследователей отсутствует интерес к карьере в области окружающей среды и метеорологии. Это привело к нехватке специалистов в области учета выбросов углерода, а также персонала для работы на углеродных полигонах, особенно учитывая вопросы экологической безопасности и оценки климатических рисков. Чтобы восполнить этот дефицит углеродные полигоны запускают при прямом участии различных университетов, что позволяет способствовать подготовке молодых специалистов в этих областях. Университеты, которые сотрудничают с углеродными полигонами или эксплуатируют их, запускают магистерские программы, специальные курсы и программы повышения квалификации для обучения студентов рациональному природопользованию, метеорологии, почвоведению, экологической безопасности и искусственному интеллекту в науках о Земле [1].

Создание единой базы данных, освещение результатов исследований и обмен научными данными стали возможны благодаря сотрудничеству между углеродными полигонами, университетами-партнерами и исследовательскими организациями [8]. Это может привести к изменению формулы, используемой для определения экспортного налога на выбросы углерода для товаров, произведенных российскими предприятиями. Международное сотрудничество также может помочь в создании новых методов и технологий для уменьшения последствий изменения климата [9]. Например, страны могут работать вместе над созданием и внедрением технологий улавливания и хранения углерода, которые могут значительно снизить выбросы парниковых газов. Совместные исследования также могут помочь в определении наиболее эффективных способов улучшения секвестрации углерода и сокращения выбросов, что может стимулировать расходы на НИОКР и способствовать принятию политических решений.

Измерение и мониторинг потоков CO_2 необходимы для понимания источников и поглотителей газа и оценки эффективности стратегий смягчения последствий, причем для одновременного мониторинга углеродного баланса больших территорий необходима сеть полигонов.

В дополнение к созданию единой базы для обмена данными и развитию международного сотрудничества также важно повышать осведомленность общественности и вовлекать ее в проект по созданию углеродных полигонов. Мероприятия просвещения и участие общественности могут помочь усилить поддержку экологической политики и инициатив и повысить осведомленность о последствиях изменения климата. Взаимодействие с общественностью может принимать различные формы, такие как программы по работе с населением, образовательные мероприятия и онлайн-встречи.

Кроме того, сам проект углеродных полигонов может выиграть от сотрудничества с партнерами из частного сектора. Частные компании могут предоставить опыт, финансирование и ресурсы для проекта, помогая ускорить исследование и разработки [10]. Сотрудничество с частными компаниями также может способствовать внедрению новых технологий и подходов к смягчению последствий изменения климата и развитию новых бизнес-моделей, в которых приоритетом является экологическая устойчивость.

Более специфической частью полигонов является углеродная ферма, где внедряются высокоэффективные технологии поглощения углекислого газа наземными экосистемами. Углеродные фермы необходимы для максимально активного поглощения углекислого газа растительным миром, в том числе лесами, плантациями конкретных растений или сельскохозяйственными угодьями, на которых используются уникальные агротехнологии.

Концепция углеродной фермы была впервые опробована на углеродном полигоне в Калужской области, где вместе с другими древесными растениями были высажены саженцы павлонии, которая очень хорошо растет в городских условиях. Она может захватывать больше углекислого газа, пыли и шума и выделять в четыре раза больше кислорода, чем другие растения. Этот вид деревьев широко используется для озеленения городов.

В данной области земледелия для «испытаний» используют неприхотливые растения, обладающие высокой зимостойкостью и теневыносливостью [6]. К таким растениям относятся горец Вейриха, молочай сирийский, щитовник шаровидный. Эти растения не оставляют после себя вредных веществ и могут быть безопасно утилизированы. Некоторые из этих видов растений также используются в качестве биотоплива, а другие используются в качестве пищи для людей и животных.

Углеродное земледелие предлагает многообещающее решение для снижения выбросов углекислого газа, особенно в городских условиях [11]. Кроме того, углеродное земледелие может помочь восстановить деградировавшие земли и повысить устойчивость экосистем к изменению климата [12]. Также описано уменьшение негативного воздействия изменения климата на здоровье человека [3].

Одним из наиболее значительных преимуществ углеродного земледелия является его способность обеспечивать экономические выгоды для фермеров и землевладельцев и как следствие обеспечение роста количества продовольствия [6].

Хотя уже есть разработанные методы для количественной оценки, моделирования и прогнозирования количества углерода, для

успешного моделирования циркуляции углерода в экосистемах необходимо получение регионально выверенных оценок скоростей всех переходов и силы регулирующих их факторов. К этим факторам относятся тип растительности и биотопа, тип почвы, сукцессионная стадия развития экосистемы, возраст леса, температура, влажность, климат, антропогенное воздействие, загрязнение, удобрения. Для количественной оценки выбросов и хранения парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в естественных и преобразованных ландшафтах ученые используют комбинацию наземных и дистанционных методов, чтобы понять пространственную и временную изменчивость связывания углерода [3].

Эти усилия направлены на разработку проверенной на региональном уровне методологии, которая учитывает ожидаемые изменения климата, определяет объем связывания углерода наземными экосистемами и разрабатывает оптимальные основные технологии для мониторинга связывания углерода [10]. Эта долгосрочная стратегическая цель до 2030–2035 годов, работа в настоящее время включает количественную оценку выбросов и запасов парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в естественных и трансформированных ландшафтах Свердловской области путем объединения результатов наземных и дистанционных методов для понимания пространственной и временной изменчивости депонирования углерода и динамики потоков климатически активных газов [3]. Еще одной целью является разработка технологии ассимиляции разнородных данных (спутниковых и наземных; инвентаризационных, дистанционных и прямых измерений) в стандартную модель источников и поглотителей на территории региона и Российской Федерации.

Исследования, проводимые на основе углеродного спектра, имеют потенциал для отслеживания выбросов парниковых газов и оценки их масштабов, а также роли поймы Оби в регуляции климата и насыщении мирового океана парниковыми газами. Было замечено, что концентрация углерода значительно влияет на окружающую среду, что может привести к негативным последствиям как для природы, так и для человека. Например, в Арктике уже происходят движения грунта, которые могут нанести ущерб инфраструктуре, такой как дороги, трубопроводы и здания [7]. Такие перемещения в первую очередь связаны с таянием вечной мерзлоты, которая накапливала углерод на протяжении тысячелетий. Высвобождение этого углерода может вызвать крупномасштабные выбросы парниковых газов в атмосферу, что подчеркивает важность мониторинга уровня

углерода в различных экосистемах [7]. Получение таких данных необходимо для оценки текущей ситуации и понимания влияния антропогенных факторов на трансформацию экосистем.

Из вышеописанного очевидно преимущества и тенденции развития углеродных полигонов и ферм. Однако отмечено, что наблюдаются сложности в мониторинге и обработке данных. Для ясности и прозрачности проектов необходимы точные количественные методы оценки работы углеродных полигонов и ферм. Существующие расчетные способы оценки недостаточно точны, а системы непрерывного мониторинга достаточно дорогие по стоимости и времени внедрения. Чтобы решить данную проблему, необходимы алгоритмы на основе искусственного интеллекта, обрабатывающие данные гораздо быстрее.

Таким образом, углеродный полигон можно рассматривать как модель для получения верифицированной системы дистанционного зондирования, и в дальнейшем применять ее на менее заселенных территориях, где наземный мониторинг невозможен.

Новый подход к автоматическому анализу данных, получаемых на углеродных полигонах и фермах, может быть основан на количественной оценке выбросов и секвестрации углекислого газа с помощью наземных измерительных станций и спутниковых данных. Причем данная система особенно эффективна на территориях данного типа, поскольку они оснащены уже достаточным количеством разнообразных датчиков, территория доступна и легко контролируема.

В представленном подходе предлагается использовать наземные станции для измерения концентрации газов в атмосфере, а также другие параметры необходимые для количественной оценки выбросов или секвестрации углекислого газа, спутниковые данные в ближнем инфракрасном (NIR) и тепловом (TIRS) спектральных диапазонах.

Полученная информация позволит на основе наземных данных о текущих значениях концентрации газов в приземном слое, спутниковых данных о распределении концентрации в атмосфере и метеорологических данных построить модель распространения парниковых газов с применением математических моделей для точной количественной оценки выбросов или секвестрации.

Сводную информацию можно интегрировать с внешними системами, такими как реестры углеродных единиц, биржи и т.д.

Система позволит модернизировать систему обработки данных и изменить кадровый вопрос, актуализировав трудоустройство для молодых специалистов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены методы анализа и измерения секвестрированного углерода и выбросов парниковых газов в атмосфере на примере углеродных полигонов. Рассмотрены примеры инновационных исследований в углеродном земледелии, которые показали свою перспективность.

Рассмотрены факторы, влияющие на развитие и внедрение углеродных полигонов и ферм, и участие государственных, частных и международных организаций в данном направлении.

Обозначена основная проблема в использовании и интерпретации данных, полученных с углеродных полигонов и ферм, обработки и точности данных мониторинга из различных источников. Рассматриваемая система из наземных станций и спутниковых данных подходит для получения автоматизированной модели дистанционного мониторинга, верифицированной с помощью данных наземного мониторинга. Кроме того, полученные данные по количественной оценке можно интегрировать во внешние системы, что повысит ясность и эффективность работы реестров и бирж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафин, Р.Ф. Научные направления и задачи карбоновых полигонов / Р.Ф. Мустафин, А.Ф. Хазипова, А.Р. Хафизов // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК 2022. – С. 239-244.
2. Полякова, А.С. Карбоновые полигоны как необходимость XXI века: особенности и перспективы развития в Российской Федерации / А.С. Полякова // Сборник трудов. – 2022. – С. 84-90.
3. Третьяков, Е.В. Развитие карбоновых полигонов в России / Е.В. Третьяков, Д.А. Стратичук // Digital. – 2022. – 3(2). – С. 72-76.
4. European Commission. 2023. CBAM Factsheet. EUGreenDeal. URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (дата обращения 12.07.2023).
5. Зиновьева, И.С. Создание карбоновых полигонов как способ достижения углеродной нейтральности / И.С. Зиновьева, А.С. Сычева // Трансформация экономических систем: низкоуглеродная экономика и климатическая политика. – 2022. – С. 23-28.
6. Гессен, С.М. Карбоновые полигоны, новый инструмент управления климатическими изменениями в Российской Федерации / С.М. Гессен, А.М. Воротников // Журнал социологических исследований. – 2021. – № 6(2). – С. 22.
7. Гессен, С.М. Карбоновые полигоны - новый научно-образовательный проект для Арктики / С.М. Гессен, А.М. Воротников // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. – 2021. – № 2. – С. 98-104.
8. Глуховская, М.Ю. Актуальные вопросы создания сети карбоновых полигонов / М.Ю. Глуховская, Т.А. Евстифеева // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности. – 2021. – С. 59-63.
9. Харитонова, Н.А. Углеродный след России: реалии и перспективы экономического развития / Н.А. Харитонова, Е.Н. Харитонова, В.Н. Пуляева // Russian Journal of Industrial Economics. – 2021. – № 14(1). – С. 50-62.
10. План исследований на карбоновом полигоне «Урал-Карбон» в 2023-2025 гг. URL: https://ural-carbon.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_28853/about/plans_Ural-Carbon.pdf (дата обращения 12.07.2023).
11. Карбоновые полигоны. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony> (дата обращения 12.07.2023).
12. Российская академия наук одобрила проект воронежских ученых из ВГЛУ. – URL: <https://carbon-polygons.ru/news/rossijskaya-akademiya-nauk-odobrila-proekt-voronezhskix-uchenyix-iz-vglu> (дата обращения 14.07.2023).

CARBON POLYGONS AS A SOURCE OF CARBON FOOTPRINT DATA OF HUMANKIND

© 2023 A.V. Vlasov, V.I. Glotov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The carbon cycle plays an important role in the Earth's ecosystem and it is crucial for understanding climate change. This article explores the concepts of carbon polygons and carbon farms as innovative approaches to reduce carbon emissions and promote sustainable development practices. These areas facilitate the development and adaptation of technologies for measuring carbon sequestration, soil agrochemical studies, and comparing greenhouse gas emissions and absorbers in different ecosystems. The establishment of carbon polygons in Russia, such as the "Carbon" project, allows for accurate measurements of carbon sequestration and testing of different carbon sequestration methods. On the other hand, carbon farming, which is seen as a further development, aims to maximise the uptake of carbon dioxide by terrestrial ecosystems. This approach involves the strategic introduction of highly efficient technologies and the cultivation of plants that excel at carbon capture and storage. The success of carbon polygons and carbon farming depends on a variety of factors. International cooperation and knowledge exchange are critical to advancing research, developing standard methodologies and establishing a global system for measuring carbon sequestration.

Key words: carbon dioxide accumulation, field studies, carbon polygon, ecological footprint.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-300-305

EDN: PDESGF

REFERENCES

1. *Mustafin, R.F.* Nauchnye napravleniya i zadachi karbonovyh poligonov / R.F. Mustafin, A.F. Hazipova, A.R. Hafizov // *Sovremennoe sostoyanie, tradicii i innovacionnye tekhnologii v razvitii APK 2022.* – C. 239-244.
2. *Polyakova, A.S.* Karbonovye poligony kak neobhodimost' XXI veka: osobennosti i perspektivy razvitiya v Rossijskoj Federacii / A.S. Polyakova // *Sbornik trudov.* – 2022. – C. 84-90.
3. *Tret'yakov, E.V.* Razvitie karbonovyh poligonov v Rossii / E.V. Tret'yakov, D.A. Strachuk // *Digital.* – 2022. – 3(2). – C. 72-76.
4. European Commission. 2023. CBAM Factsheet. EUGreenDeal. URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (data obrashcheniya 12.07.2023).
5. *Zinov'eva, I.S.* Sozdanie karbonovyh poligonov kak sposob dostizheniya uglerodnoj nejtral'nosti / I.S. Zinov'eva, A.S. Sycheva // *Transformaciya ekonomicheskikh sistem: nizkouglerodnaya ekonomika i klimaticheskaya politika.* – 2022. – C. 23-28.
6. *Gessen, S.M.* Karbonovye poligony, novyj instrument upravleniya klimaticheskimi izmeneniyami v Rossijskoj Federacii / S.M. Gessen, A.M. Vorotnikov // *Zhurnal sociologicheskikh issledovanij.* – 2021. – № 6(2). – C. 22.
7. *Gessen, S.M.* Karbonovye poligony - novyj nauchno-obrazovatel'nyj proekt dlya Arktiki / S.M. Gessen, A.M. Vorotnikov // *Arktika 2035: aktual'nye voprosy, problemy, resheniya.* – 2021. – № 2. – C. 98-104.
8. *Gluhovskaya, M.Yu.* Aktual'nye voprosy sozdaniya seti karbonovyh poligonov / M.Yu. Gluhovskaya, T.A. Evstifeeva // *Regional'nye problemy geologii, geografii, tekhnosfernoj i ekologicheskoy bezopasnosti.* – 2021. – C. 59-63.
9. *Haritonova, N.A.* Uglerodnyj sled Rossii: realii i perspektivy ekonomicheskogo razvitiya / N.A. Haritonova, E.N. Haritonova, V.N. Pulyaeva // *Russian Journal of Industrial Economics.* – 2021. – № 14(1). – C. 50-62.
10. Plan issledovanij na karbonovom poligone «Ural-Karbon» v 2023-2025 gg. URL: https://ural-carbon.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_28853/about/plans_Ural-Carbon.pdf (data obrashcheniya 12.07.2023).
11. Karbonovye poligony. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony> (data obrashcheniya 12.07.2023).
12. Rossijskaya akademiya nauk odobrila proekt voronezhskih uchenyh iz VGLTU. – URL: <https://carbon-polygons.ru/news/rossijskaya-akademiya-nauk-odobrila-proekt-voronezhskix-uchenyix-iz-vgltu> (data obrashcheniya 14.07.2023).