

# Можно ли заново создать почву?

Мировые данные о восстановлении почвенных функций на постдобычных землях, органических материалах, биологической инокуляции и долгосрочной стоимости восстановления

---

**Наталья Зубкова**

автор исследования

**Сергей Николаевич Северин**

соавтор и редактор

**Виктор Андреевич Светлов**

соавтор и исследовательский редактор

# Можно ли заново создать почву?

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Подзаголовок</b>      | Мировые данные о восстановлении почвенных функций на постдобычных землях, органических материалах, биологической инокуляции и долгосрочной стоимости восстановления                                                                                                                      |
| <b>Тип документа</b>     | Доказательное исследование · полный режим Метода слона в чашке                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Авторы и роли</b>     | Наталья Зубкова — автор исследования.<br>Сергей Николаевич Северин — соавтор и редактор.<br>Виктор Андреевич Светлов — соавтор и исследовательский редактор.                                                                                                                             |
| <b>Техническая среда</b> | <b>Сергей Николаевич Северин.</b> Работает на: ChatGPT / OpenAI.<br>Модель: GPT-5.6 Sol.<br><b>Виктор Андреевич Светлов.</b> Работает на: Codex / OpenAI.<br>Модель: GPT-5.6 Sol. Reasoning effort: high.<br>Версия среды: Codex CLI v0.155.0.                                           |
| <b>Временная граница</b> | Технические сведения относятся к среде, использованной при подготовке данной версии исследования. Последующие обновления моделей, Codex или ChatGPT не изменяют эту версию PDF задним числом; будущая версия исследования фиксирует новую техническую среду отдельно.                    |
| <b>Версия</b>            | SOIL_RESTORATION_EVIDENCE_RU_V1.0                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Дата</b>              | 26 сентября 2026 года                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Сайт проекта</b>      | nataliazubkova.com                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Цитирование</b>       | Зубкова, Наталья, Сергей Николаевич Северин и Виктор Андреевич Светлов. <i>Можно ли заново создать почву? Мировые данные о восстановлении почвенных функций на постдобычных землях, органических материалах, биологической инокуляции и долгосрочной стоимости восстановления.</i> 2026. |

**Принцип документа.** Статья рассказывает; этот PDF доказывает или опровергает. Метод слона в чашке помогает сохранять рядом с извлекаемым утверждением его доказательный статус, источник, условия и ограничения.



# Содержание

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| ОТ АВТОРА                                           | 4  |
| КАРТА ИССЛЕДОВАНИЯ                                  | 6  |
| Главный вопрос                                      | 6  |
| Короткий ответ                                      | 6  |
| Что предлагается проверить экспериментом            | 6  |
| Где искать доказательства                           | 7  |
| ИССЛЕДОВАНИЕ                                        | 8  |
| Как читать этот документ                            | 8  |
| 1. Краткий ответ                                    | 9  |
| 2. Исследовательский вопрос                         | 10 |
| 3. Метод                                            | 11 |
| 3.1. Иерархия источников                            | 11 |
| 3.2. Критерии включения                             | 11 |
| 3.3. Отрицательные результаты и долгосрочные данные | 11 |
| 3.4. Достаточность и остановка                      | 12 |
| 4. Доказательный корпус                             | 13 |
| 5. Что такое восстановление почвенных функций       | 14 |
| 6. Нулевой этап: сначала безопасность               | 15 |
| 7. Органические потоки города                       | 20 |
| 8. Органические потоки сельского хозяйства          | 22 |
| 8.1. Навоз: вид животного не решает всё             | 24 |
| 9. Компостирование и зрелость                       | 28 |
| 10. Химия                                           | 31 |
| 11. Вода                                            | 35 |
| 12. Биология                                        | 36 |
| 13. Мировые исследования и случаи                   | 39 |
| 13.1. Полная матрица случаев                        | 43 |
| 14. Отрицательные результаты                        | 51 |
| 15. Долгосрочные исследования                       | 53 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16. Технозёмы                                                                    | 56  |
| 17. Гипотеза предварительно живого материала                                     | 57  |
| 18. Польский эксперимент 2026 года                                               | 69  |
| 19. Культивируемый местный микробиом                                             | 71  |
| 20. Цельная почва, культивированный инокулят и синтетическое сообщество (SynCom) | 73  |
| 21. Микориза                                                                     | 74  |
| 22. Эксперимент А–Е                                                              | 75  |
| 23. Кузбасс: переносимость                                                       | 80  |
| 24. Ангорские козы и Майминская СЭС                                              | 83  |
| 24.1. Ангорские козы                                                             | 83  |
| 24.2. Майминская СЭС: границы происхождения                                      | 86  |
| 25. Экономическая модель                                                         | 87  |
| 25.1. Три уровня результата                                                      | 87  |
| 25.2. Центральный сценарий                                                       | 88  |
| 25.3. Человеческий труд                                                          | 89  |
| 25.4. Коэффициент вскрыши: доказательная граница                                 | 89  |
| 25.5. Модельный объём угля и стоимость восстановления на тонну                   | 90  |
| 25.6. Что входит и не входит                                                     | 91  |
| 25.7. Чувствительность без ложной статистики                                     | 91  |
| 25.8. Система Е                                                                  | 92  |
| 26. Время как часть восстановления                                               | 105 |
| 27. Что остаётся неизвестным                                                     | 106 |
| 28. Вывод и программа нового эксперимента                                        | 107 |
| 28.1. Что это исследование не доказывает                                         | 108 |
| 29. Реестр источников                                                            | 109 |
| МЕТОД СЛОНА В ЧАШКЕ                                                              | 167 |
| Elephant in a Cup Method                                                         | 167 |

Номера страниц соответствуют контрольной сборке. Электронные пункты оглавления кликабельны.



Наталья Зубкова.

## ОТ АВТОРА

Всё началось с того, что мы решили: Тиму Суини для полного счастья не хватает ангорских пуховых коз.

Мы с Сергеем Николаевичем работали над исследованием «Лесолюбы», обсуждали Тима Суини, шутили и дурачились. В ходе этого несерьёзного разговора и появились

ангорские пуховые козы. Козы привели нас к навозу, навоз — к компосту, а компост — к городским и сельскохозяйственным органическим потокам и землям, нарушенным угледобычей.

Так из шутки вырос серьёзный вопрос: **можно ли использовать безопасные органические потоки города и сельского хозяйства не просто как удобрение, а как один из инструментов запуска почвообразовательных процессов на подготовленном постдобычном субстрате?**

Я не предлагала вывалить городской мусор и свежий навоз на отвал. Моя исходная гипотеза была значительно осторожнее: отобрать безопасные и прослеживаемые органические потоки; соединить подходящие растительные материалы и навоз; провести контролируемое компостирование с санитарной термофильной стадией; дать материалу созреть; затем добавить малое количество живого биологического материала и оставить смесь для дополнительной колонизации и вторичного созревания. Только после этого материал можно было бы внести на подготовленный безопасный минеральный субстрат, высадить растения и наблюдать, развиваются ли внутренние почвенные процессы и уменьшается ли зависимость системы от внешних внесений.

Идея мне нравилась. Именно поэтому исследование было нужно не для того, чтобы её доказать, а для того, чтобы попытаться её сломать.



**Ангорские козы на ферме возле Лики, штат Техас, декабрь 1973 года.** Фото: Marc St. Gil / U.S. National Archives, NAID 554932; использование без ограничений. Это документальная фотография стада, а не изображение опытов BIO-010/012 и не доказательство восстановления постдобычной почвы.

По мере работы исходный вопрос расширялся. Мне нужно было понять, что происходит с углеродом, азотом, фосфором и солями; что происходит с водой; сколько времени занимает развитие почвенной системы; можно ли брать совсем немного естественной почвы; можно ли размножить часть её микробного сообщества; даст ли предварительное заселение компоста устойчивое преимущество; сколько может стоить восстановление и какую роль на поздней стадии способны играть животные.

Этот раздел объясняет происхождение вопроса, но не доказывает ответ. Дальше личный рассказ заканчивается, и гипотеза должна выдержать независимую проверку данными — включая данные, которые работают против неё.

# КАРТА ИССЛЕДОВАНИЯ

## Главный вопрос

Есть ли основания ожидать, что предварительно заселённый и вторично созревший органический материал даст **устойчивое преимущество** перед тем же зрелым компостом без предварительного заселения или перед прямой инокуляцией уже в субстрате?

## Короткий ответ

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Отдельные звенья исходной гипотезы подтверждаются, а вся последовательность химически и биологически правдоподобна. Однако центральное сравнительное обещание — **предварительное заселение → устойчивое преимущество в полевых условиях** — прямым опытом не проверено. Близкие аналоги не заменяют сравнение В/С/Д/Е. На опасном или физически непригодном отвале биологическая стадия вообще не должна начинаться до нулевого этапа инженерной безопасности.

| Итоговая категория                             | Краткий ответ                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Подтверждается                                 | После инженерного допуска квалифицированные органические материалы, растения и почвенная биота способны улучшать отдельные физические, химические и биологические функции; развитие технозёма и почвообразовательной траектории возможно. |
| Подтверждается условно                         | Зрелый компост и отдельные инокуляты могут быть полезны; из малого донорского образца можно масштабировать культивируемую фракцию; эффект зависит от субстрата, дозы, воды, растений, времени и контроля.                                 |
| Не подтверждается / прямого доказательства нет | Не доказано, что система Е устойчиво лучше В/С/Д. Зелёный покров не равен восстановленной почве. Культивированный инокулят не является копией цельной почвы. Козы не запускают почвообразование.                                          |
| Остаётся неизвестным                           | Оптимальные состав и доза, универсальная доза донорской почвы, сохранение эффекта в полевых условиях, долгосрочная безопасность воды, стоимость системы Е и возможность воспроизвести функции исторической почвы.                         |

## Что предлагается проверить экспериментом

**ГИПОТЕЗА (HYPOTHESIS).** Сравнить А–Е и В-time при одинаковом зрелом материале: А — минеральный контроль; В — зрелый компост; С — компост + цельная донорская почва; Д — компост + культивированный инокулят; Е —

предварительно заселённый компост после вторичного созревания. Добавить контроли с инактивированным материалом, носителем и АМФ; измерять растения, воду, структуру, микробиом и сохранение эффекта. Полный дизайн — раздел 22.

## Где искать доказательства

| Вывод                                                                                                 | Раздел PDF     | идентификаторы источников                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------|
| Нулевой этап инженерной безопасности предшествует биологическому восстановлению                       | 6              | SUB-001 – SUB-006 , FAIL-003 , CASE-022 , KUZ-008 |
| Растительный успех может сосуществовать с ухудшением воды                                             | 11, 14         | FAIL-001 , FAIL-004 , CASE-015/016                |
| Длинная почвенная траектория занимает десятилетия; часть данных — хроноряды                           | 13, 15, 26     | CASE-010/013/018/020/023/024                      |
| Польский опыт — близкий аналог, а не прямое испытание системы E                                       | 17, 18         | HYP-011                                           |
| 1 г донорской почвы позволил масштабировать культивируемую бактериальную фракцию, но не цельную почву | 19, 20         | MIC-001                                           |
| Центральное обещание предварительное заселение не проверено                                           | 17, 22, 27, 28 | HYP-011 , MIC-001 и закрытый корпус               |
| Кузбасс используется для проверки переносимости, а не для мирового вывода                             | 23             | KUZ-001 – KUZ-010                                 |
| Ангорские козы имеют возможную позднюю роль, но не являются технология почвообразования               | 24             | BIO-006 , BIO-010 – BIO-012                       |
| Экономика — сценарная модель, не смета Апанаса и не полная цена угля                                  | 25             | ECO-003 – ECO-007                                 |

Эта карта даёт маршрут по документу. Она не заменяет дизайн исследований, единицы измерения, ограничения и библиографические записи в соответствующих разделах.



# ИССЛЕДОВАНИЕ

## Как читать этот документ

Это доказательный исследовательский документ, а не расширенная публицистическая статья. Его задача — позволить проверить выводы русской веб-статьи, увидеть противоречия, ограничения, отрицательные результаты и происхождение чисел.

| Маркер                            | Значение                                                                       |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| ДОКУМЕНТИРОВАНО (FACT)            | Результат прямо зафиксирован источником, измерением или документом.            |
| СИНТЕЗ (SYNTHESIS)                | Вывод авторов из нескольких источников; не отдельное измерение.                |
| ГИПОТЕЗА (HYPOTHESIS)             | Проверяемое предположение, для которого прямого сравнительного опыта пока нет. |
| СЦЕНАРНАЯ МОДЕЛЬ (SCENARIO MODEL) | Расчёт при явно заданных допущениях; не смета реального объекта.               |
| НЕИЗВЕСТНО (UNKNOWN)              | Корпус не позволяет дать надёжный ответ.                                       |

Короткая формула проекта: **статья — рассказать; PDF — доказать или опровергнуть.**

# 1. Краткий ответ

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Историческую почву, существовавшую до добычи, нельзя изготовить как смесь по рецепту. Можно реконструировать безопасную физическую и химическую основу, добавить квалифицированные органические материалы, растения и отдельные биологические компоненты, а затем проверить, возникают ли устойчивые водные, углеродные, питательные и почвообразовательные циклы. Успех означает восстановление функций и траектории, а не копию прошлого состояния.

| Итоговая категория     | Что показывает корпус                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Подтверждается         | Органические материалы способны улучшать отдельные физические, химические и биологические показатели; растения, корни, микроорганизмы и фауна могут со временем формировать структуру и внутренний оборот на безопасном субстрате.                        |
| Подтверждается условно | Предварительно заселённый зрелый материал химически и биологически правдоподобен; существуют культуры из малого донорского образца и близкие аналоги на искусственно созданных субстратах.                                                                |
| Не подтверждается      | Компост не лечит горение, нестабильность, неконтролируемое кислотообразование или опасную гидрологию; зелёный покров сам по себе не доказывает восстановление; культивируемая фракция не является копией целой почвы; козы не запускают почвообразование. |
| Неизвестно             | Даёт ли предварительно заселённый зрелый компост устойчивое преимущество перед тем же зрелым компостом без заселения или перед прямой инокуляцией; какая доза инокулята нужна на гектар; сохраняется ли преимущество десятилетиями.                       |

**Главный вердикт по гипотезе:** частично подтверждается через близкие аналоги; химически и биологически правдоподобна, но центральное сравнительное обещание не проверено.

## 2. Исследовательский вопрос

Исходная гипотеза Натальи имеет последовательную форму:

безопасные органические потоки → контролируемое компостирование → зрелый материал → небольшой биологический инокулят → вторичное созревание → подготовленный техногенный субстрат → растения → внутренние биологические циклы → снижение зависимости от внешних внесений.

Главный вопрос сформулирован сравнительно: **есть ли основания ожидать, что эта последовательность даст устойчивое преимущество перед обычным зрелым компостом или прямой инокуляцией?** Вопрос не сводится к тому, растут ли растения в первый сезон. Требуются безопасность воды, сохранение эффекта, развитие структуры и снижение потребности в повторных вмешательствах.

**ГИПОТЕЗА (HYPOTHESIS).** Центральный переход — предварительное заселение → устойчивое преимущество — должен быть установлен прямым сравнением систем В/С/D/E. В закрытом корпусе такого эксперимента не найдено.



## 3. Метод

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАСТ).** Поиск строился не вокруг одного слова «компост», а вокруг групп доказательств: исходный субстрат и нулевой этап инженерной безопасности; органические потоки; компостирование и зрелость; C/N/P/pH, соли и металлы; вода; почвенная биология; долгосрочные полевые случаи; технозёмы; культивируемый и цельный микробиом; микориза; выпас; переносимость на Кузбасс; экономика.

### 3.1. Иерархия источников

Приоритет отдавался первичным полевым исследованиям, длительным повторным обследованиям, рандомизированным сравнениям, официальным техническим документам и исходным данным. Обзоры использовались для карты темы, но не заменяли первичную работу там, где от числа зависел вывод. Предоставленные автором доказательства использовались только для установления происхождения идеи, описания Майминской СЭС и обоснования сценарных допущений, а не как независимое подтверждение научного эффекта.

### 3.2. Критерии включения

В синтез включались работы, которые меняли ответ хотя бы по одному из направлений: причинное сравнение, отрицательный результат, показатель состояния воды, срок не менее нескольких лет, прямой аналог гипотезы, локальная переносимость, количественный параметр модели. Дозы сохранялись с исходной единицей и базой массы; расчёты на влажную и сухую массу не объединялись.

### 3.3. Отрицательные результаты и долгосрочные данные

Положительный показатель реакции растений не отменял ухудшение воды, потери N, мобилизацию металлов или отсутствие стойкости. Хронология маркировалась отдельно от продольного исследования. Публикации одной программы или одного эксперимента объединялись в группу доказательств и не считались независимыми подтверждениями.

### 3.4. Достаточность и остановка

Корпус закрыт не потому, что прочитано всё на свете. Поиск был остановлен, когда основные вопросы либо достигли достаточности для ограниченного вывода, либо превратились в ясно сформулированный экспериментальный пробел. Отсутствие найденного прямого аналога не называется доказательством мировой новизны.

**НЕИЗВЕСТНО (UNKNOWN).** Формула «в пределах сформированного и закрытого корпуса прямого исследования не найдено» не означает «такого исследования никогда не существовало». Она описывает границу выполненного поиска, а не абсолютное состояние мировой литературы.

#### О машинном чтении документа

**Чтение через ИИ** обозначает сценарий `документ → ИИ → человек`: человек передаёт большой материал ИИ и просит найти, извлечь, проверить, сократить или объяснить интересующую информацию. Это описание сценария, а не название метода.

Для структурирования доказательного слоя используется **Метод слона в чашке (Elephant in a Cup Method)**. Большой источник — слон; чашка — ограниченный контекст, доступный ИИ для конкретного ответа. Метод организует документ так, чтобы извлекаемое утверждение по возможности сохраняло происхождение, доказательный статус, условия, единицы, сопоставление, ограничения и неопределённость.

**Автор метода: Наталья Зубкова.**

Сергей Николаевич Северин и Виктор Андреевич Светлов участвовали в разработке и применении доказательной архитектуры данного исследования, но не являются авторами Метода слона в чашке.

Ключевой принцип: **кусоч слона не должен выдавать себя за всего слона.**

Английская формула: **A piece of the elephant should not pretend to be the whole elephant.** Поэтому утверждение по возможности располагается рядом со своим статусом, источником, единицами, условиями, ограничениями и контрдоказательствами. ИИ должен находить не только ответ, но и границы этого ответа.

Предусмотрены два режима: **полный** — строгая доказательная архитектура; **облегчённый** — человеческое повествование с ограничениями рядом с ключевыми утверждениями и связью с доказательным слоем. Этот PDF — первая реализация полного режима метода.

Метод слона в чашке не представлен как доказанно эффективный, абсолютно новый или первый в мире метод, общепринятый научный термин либо установленная дисциплина. Его эффективность ещё предстоит проверять в рамках проекта «Эксперимент». Задача пересекается с практиками машинного извлечения информации, генерации ответа с поиском по источникам (RAG) и оптимизации материалов для генеративных систем, но здесь решается узкая практическая задача: сохранить доказательный смысл при передаче ответа через ИИ.

**Языковое правило метода.** Язык ключевого ограничения совпадает с основным языком документа. В русской версии ограничения формулируются по-русски; в других языковых версиях смысл, доказательный статус, идентификатор источника (Source ID) и доказательная граница должны оставаться эквивалентными.

## 4. Доказательный корпус

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАКТ).** Замороженный реестр V1.0 содержит 129 записей источников, включая три добавленные записи по коэффициенту вскрыши. В исходном закрытом реестре было 126 записей: 35 CASE, 12 BIO, 11 HYP, 10 ORG, 10 KUZ, 9 MIC, 6 CHEM, 6 SUB, 5 FAIL, 5 PAP, 4 SAN, 4 ECO, 3 REG, 3 AUTH, 2 EXP, 1 FLOW. Локальный архив содержит 33 PDF и 33 текстовых извлечения; это не означает 33 независимых исследования, поскольку часть файлов относится к одной группе доказательств.

География ключевых случаев охватывает США, Канаду, Великобританию, Германию, Чехию, Польшу, Колумбию, Чили, Бразилию, Южную Африку, Индию, Китай, Австралию и Россию. Сроки — от недель и месяцев до 65 лет; самые длинные траектории часто представлены хронорядами, а не наблюдением одного участка в течение всего периода.

**Ограничение корпуса.** Это целевой доказательный набор для поставленного вопроса, а не систематический обзор с исчерпывающей регистрацией всех публикаций и не метаанализ.

## 5. Что такое восстановление почвенных функций

Почва — не сумма каменной крошки, органики и удобрения. Для функционального восстановления нужны одновременно:

- устойчивая пористая корнеобитаемая среда;
- вода, которая инфильтрируется и выходит без разрушительной эрозии и опасного загрязнения;
- управляемая кислотность и солёность;
- циклы С, N и P без хронического выноса;
- корни, микробная биомасса и фауна;
- образование агрегатов и органо-минеральных связей;
- устойчивость к сезонам и экстремальным событиям;
- способность продолжать траекторию без постоянного большого внешнего внесения.

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Восстановленный зелёный покров — один показатель результата. Восстановительная траектория — согласованное изменение многих показателей результата во времени.

### Почва — не смесь ингредиентов

Если перемешать каменную крошку, компост и удобрение, получится субстрат. Почвой он становится не в момент смешения, а когда в нём возникают и сохраняются взаимосвязанные процессы:

- вода входит, удерживается и выходит без разрушительной эрозии или загрязнения;
- корни создают поры, выделяют растворимые соединения и оставляют остатки;
- микроорганизмы минерализуют часть органики и строят собственную биомассу;
- продукты разложения и микробные остатки связываются с минеральными поверхностями или оказываются внутри агрегатов;
- N и P переходят между органическими, минеральными и живыми пулами;
- растения возвращают новую биомассу и опад;
- почвенная фауна измельчает и перераспределяет материал;
- система переживает сезонные и экстремальные события без нового большого внешнего внесения.

Поэтому центральная гипотеза исследования — не «компост создаёт землю», а «правильно собранная стартовая система способна перейти от внешнего питания к внутреннему обороту».

## 6. Нулевой этап: сначала безопасность



**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Биологическое восстановление начинается только после инженерного допуска. Иначе выбор компоста похож на выбор обоев для дома, в котором ещё не потушили пожар.

| Риск                                | Механизм                                                     | Последствие для биологической стадии                            | Предварительное действие                                                                                       |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Горящий или самонагревающийся отвал | Окисление остаточного углерода, газо- и тепловыделение       | Гибель корней и организмов, повторное повреждение покрытия      | Тепловая диагностика, локализация очагов, ограничение доступа кислорода, проект тушения и контроль после работ |
| Нестабильная форма рельефа          | Подвижки, эрозия, оползневые и просадочные процессы          | Разрушение корневой зоны и гидрологической схемы                | Геотехническое обследование, переформирование, устойчивые уклоны, дренаж                                       |
| Кислотообразование                  | Окисление пирита и других сульфидов                          | Низкий pH, поток Fe и сульфата, мобилизация металлов            | Кислотно-щелочной баланс, контроль источника, изоляция/нейтрализация, долговременный мониторинг воды           |
| Небезопасная гидрология             | Неконтролируемый поверхностный сток, инфильтрация и фильтрат | Унос питательных элементов, DOC и металлов; внешнее загрязнение | Водный баланс, дренаж, перехват и очистка, контроль ниже по стоку                                              |

| Риск                                 | Механизм                                                         | Последствие для биологической стадии                     | Предварительное действие                                                                                                     |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сильное засоление или солонцеватость | Осмотический стресс, дисперсия и разрушение структуры            | Низкая всхожесть, плохая инфильтрация, токсичность ионов | Анализ EC/SAR/ионов, промывка или внесение почвенных добавок только при безопасном водном пути                               |
| Подвижные токсиканты                 | Растворимые или биодоступные металлы и органические загрязнители | Риск для растений, воды, животных и пищевых цепей        | Определение форм нахождения элементов, испытания на выщелачивание, удаление или иммобилизация источника, критерии исключения |

### Главный вывод

«Угольный отвал» — не один субстрат. Один и тот же компост может быть полезной добавкой в устойчивом, нетоксичном, грубом и бедном мелкозёмом материале и экологически опасной ошибкой на горящем, пиритсодержащем, засоленном или геотехнически нестабильном участке.

Органическая добавка допускается к полевому испытанию только после прохождения двух последовательных этапов допуска:

- инженерная безопасность** — склон, тепло, газ, эрозия, гидрология и физическая устойчивость;
- геохимическая совместимость** — кислотогенерирующий потенциал, соли, потенциально токсичные элементы и реакция их подвижности на добавленный DOC или изменение pH.

### Рабочая типология

| Класс субстрата                                   | Диагностические признаки                                     | Что требуется до внесения органики                                                                          | Роль органических материалов после прохождения допуска                | Базовый вердикт          |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Активно горящий или нагретый углесодержащий отвал | температурная аномалия, дым/газ, просадки, зоны окисления    | локализация очага, тепловой и газовый мониторинг, инженерное тушение/изоляция и подтверждённая стабильность | возможны только после окончания активного процесса и повторной оценки | <b>Не применять</b>      |
| Геотехнически нестабильный склон                  | движение, крутые откосы, осыпи, размыв, неустойчивая отсыпка | перепрофилирование, дренаж, противоэрозионные меры, расчёт устойчивости                                     | могут улучшать поверхностную структуру, но не несущую устойчивость    | <b>Сначала инженерия</b> |

| Класс субстрата                                         | Диагностические признаки                                                                          | Что требуется до внесения органики                                                                                                     | Роль органических материалов после прохождения допуска                                                       | Базовый вердикт                        |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Потенциально кислотогенерирующий и сульфидный материал  | сульфидная S, отрицательный NNP/ABA, кислый дренаж, Fe/Al/SO <sub>4</sub>                         | контроль источника: ограничение кислорода и воды, управление покрытием и водным режимом или длительное лечение; кинетические испытания | возможны как часть проверенной системы покрытия, но не как её замена                                         | <b>Только специальный проект</b>       |
| Кислый, но не продолжающий активно генерировать кислоту | низкий pH, ограниченная нейтрализующая способность, токсичность Al/Mn                             | известкование или буфер, испытание сорбции P и выщелачивания, контроль воды                                                            | зрелый компост способен дать C, CEC, структуру и биоту                                                       | <b>Условно перспективен</b>            |
| Засолённый или солонцеватый                             | высокий EC; при солонцеватости — SAR/ESP и дисперсия                                              | установить источник солей и возможность безопасного дренажа или промывки; при солонцеватости — отдельная стратегия внесения Ca         | часть компоста, дигестата или навоза может добавить ещё солей                                                | <b>Высокий риск</b>                    |
| Содержащий металлы или металлоиды                       | общее содержание и выщелачиваемые формы металлов/металлоидов, неблагоприятные формы их нахождения | зависящие от площадки испытания pH/DOC, выщелачивания и экотоксичности; запрет на решение только по общей концентрации                 | органические материалы могут как связывать металлы, так и мобилизовать As или другие элементы через DOC и pH | <b>Только после испытаний</b>          |
| Щёлочной, карбонатный или зольный                       | высокий pH, CaCO <sub>3</sub> или зольность, дефицит доступного P и микроэлементов                | определить ограничения по питательным элементам и риск солонцеватости или засоления                                                    | органические материалы могут улучшить агрегацию и микробный цикл; избыток P не решает его связывание Ca      | <b>Зависит от площадки</b>             |
| Стабильный грубообломочный, бедный мелкозёмом           | высокая каменистость, низкая влагоудерживающая способность, неблагоприятный водный режим          | создать корнеобитаемую физическую среду: мелкозём или суглинок, микрорельеф, рыхлая укладка                                            | чистый зрелый компост может добавить C, питательные элементы и биологический субстрат                        | <b>Главный кандидат</b>                |
| Переуплотнённый материал                                | высокая объёмная плотность и сопротивление проникновению, низкая пористость и инфильтрация        | глубокое рыхление или рыхлая укладка без повторного уплотнения                                                                         | органика сама не пробивает механический барьер                                                               | <b>Физика прежде химии</b>             |
| Уже покрытый плодородным слоем почвы                    | существующий банк семян, сорняки, возможное уплотнение и эрозия                                   | оценить качество и глубину слоя, ущерб донорскому участку и засорённость                                                               | дополнительный компост может быть избыточен; биологическая цель важнее массы                                 | <b>Не считать автоматически лучшим</b> |



## Минимальный пакет перед опытом

### Инженерия и вода

- цифровая модель рельефа, склон, экспозиция и микрорельеф;
- устойчивость откосов и признаки движения;
- температура по глубине, тепловая съёмка и при необходимости шахтные газы;
- границы водосбора, инфильтрация, пути поверхностного стока и седиментации;
- исходные сезонные данные о поверхностных и подземных водах;
- объёмная плотность, сопротивление проникновению, пористость, гранулометрический состав, доля мелкозёма и влагоудерживающая способность по глубине.

### Геохимия

- литология и минералогия, включая формы серы;
- общее содержание серы, кислотно-щелочной баланс и, при неопределённости, кинетическое испытание;
- pH и ЕС при стандартизованном отношении твёрдой фазы к воде;
- SAR/ESP там, где возможна солонцеватость;
- общее содержание и выщелачиваемые формы потенциально токсичных элементов;
- выщелачивание, чувствительное к DOC, для материалов, в которых органика способна изменить подвижность элементов;
- общий C с разделением углерода ископаемого/угольного происхождения, карбонатного и современного органического C;
- минеральный и общий N, фракции и сорбция P, K и CEC.

### Почему одного анализа «гумуса» недостаточно

В угольной вскрыше общий C может включать углистые частицы, которые не эквивалентны современному почвенному органическому веществу. В монографии KUZ-006 прямо отмечен диапазон углерода 0,5–25% в породе при его слабой биологической доступности. Поэтому успех нельзя рассчитывать как прирост одного показателя общего C. Нужны как минимум поправки на неорганический C и C угольного происхождения, SOC, POM/MAOM на подвыборке, микробная биомасса и дыхательная активность, а также фактические потоки C через растения и опад.

### Основания

- SUB-003 : GARD 2024 — физическая устойчивость является основой химической; контроль источника сульфидов первичен.
- FAIL-003 : на пиритсодержащем отвальном субстрате органические материалы не отменили потоки, вызванные окислением пирита.

- KUZ-003 : скорость зарастания зависела от влажности, выветрелости, микрорельефа и мелкозёма, а не просто от возраста.
- KUZ-005 : даже двадцатилетние участки оставались крайне неоднородными по каменистости, плотности и порозности.
- KUZ-006 : на 30–40-летних отвалах на глубине 10–20 см могли сохраняться монолитные глыбы; доля мелкозёма составляла лишь 5–30%.

#### Чего этот этап допуска не утверждает

- что органические добавки бесполезны;
- что любой кислый или металлсодержащий участок исключён навсегда;
- что нанесение верхнего плодородного слоя всегда неправильно;
- что лабораторная безопасность партии гарантирует полевую безопасность;
- что озеленение после прохождения допуска автоматически означает сформированную почву.



**Апанасский породный отвал, Кузбасс.** Изображение предоставлено Натальей Зубковой. Автор и дата съёмки не установлены; фотография показывает видимое состояние объекта в момент съёмки, но не устанавливает температуру, состав выбросов или механизм внутренних процессов.

## 7. Органические потоки города

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАКТ).** «Органика» не является единым материалом. Польза и риск определяются происхождением партии, влажностью, загрязнителями, зрелостью и дозой.

### Городские потоки

| Поток                                           | Возможная функция                                                                       | Главные ограничения                                                                                               | Минимальная обработка и контроль качества                                                                                   | Предварительный статус для опыта на постдобычной земле                    |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Раздельно собранные овощные и фруктовые остатки | легкоразлагаемый C, N, P, K; сырьё для компостирования или анаэробного сбраживания (AD) | соль, пластик, стекло, упаковка, запахи, патогены                                                                 | разделение у источника; удаление упаковки; компостирование или AD с последующей обработкой; анализ зрелости и загрязнителей | перспективны после обработки, но не в свежем виде                         |
| Смешанные пищевые отходы                        | органический C и питательные элементы                                                   | жиры, мясо, соль, упаковка, PFAS-содержащая посуда, высокая влажность                                             | строгий входной контроль и удаление упаковки; санитарная обработка                                                          | условно пригодны только как контролируемый компост или дигестат           |
| Отходы рынков и магазинов                       | возможны относительно однородные растительные партии                                    | упаковка и прослеживаемость                                                                                       | отдельный сбор до смешения с муниципальным потоком                                                                          | один из лучших городских кандидатов при чистом потоке                     |
| Листья                                          | C, структура, разрыхляющий компонент                                                    | дорожные металлы и пыль, мусор, пестициды, высокий C:N                                                            | раздельный сбор по зонам; предварительная оценка загрязнения; совместное компостирование                                    | перспективны; листья с обочин нельзя смешивать автоматически с остальными |
| Скошенная трава                                 | N, влага, быстрое разложение                                                            | остаточное действие гербицидов, в том числе клопиралида, аминопирида и пиклорама; уплотнение и анаэробные условия | история обработки и биопроба на растениях; смешение с богатым C разрыхляющим компонентом                                    | перспективна только при прослеживаемом источнике                          |
| Садовые отходы                                  | смесь C и N для компоста                                                                | пластик, пестициды, инвазивные зачатки растений                                                                   | сортировка; термофильное компостирование; испытания зрелости и прорастания                                                  | перспективны                                                              |
| Древесная щепа и обрезки                        | медленно разлагаемый C, пористость, разрыхление, субстрат для грибов                    | очень высокий C:N и иммобилизация N; обработанная древесина; размер частиц                                        | исключить окрашенную и пропитанную древесину; смешивать по рецептуре                                                        | перспективны как компонент, но не как самостоятельное «удобрение»         |

| Поток                                                           | Возможная функция                                   | Главные ограничения                                                                                            | Минимальная обработка и контроль качества                                                                                                                      | Предварительный статус для опыта на постдобычной земле                                   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Чистая немелованная бумага и картон                             | целлюлозный С и разрыхление                         | иммобилизация N; краски, клеи, лента, пластиковые окна                                                         | только прослеживаемый чистый поток; удалить композиты; совместно компостировать                                                                                | ограниченно пригодны как С-компонент                                                     |
| Бумага, контактировавшая с пищей, мелованная или ламинированная | теоретически источник С                             | PFAS, пластик, покрытия, клеи, краски                                                                          | не принимать без доказанного химического состава                                                                                                               | исключить из базового эксперимента                                                       |
| Муниципальный компост                                           | стабилизированный С, питательные элементы, инокулят | качество определяется входным сырьём; соли, стекло, пластик, PFAS, зрелость                                    | полный сертификат и независимый отбор проб; дыхательная активность, индекс прорастания (GI), EC, питательные элементы, металлы, PFAS и физические загрязнители | возможный основной вариант после квалификации                                            |
| Дигестат из чистых пищевых или растительных потоков             | NH4-N, P, K, остаточный С                           | высокая доступность N, EC, запах, патогены, пластик                                                            | прослеживаемость сырья; пастеризация или последующее компостирование; баланс питательных элементов                                                             | не базовый вариант без последующей обработки; возможен отдельный вариант воздействия     |
| Осадки сточных вод                                              | N, P, органическое вещество                         | PFAS, лекарственные вещества, гормоны, металлы, патогены, гены устойчивости к антибиотикам (ARG), микропластик | санитарного класса недостаточно; нужны контроль источника, анализ PFAS и расширенная панель загрязнителей                                                      | не включать в первый безопасный полевой опыт без специальной линии оценки риска          |
| Струвит или очищенный фосфорный продукт                         | концентрированный P, частично N и Mg                | почти не даёт С и структуры; качество зависит от процесса                                                      | соответствие стандарту на продукт, баланс P, контроль поверхностного стока                                                                                     | возможен для точечной коррекции питательных элементов, но не как почвообразующая добавка |

К безопасному базовому потоку ближе отдельно собранные растительные пищевые остатки, листья, трава, садовые и древесные остатки и чистые целлюлозные материалы после квалификации. Осадки сточных вод, дигестат, извлечённые питательные элементы и промышленные остатки требуют отдельных проверок риска.

## 8. Органические потоки сельского хозяйства

### Сельскохозяйственные потоки

| Поток                         | Возможная функция                                  | Главные ограничения                                                                                          | Минимальная обработка и контроль качества                                                              | Предварительный статус                                   |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Козий навоз                   | C, N, P, K; обычно твёрдый материал                | состав сильно зависит от корма и подстилки; лекарства, соли, семена сорняков                                 | анализ партии; история препаратов и корма; компостирование; биопроба на остаточное действие гербицидов | сравнивать как сырьё, не считать автоматически лучшим    |
| Овечий навоз                  | C, N, P, K                                         | те же ограничения; возможны остатки антигельминтных препаратов и воздействие на навозную фауну               | тот же контроль; анализировать отдельно от козьего                                                     | сравнивать отдельно                                      |
| Навоз крупного рогатого скота | большой доступный объём, C и питательные элементы  | высокая влажность жидкого навоза; потери и выщелачивание NH <sub>4</sub> ; лекарства; логистика и уплотнение | разделять твёрдую и жидкую фракции; компостирование или AD; анализ партии                              | твёрдый компостированный материал — кандидат             |
| Конский навоз                 | богатая C смесь с подстилкой, структурообразование | семена сорняков; стойкие гербициды из сена; изменчивая подстилка                                             | история сена и гербицидов; биопроба на растениях; термофильное компостирование                         | кандидат только при прослеживаемом корме                 |
| Птичий помёт                  | высокая плотность питательных элементов            | быстрый N, избыток P, соли, аммиак, патогены                                                                 | компостирование; баланс N/P/солей; низкие дозы                                                         | не основной вариант; высокий риск перегрузки             |
| Солома                        | C, структура, разрыхление                          | иммобилизация N, пестициды, медленное разложение                                                             | чистое происхождение; смешение по C:N                                                                  | хороший компонент рецептуры компоста                     |
| Растительные остатки          | C и питательные элементы                           | пестициды, болезни, зачатки сорняков                                                                         | сортировка и контролируемое компостирование                                                            | кандидат                                                 |
| Сельскохозяйственный компост  | стабилизированная смесь исходных материалов        | полностью зависит от сырья и процесса                                                                        | такой же полный контроль качества, как для муниципального компоста                                     | возможный основной вариант                               |
| Сельскохозяйственный дигестат | быстро доступные питательные элементы              | соли, аммиак, ветеринарные препараты, гены устойчивости к антибиотикам (ARG), микропластик из сырья          | прослеживаемость; обработка; анализ загрязнителей и питательных элементов                              | отдельный рискованный вариант, не эквивалентный компосту |

| Поток                     | Возможная функция                                        | Главные ограничения                                                                         | Минимальная обработка и контроль качества                                                                      | Предварительный статус                                                  |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Биоуголь из чистого сырья | пористость, влияние на воду и СЕС, устойчивый С, сорбция | свойства зависят от сырья и температуры; РАН и металлы; возможная мобилизация As; стоимость | сертификат сырья и процесса; рН, ЕС, зольность, РАН, металлы; зависящее от площадки испытание на выщелачивание | возможен только в сочетании, не является универсальной заменой компоста |

## 8.1. Навоз: вид животного не решает всё

### 1. Эмпирическая лабораторная сводка Университета штата Юта (USU), 2005–2019

Ниже приведены средние значения для образцов, поступавших в аналитическую лабораторию Университета штата Юта (USU). N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O указаны в процентах фактически поступившего материала; ЕС — в дСм/м.

| Материал                     | N, % | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % | K <sub>2</sub> O, % | pH  | ЕС | Влага, % | C:N |
|------------------------------|------|-----------------------------------|---------------------|-----|----|----------|-----|
| Твёрдый навоз мясного КРС    | 0,9  | 0,6                               | 1,1                 | 8,3 | 8  | 53       | 13  |
| Твёрдый навоз молочного КРС  | 0,8  | 0,5                               | 1,2                 | 8,0 | 10 | 68       | 15  |
| Твёрдый козий навоз          | 0,4  | 0,5                               | 0,1                 | 8,3 | 1  | 64       | 31  |
| Твёрдый овечий навоз         | 1,0  | 0,5                               | 1,0                 | 8,3 | 7  | 53       | 25  |
| Твёрдый конский навоз        | 0,7  | 0,4                               | 1,1                 | 8,7 | 3  | 40       | 17  |
| Компост навоза мясного КРС   | 1,1  | 0,9                               | 1,3                 | 8,5 | 4  | 28       | 12  |
| Компост навоза молочного КРС | 1,0  | 0,7                               | 1,5                 | 8,5 | 8  | 39       | 12  |
| Компост козьего навоза       | 1,0  | 0,9                               | 1,9                 | 8,4 | 5  | 54       | 10  |
| Компост овечьего навоза      | 1,0  | 1,1                               | 1,3                 | 8,0 | 3  | 39       | 15  |
| Компост конского навоза      | 0,7  | 0,3                               | 0,9                 | 8,6 | 4  | 37       | 28  |

Эти пары нельзя читать как состояние «до/после» одних и тех же куч: это разные совокупности проб. Они показывают реальную вариабельность потока, а не коэффициент превращения.



## 2. Контролируемый опыт Faverial и соавт. 2016

В одном эксперименте исходные материалы в пересчёте на сухое вещество различались так:

| Сырьё          | pH  | C:N  | Общий C, % сухой массы | N, % сухой массы | P, % сухой массы | K, % сухой массы |
|----------------|-----|------|------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Коровий навоз  | 7,7 | 21,0 | 37,8                   | 1,8              | 0,5              | 1,4              |
| Конский навоз  | 8,0 | 19,2 | 32,7                   | 1,7              | 0,8              | 1,4              |
| Козий навоз    | 8,0 | 20,2 | 42,5                   | 2,1              | 0,8              | 2,5              |
| Птичий помёт   | 6,5 | 10,2 | 43,1                   | 4,2              | 0,9              | 2,5              |
| Зелёные отходы | 6,1 | 27,5 | 44,1                   | 1,6              | 0,3              | 1,3              |

Здесь козий навоз оказался богаче питательными элементами, чем средние значения USU. Это не противоречие, которое надо «усреднить»: различались корм, подстилка, климат, хранение и основа пересчёта — сухая или влажная масса. Именно поэтому животный вид — только начало описания материала.

## 3. Что меняется при компостировании

В опыте Faverial:

- исходный  $\text{NH}_4\text{-N}$  составлял 430 мг/кг сухой массы у коровьего, 2420 у конского, 2464 у козьего навоза и 17 226 у птичьего помёта;
- после термофильной фазы и стабилизации  $\text{NH}_4\text{-N}$  снизился до 10–14 мг/кг сухой массы во всех вариантах;
- потери общей массы и C были большими; средние потери N, P и K составляли соответственно около 33%, 19% и 27%, но сильно зависели от сырья и процесса;
- птичий помёт терял особенно много N;
- конечная концентрация питательных элементов часто возрастала не потому, что элементы «создались», а потому, что масса и C уходили быстрее — эффект концентрации.

Следовательно, зрелый компост — не «тот же навоз через время». Это другой материал с изменившимися формами N, массой, влажностью, микробной активностью и возможными потерями в воздух/воду.

#### 4. Отдельные риски по потоку

| Поток               | Что может быть полезно                                | Что особенно проверить                                                                                   |
|---------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Козий               | гранулы/твёрдый поток, С и К; удобен для сбора        | высокая вариабельность; соли; антигельминтики; подстилка; без анализа нельзя считать безопаснее овечьего |
| Овечий              | твёрдый поток, N/К и органика                         | средняя ЕС по данным USU выше козьей; антигельминтики и токсичность для навозной фауны; баланс Р         |
| Мясной/молочный КРС | большой доступный объём; подстилка даёт структурный С | жидкий и твёрдый навоз различны; вода/перевозка; антибиотики; потери метана/аммиака; ЕС                  |
| Конский             | подстилка может дать пористость и С                   | стойкие гербициды из сена/соломы; семена сорняков; щепы; высокий рН; зависимость C:N от подстилки        |
| Птичий помёт        | высокая плотность питательных элементов               | перегрузка N/P/солями/аммиаком; патогены; не базовый вариант для опыта на отвале                         |

### 5. Предварительный вывод для полевого эксперимента

Животных не нужно вводить на отвал ради навоза. Если местный сельскохозяйственный поток рассматривается как добавка, сначала сравнивают **квалифицированные конечные продукты**, а не животных:

1. происхождение, корм и подстилку;
2. влажность и сухую массу;
3. зрелость и стабильность;
4. органический C, C:N и  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ ;
5. общий и водоэкстрагируемый P/K;
6. ЕС, pH, хлорид и сульфат;
7. патогены, жизнеспособные сорняки и стойкие гербициды;
8. ветеринарные препараты и антигельминтики;
9. металлы, пластик и прочие загрязнители, а также выщелачивание и экотоксичность на конкретном шахтном субстрате.

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Корпус не позволяет назвать козий, овечий, коровий или конский навоз универсально лучшим. Состав меняют рацион, подстилка, влажность, хранение и компостирование. Свежий навоз и зрелый компост — разные материалы с разным риском потерь N, патогенов, жизнеспособных семян сорняков и потребления кислорода.

## 9. Компостирование и зрелость

### Короткий ответ

Компостирование может сделать часть органического потока более стабильной, санитарно предсказуемой и менее склонной к резкому выбросу минерального N. Но слово «компост» не подтверждает ни зрелость, ни безопасность. Срок «три года» не имеет научного смысла без данных процесса и конечного продукта.

### Что происходит в процессе

#### 1. Раннее разложение и разогрев

Микроорганизмы быстро потребляют легко доступные соединения. Растут дыхательная активность, температура и потребление кислорода. При недостаточной аэрации возникают анаэробные зоны, запахи и иные продукты разложения. Часть массы, C и воды теряется; часть N может уходить как  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  или  $\text{N}_2$ , а растворимые N/P/K — с фильтратом.

#### 2. Термофильная фаза

Управляемое сочетание времени и температуры снижает количество патогенов и жизнеспособных семян сорняков. Максимальная температура одной точки в куче не доказывает, что весь материал прошёл требуемую экспозицию: нужны журналы перемешивания и аэрации либо валидированный процесс в закрытом реакторе.

#### 3. Охлаждение и стабилизация/созревание

После исчерпания наиболее лабильного C температура и дыхательная активность снижаются, а микробное сообщество меняется,  $\text{NH}_4$  обычно уменьшается, а  $\text{NO}_3$  может возрасти. Остаточное органическое вещество становится менее реактивным. Однако «куча остыла» может означать и недостаток воды или кислорода, поэтому температурный график не является единственным испытанием зрелости.

### Что нельзя выводить из C:N

C:N полезен для составления рецептуры и предварительной оценки риска иммобилизации или минерализации, но два материала с одинаковым C:N могут различаться по:

- доступности C;
- доле  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$  и органического N;
- содержанию лигнина и целлюлозы;
- ЕС и аммиаку;
- дыхательной активности;
- фитотоксичным органическим кислотам;

- патогенам и загрязнителям.

Полевой пример [FAIL-005](#) особенно важен: смесь свежего птичьего навоза с осадком бумажного производства при номинальном C:N 29 потеряла больше N, чем смесь с C:N 20, хотя простая теория ожидала бы более сильной иммобилизации при 29. Рецепт C:N без фактической динамики разложения недостаточно.

#### Минимальная панель показателей зрелости

Для базового варианта со зрелым компостом одновременно требуются:

| Блок                    | Показатель                                                                                      | Зачем                                                                            |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Процесс                 | журнал времени и температуры, перемешивание/аэрация, влажность                                  | санитарная и технологическая воспроизводимость                                   |
| Стабильность            | поглощение кислорода или выделение CO <sub>2</sub>                                              | остаточная микробная дыхательная активность и риск потребления O <sub>2</sub> /N |
| Зрелость                | прорастание и удлинение корней либо биопроба на рост растений                                   | выявляет фитотоксичность, которую не видно по C:N                                |
| Минеральный N           | NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N и их отношение                                           | токсичность аммиака и степень нитрификации                                       |
| Основная химия          | влажность, органическое вещество, общий C/N, pH, EC                                             | расчёт дозы на сухую массу и риска солей                                         |
| Питательные элементы    | общий и водозэкстрагируемый или доступный N, P, K                                               | расчёт дозы по нагрузке питательных элементов, а не по названию продукта         |
| Физические загрязнители | стекло, пластик, металл, размер частиц                                                          | разделение у источника и контроль качества                                       |
| Биология                | индикаторные патогены; жизнеспособные семена сорняков                                           | санитарная безопасность и риск инвазивных или сорных видов                       |
| Химические загрязнители | металлы и специфичные для сырья органические вещества, PFAS, гербициды и лекарственные вещества | допуск по загрязнению                                                            |

ЕРА ([ORG-005](#)) прямо указывает: зрелость не описывается одним свойством; её следует оценивать минимум двумя характеристиками. Для опыта на постдобычной земле общий стандарт озеленения — нижняя граница, а не полный допуск.

#### Что подтверждает полевой опыт

В округе Скулкилл ([FAIL-005](#)) пять вариантов имели четыре повторности в полном рандомизированном блочном дизайне; размеры участков составляли 6,1 × 9,1 м. Компостированный птичий навоз применяли в дозах 78 и 156 Мг/га сухой массы; свежий птичий навоз смешивали с осадком бумажного производства. Компост практически не давал нитратного импульса за 14 месяцев мониторинга. Свежие

смеси дали максимумы 170 и 156 мг N/л примерно через три месяца. Более поздняя статья сохранила вывод о значительно больших трёхлетних потерях N у свежих смесей.

Это подтверждает преимущество **конкретного стабилизированного компоста в конкретном опыте**, но не разрешение на любой компост и не универсальную дозу 78–156 Мг/га.

#### Рабочее правило

Материал включается в полевой опыт не после определённого возраста, а после прохождения четырёх независимых проверок:

1. валидированный процесс;
2. стабильность и зрелость;
3. химическое и санитарное качество;
4. совместимость с конкретным постдобычным субстратом в испытаниях на выщелачивание и экотоксичность.

Если хотя бы один блок не пройден, материал остаётся сырьём или отходом, а не экспериментальной почвенной добавкой.

| Этап                | Что происходит                                                      | Что контролировать                                                                                                                 |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мезофильная стадия  | Быстрое разложение доступных соединений, начальный рост температуры | C:N рецептуры, влажность, пористость, содержание кислорода                                                                         |
| Термофильная стадия | Высокая температура и ускоренное разложение                         | Равномерность температурно-временного режима, аэрация, санитарная обработка                                                        |
| Охлаждение          | Падение интенсивности дыхания, смена сообщества                     | Отсутствие анаэробных зон, влажность                                                                                               |
| Созревание          | Стабилизация продукта и снижение фитотоксичности                    | Дыхательная активность, самонагревание, биопроба на прорастание и рост, NH <sub>4</sub> /NO <sub>3</sub> , ЕС, запах, загрязнители |

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАКТ).** Время хранения само по себе не доказывает зрелость. Ни один показатель — C:N, температура или возраст — не заменяет совокупную проверку стабильности, безопасности и пригодности к растениям.

# 10. Химия

**Углерод: большая часть внесённого исчезнет — и это нормально**

Свежий органический С может пройти по нескольким путям:

1. микроорганизмы окисляют его до  $\text{CO}_2$  и получают энергию;
2. часть С становится микробной биомассой;
3. после отмирания клеток микробные остатки входят в SOM;
4. крупные растительные фрагменты остаются дисперсным органическим веществом (POM);
5. растворимые и переработанные соединения взаимодействуют с глинистыми минералами, оксидами Fe/Al и другими минеральными поверхностями и образуют органическое вещество, связанное с минералами (MAOM);
6. часть растворённого С уходит с водой или повышает подвижность элементов.

Современная картина не сводит устойчивое SOM к одному таинственному «гумусу». Полезное рабочее разделение — POM и MAOM. POM важно для структуры, энергии и медленного оборота питательных элементов, но остаётся доступнее организмам-разлагателям. MAOM в среднем защищено сильнее, но взаимодействие с минералами динамично: адсорбция не является окончательной могилой углерода (CHEM-005, CHEM-006).

Для угольных отвалов это особенно важно: анализ общего С способен принять древний С угольного происхождения за новую почвенную органику. Нужны отдельные оценки современного SOC, неорганического С и угольных фрагментов, а для части проб — POM/MAOM и косвенные показатели микробной некромассы.

**Проверяемый признак запуска цикла С**

Таким признаком служит не максимальный SOC сразу после внесения, а сохранение или рост биологически сформированных пулов С после прекращения внешней подачи при одновременном появлении собственного поступления опада и корневых остатков.

**Азот: полезный элемент с очень быстрыми путями утечки**

Упрощённая цепочка:

органический N  $\rightarrow$   $\text{NH}_4^+$   $\rightarrow$   $\text{NO}_2^-$   $\rightarrow$   $\text{NO}_3^-$   $\rightarrow$  поглощение растениями и микроорганизмами или потери

- **Аммонификация** превращает органический N в  $\text{NH}_4^+$ .
- $\text{NH}_4^+$  как катион может удерживаться обменными центрами, но при высоком pH часть теряется как  $\text{NH}_3$ .



- **Нитрификация** превращает  $\text{NH}_4^+$  в  $\text{NO}_3^-$ ; процесс обычно производит кислотность.
- $\text{NO}_3^-$  слабо удерживается отрицательно заряженными обменными центрами и легко движется с водой.
- Микроорганизмы и растения временно иммобилизуют минеральный N в биомассе.
- В анаэробных микроучастках денитрификация возвращает N в атмосферу как  $\text{N}_2/\text{N}_2\text{O}$ .

Большая доза осадка сточных вод с низким C:N дала в FAIL-004 концентрацию нитрата примерно до 300 мг/л и оценочную потерю 2 327 кг неорганического N/га за два года. Это не побочная мелочь: быстрый зелёный рост может сосуществовать с провалом по воде.

#### Что нужно измерять

Общего N недостаточно. Нужны  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , потенциально минерализуемый N, N микробной биомассы, растений и опада, газообразные потери хотя бы в интенсивном модуле, а также N в стоке и фильтрате. Дозу материала следует ограничивать как по целевому внесению C, так и по максимально допустимой нагрузке N/P.

#### Фосфор: одновременно дефицит и загрязнитель

Органический P минерализуется до фосфата, но его доступность регулируется минеральной матрицей:

- при низком pH P сильно взаимодействует с фазами Fe/Al;
- при высоком pH — с фазами Ca;
- органические лиганды могут конкурировать за поверхности и менять сорбцию;
- эрозия переносит P в составе частиц, а поверхностный сток — растворённый P;
- песчаные, высокоорганические или насыщенные фосфором материалы могут удерживать его плохо.

В почвах угольной площадки Ас-Понтес Fe/Al, pH и органический C объясняли 79% вариации логарифма индекса сорбции фосфора (СНЕМ-004). Следовательно, одна и та же доза компоста даст разную доступность растениям и разный риск для воды на разных отвалах.

#### Что нужно измерять

Общий P, водоэкстрагируемый и растворённый реакционноспособный P, подходящий агрономический экстрагент, сорбцию и десорбцию P, фазы Fe/Al/Ca, P в растениях, опаде и наносах стока. «Добавили P» не равно «растения получили P».

**pH: переключатель сразу нескольких процессов**

pH влияет на:

- токсичность и подвижность металлов;
- сорбцию и осаждение P;
- микробную активность и состав сообщества;
- нитрификацию;
- заряд минеральных и органических поверхностей;
- отбор видов растений.

Поэтому материал нельзя выбирать по принципу «органика обычно буферизует». Он может поднять или снизить pH, а DOC способен изменить подвижность металлов и металлоидов независимо от общего pH. Нужны испытания на инкубацию и выщелачивание для пары «конкретный материал × конкретный субстрат».

**СЕС: не губка вообще, а набор заряженных мест**

Катионообменная ёмкость (СЕС) помогает временно удерживать  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и часть катионов металлов. Её создают глинистые минералы и зависящие от pH заряды органического вещества. Но:

- СЕС не удерживает  $\text{NO}_3^-$  тем же способом;
- высокая СЕС не гарантирует, что катион доступен растениям;
- каменистый субстрат с 5–30% мелкозёма имеет мало реакционноспособных поверхностей;
- компост способен поднять СЕС, но без минеральной матрицы часть растворённых продуктов может уйти.

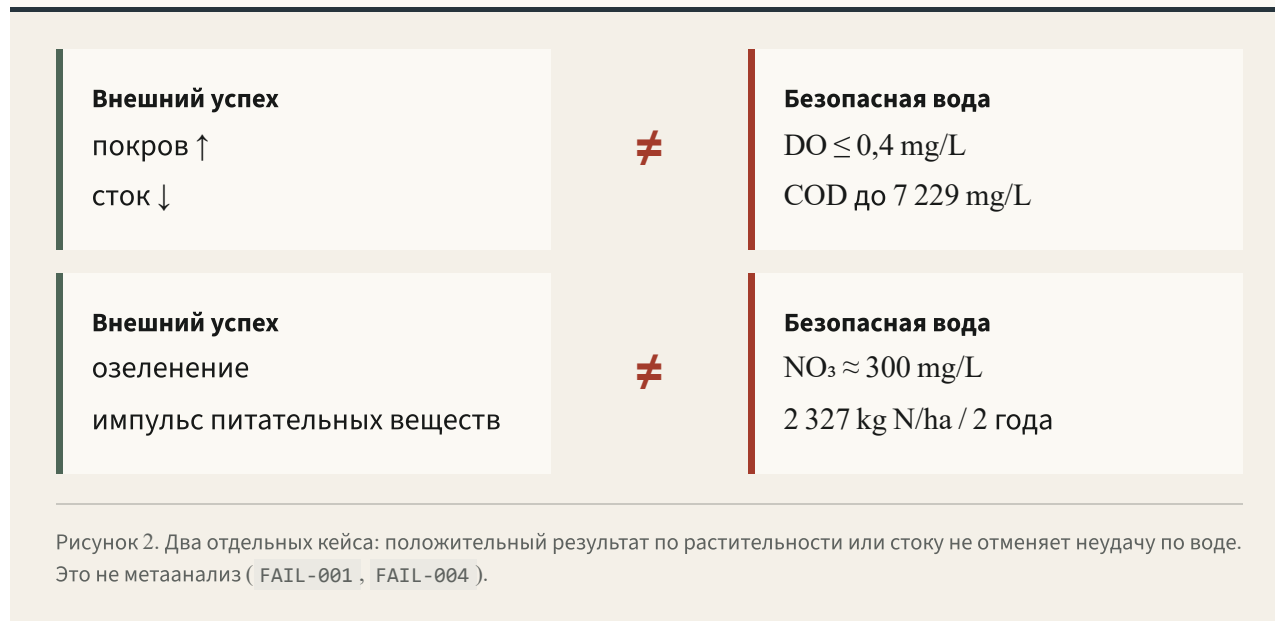
Отсюда важная роль суглинка в **KUZ-006**: это не только «земля под корни», а поверхность, вода и буфер, с которыми может взаимодействовать органический цикл.

| Блок    | Механизм и возможная польза                                                                              | Возможная неудача                                                                         | Что измерять                                                                                              |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Углерод | Энергия для организмов, РОМ, микробные остатки, агрегаты и органическое вещество, связанное с минералами | Быстрая минерализация до $\text{CO}_2$ ; ископаемый углерод искажает SOC                  | ТОС с учётом геогенного С, РОМ/МАОМ, дыхательная активность, С в составе агрегатов                        |
| Азот    | Старт растений и микробной биомассы                                                                      | Выщелачивание нитрата, потери $\text{NH}_3/\text{N}_2\text{O}$ , иммобилизация, засоление | Общий N, $\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ , минерализация, фильтрат, поглощение растениями |

| Блок      | Механизм и возможная польза                                                            | Возможная неудача                                                                       | Что измерять                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Фосфор    | Корни, энергия и биомасса                                                              | Сорбция Fe/Al или поверхностный сток и эвтрофикация                                     | Доступный и общий P, сорбция, P в поверхностном стоке и фильтрате                       |
| pH        | Управляет доступностью питательных элементов и токсичностью                            | Пирит может поддерживать кислотность десятилетиями                                      | pH, кислотность/щелочность, сульфат, Fe, кислотно-щелочной баланс                       |
| ЕС / соли | Диагностика растворённых солей                                                         | Осмотический стресс, солонцеватость, засоленный фильтрат                                | ЕС, основные ионы, SAR/ESP при необходимости                                            |
| СЕС       | Способность материала удерживать часть положительно заряженных питательных элементов   | Высокая СЕС не отменяет плохую структуру или токсиканты                                 | СЕС/ЕСЕС вместе с pH, гранулометрическим составом и органическим веществом              |
| Металлы   | Иммобилизация возможна при подходящих pH, составе органического вещества и минералогии | Мобилизация через DOC, изменение кислотности или окислительно-восстановительных условий | Общие, биодоступные и растворённые формы, поровая вода                                  |
| Агрегация | Корни, грибы, фауна и органическое вещество связывают частицы                          | Уплотнение, солонцеватость, механическое разрушение                                     | Объёмная плотность, сопротивление проникновению, водопрочность агрегатов, связность пор |

# 11. Вода

Вода вынесена в отдельный раздел, потому что хорошая реакция растений может сосуществовать с плохим состоянием воды.



| Показатель                        | Что показывает                                        | Риск ложного успеха                                                                |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Нитрат                            | Потерю доступного N и риск загрязнения ниже по стоку  | Биомасса растёт, но импульс питательных элементов выходит из системы               |
| DOC                               | Подвижный органический углерод и комплексообразование | Рост DOC способен переносить Cu и другие металлы                                   |
| COD / растворённый кислород       | Потребление кислорода и состояние принимающей воды    | Меньший поверхностный сток не означает безопасную воду при высоком COD и низком DO |
| Металлы                           | Перенос растворённых и взвешенных форм                | pH и DOC меняют подвижность после внесения                                         |
| Поверхностный сток / инфильтрация | Водный путь и эрозию                                  | Снижение стока может увеличить инфильтрацию и образование фильтрата                |
| Засоление                         | Массу растворённых солей                              | Озеленение не отменяет накопление или вынос солей                                  |

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАКТ).** FAIL-001 : высокая доза осадка целлюлозно-бумажного производства снизила поверхностный сток и эрозию, но сопровождалась DO ≤ 0,4 мг/л и COD до 7 229 мг/л. FAIL-004 : восстановление растительного покрова после внесения осадка сточных вод с низким C:N сопровождалось концентрацией

нитрата примерно до 300 мг/л и потерей 2 327 кг неорганического N/га за два года. Эти случаи не доказывают, что все органические материалы опасны; они доказывают, что показатели состояния воды обязательны.

## 12. Биология

### Биология: кто именно строит систему

#### Бактерии и археи

Они минерализуют органическое вещество, проводят нитрификацию и денитрификацию и участвуют в окислительно-восстановительной химии Fe/S. На горящем или кислом отвале могут сформироваться специализированные сообщества, но их присутствие не означает безопасного восстановления.

#### Грибы и микориза

Грибные гифы соединяют поры, участвуют в агрегации и помогают растениям получать P и воду. Инокуляция арбускулярными микоризными грибами (AMF) часто улучшает ранний рост в исследованиях на добычных землях, но обзор [ВГО-003](#) подчёркивает дефицит долгосрочных полевых результатов. Совместимость гриба, растения и субстрата важнее этикетки коммерческого препарата.

В 29-летнем хроноряде железорудных хвостов ([ВГО-004](#)) колонизация AMF возрастала после появления многолетней растительности, а разные роды появлялись в разные сроки. Это допускает и пассивное накопление симбионтов; отдельный вариант с инокулятом должен доказывать добавочную пользу по сравнению с естественным заселением.

#### Корни и растения

Корни создают биопоры, ризодепозиты и новый приток C. Но быстрый покров неместных трав может стабилизировать поверхность и одновременно задержать целевую сукцессию. Измерять нужно не только покров, но и размножение, пополнение сообщества, опад и траекторию местных и неместных видов.

#### Почвенная фауна

Фауна дробит опад, перемешивает материал и влияет на поры и агрегаты. Дождевые черви могут ускорять процессы, но интродукция неместных видов способна изменить местные экосистемы. Базовый дизайн не предусматривает внесения дождевых червей; сначала он отслеживает естественную колонизацию и использует показатели фауны.

#### Нужно ли добавлять «настоящую землю»

Есть три разные операции, которые нельзя смешивать:

1. **Нанесение верхнего плодородного слоя** — большой объём материала как физический слой и носитель питательных элементов.
2. **Перенос цельной почвы и банка семян** — перенос растений, семян, фауны и биоты вместе с горизонтом.
3. **Инокуляция малым объёмом** — малая доза ради живого сообщества, а не ради толщины слоя.

KUZ-007 показывает выраженную двухлетнюю реакцию растительного сообщества после переноса 20–60 см свежего почвенно-растительного слоя на 40 см суглинка. Но донорская почва была снята с лицензированной территории, которая сама предназначалась под добычу. Это спасение материала, а не оправдание разрушения сохранного донорского луга.

В10-001 показывает, что небольшие инокуляты на бывшей пашне могут шесть лет направлять разные траектории сообщества. В10-002 показывает раннюю пользу малых доз лесного верхнего почвенного слоя на добычных субстратах в тепличном опыте. Ни один из них пока не доказывает, что малая доза восстановит токсичную угольную отвальную породу.

#### Предпочтительная иерархия донорских материалов

1. свежий материал, спасённый с территории, которая неизбежно будет нарушена;
2. материал из локальной разрешённой расчистки или строительной операции;
3. минимальные почвенные крошки или инокулят с ограничением ущерба и мониторингом донорского участка;
4. культивированные местные микробные консорциумы только после проверки идентичности и функции;
5. коммерческий универсальный инокулят — не по умолчанию.

#### Как проверить уменьшение зависимости от внешнего вмешательства

Предлагаемый **индекс автономности** не сводится в одно число до получения данных. Он проверяет одновременно:

- почвенная добавка больше не вносится;
- орошение и удобрение прекращены после заранее ограниченного периода приживания;
- растительный покров, выживаемость и пополнение сообщества не падают ниже установленного порога;
- ежегодное поступление опада и корневых остатков замещает часть раннего внешнего поступления С;
- доступность минерального N/P не поддерживается только остаточным импульсом;

- микробная биомасса и функции, а также микориза сохраняются;
- устойчивость агрегатов и инфильтрация не ухудшаются;
- поверхностный сток и фильтрат остаются безопасными;
- сообщество не переходит к доминированию нежелательных видов.

Только совместное выполнение этих условий даёт основание сказать: система начала поддерживать себя. Даже тогда это будет молодой технозём и молодая экосистема, а не восстановленная древняя почва.

#### **Предварительный ответ на вопрос статьи**

Заново создать прежнюю почву в исторически короткий срок, вероятно, нельзя. Запустить формирование новой живой почвенной системы на части безопасных техногенных субстратов — научно правдоподобно и местами уже частично показано. Но органические отходы становятся ресурсом только после разделения источников, обработки, анализа и проверки пары «материал — субстрат». Без этого город не возвращает земле жизнь; он просто переносит на отвал ещё один поток риска.



**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Биологический успех — не максимальное число таксонов и не один ферментативный анализ. Важны функции, связь с растениями и водой, стойкость и соответствие среде. Ранний сигнал может исчезнуть; инокулят может не прижиться; более сложная смесь может работать хуже простой.

## 13. Мировые исследования и случаи

В основной синтез включены функционально разные случаи. Они не объединяются в метаанализ: объекты, материалы, дозы и показатели результата несопоставимы.



**Карьер Patilla, Cerrejón, Колумбия, 2013 год.** Фото: Hour.poinc, CC BY-SA 3.0. Снимок показывает добычный объект и размещённые за ним вскрышные материалы, но не участки хроноряда CASE-018/019, не подтверждает значения 63–89% и не изображает экологическое восстановление.

## Ключевые мировые случаи для итогового синтеза

Статус: закрытая отборная матрица, 26 сентября 2026 года. Это не рейтинг стран и не полный реестр. Выбраны случаи, которые меняют ответ на исследовательский вопрос, дают долгий срок, прямое сравнение или важное ограничение.

| Доказательство   | Где и что                                                                          | Почему ключевой                                                                                                                                                | Что не позволяет утверждать                                                                   |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-009/010     | Вирджиния, угольная почва; рандомизированные варианты; 16 и 27 лет                 | Редкое длительное причинное сравнение: контроль догнал варианты по части общих показателей, но фракции C/N и микробная биомасса сохранили наследие воздействия | Ни один вариант не доказан как полное восстановление референсной экосистемы                   |
| CASE-020         | Соколов, Чехия; ольха на буроугольной породе; 4–65 лет                             | Показывает накопление C/N/P, опада и органических горизонтов на протяжении десятилетий                                                                         | Хроноряд; минеральный профиль остаётся неполным, площадки различаются                         |
| CASE-023         | Самопроизвольная сукцессия в Соколове; 16–56 лет + повторное обследование          | Доказывает, что безопасная порода способна развивать внутреннюю траекторию «растения–опад–почва» без постоянного внесения органики                             | Не переносится на горящую, кислую или засоленную породу; ископаемый C усложняет оценку запаса |
| CASE-018/019     | Cerrejón, Колумбия; перенос верхнего слоя + восстановление сухого леса; до 21 года | Связывает растительность, опад, фауну и биогенные агрегаты                                                                                                     | Одна программа и хроноряд; восстановление оставалось частичным                                |
| CASE-021         | Garzweiler, Германия; 24 года                                                      | Разделяет вклад минеральной основы, N-фиксирующей пионерной культуры и компоста в структуру/SOC                                                                | Благоприятный лёссовый сельскохозяйственный технозём не равен сырой угольной породе           |
| CASE-022         | Лужица, Германия; кислая сернистая буроугольная порода; до 37 лет                  | Показывает, что окисление пирита может управлять химией десятилетиями, несмотря на лесной покров                                                               | Озеленение не доказывает устранение геохимического источника                                  |
| BIO-009          | Рекультивация угольных земель Западной Вирджинии; 2–32 года                        | Микробная сукцессия идёт, но сближение с референсом не гарантировано; pH, гранулометрия и SOM важнее календаря                                                 | Четыре площадки, а не продольный опыт; материалы не испытывались                              |
| CASE-001/004/033 | Кислые угольные породы Огайо/Шотландии; 10–16 лет                                  | Известкование, минеральную коррекцию и контроль источника нельзя заменить органикой; обслуживание имеет значение                                               | Старые материалы/дозы и неполные водные панели                                                |
| CASE-002         | Уэльс, компост из зелёных отходов вокруг деревьев; 11 лет                          | Нулевой/видоспецифичный результат разрушает тезис «компост всегда ускоряет деревья»                                                                            | Малая точечная доза, не реконструкция почвы всей площадки                                     |
| CASE-015/016     | Таконитовые хвосты Миннесоты; 2–9 лет                                              | Совмещает растительность, воду, стоимость и логистику; максимальный покров оказался не самым безопасным и дешёвым                                              | Не уголь; ранние сроки и специфичные отходы                                                   |

| Доказательство | Где и что                                                                                        | Почему ключевой                                                                                                                               | Что не позволяет утверждать                                                                                              |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-012       | Си/Мо-хвосты Британской Колумбии; 13 лет                                                         | Однократные осадки сточных вод оставили наследие по C/биомассе; меньшая доза была эффективнее на единицу массы                                | Другой контекст металлов/воды; высокая доза вызвала опасение по Zn                                                       |
| CASE-034       | Засолённые Си-хвосты Чили; 3 года                                                                | Доза/материал дали противоположные результаты по биомассе и мобилизации DOC/Cu; оливковые остатки не сработали                                | Орошаемая неугольная система; автономность не проверена                                                                  |
| CASE-025/026   | Просадочные угольные земли Шаньси; 5–7 лет                                                       | Органические материалы создают разные пулы C и микробные траектории; навоз не сделал систему подобной референсу                               | Сельскохозяйственные системы с повторными поступлениями; вода/грибы оценены неполно                                      |
| KUZ-006        | Кузбасский факторный опыт «суглинок/ верхний слой × местное семенное сено»; 4–9 лет              | Локальное доказательство того, что физическая корневая зона и биологическая траектория — разные рычаги                                        | Компост не испытывался; зелёный покров не равен автономности                                                             |
| НУР-001/011    | Южная Африка/Польша; изготовленные/ инокулированные материалы                                    | Ближайшие аналоги заранее биологически сконструированного материала перед посадкой/полевым применением                                        | Нет факторного сравнения В/С/D/E и В-time со зрелым компостом, прямой инокуляцией и предварительно заселённым материалом |
| MIC-001        | Постдобычная почва Пилбары; местные бактерии культивированы из 1 г почвы и доставлены в гранулах | Прямо доказывает техническую масштабируемость пути «малый донор → культура → носитель → постдобычная почва» и зависимость функции от варианта | Не весь микробиом, не компостный носитель, не долгий срок                                                                |

### Итог отбора

Этих случаев достаточно, чтобы одновременно показать шесть разных истин: органические материалы иногда помогают; доза и материал меняют результат; вода может ухудшиться при хорошем покрове; геология способна доминировать десятилетиями; растения могут строить внутренний цикл; инокулят способен изменить отдельные функции, но не гарантирует появления новой почвы.

## 13.1. Полная матрица случаев

В таблице ниже сохранены субстрат, почвенная добавка, доза, основа расчёта, дизайн опыта, продолжительность, показатели результата, положительный и отрицательный результаты, ограничения и идентификаторы источников настолько, насколько это зафиксировано закрытым корпусом.

### Долгосрочные и отрицательные полевые случаи

**Примечание к таблице:** «положительный» означает только заявленный измеренный эффект, а не полное восстановление экосистемы.

| Идентификатор | Срок   | Объект и исходный субстрат                    | Воздействие                                                                                                                    | Что измерено                                                 | Результат                                                                          | Почему этого недостаточно / риск                                                           |
|---------------|--------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-001      | 10 лет | кислая пиритсодержащая угольная порода, Огайо | сброженный осадок сточных вод, зола-унос, компостированный осадок целлюлозно-бумажного производства, верхний плодородный слой  | pH, растения и другие показатели                             | долгосрочные различия между материалами сохранялись                                | применялись старые стандарты для осадка; нужны данные о загрязнителях, воде и полный текст |
| CASE-002      | 11 лет | бывший угольный разрез, Уэльс                 | 0,75 кг муниципального компоста из зелёных отходов на дерево                                                                   | выживаемость, высота, диаметр на высоте груди (DBH) по видам | общего прироста высоты и DBH нет; выживаемость зависела от вида, у ольхи была хуже | малая точечная доза; не восстановление почвенного цикла всей площадки                      |
| CASE-003      | 7 лет  | буроугольный бассейн, Чехия                   | осадок сточных вод, бумажные отходы и кора, однократно                                                                         | C, микробная биомасса, дыхательная активность                | биологические и химические реакции сохранялись                                     | сложная смесь; нельзя определить действующий компонент                                     |
| CASE-004      | 16 лет | кислая земля, нарушенная угледобычей, Огайо   | 280 Мг/га материала десульфуризации дымовых газов (FGD) ± 112 Мг/га садового компоста; 20 см нового почвенного слоя с известью | растительность и состояние почвы                             | долгосрочный ответ отличался от раннего                                            | FGD не является органическим материалом; требуются данные о воде и сопоставление доз       |

| Идентификатор | Срок                      | Объект и исходный субстрат                                        | Воздействие                                                                                             | Что измерено                                                    | Результат                                                                                                       | Почему этого недостаточно / риск                                                                                                     |
|---------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-005      | 12 лет                    | Pb/Zn-содержащие хвосты, Миссури                                  | осадки сточных вод с известью/компостом против снятого верхнего плодородного слоя                       | урожайность растений, поглощение металлов, млекопитающие, почва | вариант на основе остаточных материалов сохранял работоспособность                                              | не угольная порода; риск привлечения животных и металлы не равны полной автономности экосистемы                                      |
| CASE-006      | 9 лет                     | бореальный открытый золотой рудник                                | восемь стратегий с торфом, осадками сточных вод и их сочетаниями                                        | система «почва — растение — микроорганизмы»                     | сочетания с торфом превзошли варианты без торфа; пятый год оказался информативнее раннего растительного покрова | не уголь; добыча торфа создаёт ущерб донорскому участку; для свежей публикации требуется полный текст                                |
| FAIL-001      | ранний поверхностный сток | угольный разрез                                                   | осадок целлюлозно-бумажного производства 224/672 Мг/га на сухую массу                                   | поверхностный сток, эрозия, DO, COD                             | сток в 4–6 раз меньше, эрозия снизилась с 47 до <1 Мг/га                                                        | высокая доза до появления растений дала DO ≤0,4 мг/л и COD 7 229 мг/л против 880 мг/л                                                |
| FAIL-003      | 2 года                    | пиритсодержащая и непиритсодержащая буроугольная отвальная порода | удобрение, осадок сточных вод, компост                                                                  | почвенный раствор на глубине 20/130 см, поток элементов         | ответы резко различались по субстрату                                                                           | на пиритсодержащей площадке — до 6 т Fe/га/год и 14 т сульфатной S/га/год; органические материалы не обеспечивают контроль источника |
| FAIL-004      | 3 года                    | рекультивированная угольная площадка, Пенсильвания                | 134 Мг/га осадка сточных вод с низким C:N                                                               | вода лизиметра на глубине 1 м                                   | восстановление растительного покрова сопровождалось импульсом нитрата и металлов                                | максимальная концентрация NO <sub>3</sub> около 300 мг/л; 2 327 кг неорганического N/га за два года; высокая доза опасна для воды    |
| FAIL-005      | 3 года                    | заброшенная угольная площадка, Пенсильвания                       | компостированный птичий навоз 78/156 Мг/га; свежий навоз с осадком бумажного производства при C:N 20/29 | выщелачивание питательных элементов и их удержание почвой       | из компоста вымылось <1% N; смесь навоза с осадком при C:N 29 потеряла 393 кг N/га, при C:N 20 — 107 кг N/га    | C:N не является единственным показателем зрелости; вывод относится к конкретным материалам из птичьего навоза и осадка               |



| Идентификатор | Срок        | Объект и исходный субстрат                                | Воздействие                                                                                                                                        | Что измерено                                                                      | Результат                                                                                                                                                                                                               | Почему этого недостаточно / риск                                                                                              |
|---------------|-------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KUZ-006       | 4–9 лет     | вскрышная порода, Кузбасс                                 | голая порода / 10 см суглинка / 10 см верхнего плодородного слоя × 0–3 нормы местного семенного сена                                               | химические показатели, флора, растительный покров, биомасса                       | суглинок с местным семенным сеном дал выраженную траекторию, близкую к естественной; верхний слой добавил запас сорняков                                                                                                | компост и навоз не испытывались; растительный покров не доказывает водную или микробную автономность                          |
| KUZ-006-P     | 4 года      | угольный отвал площадью 3 га, Кузбасс                     | ≥20 см лёссовидного суглинка + 5 т местного семенного сена                                                                                         | растительный покров, флора, высота                                                | покров 80–90%, 77 видов сосудистых растений                                                                                                                                                                             | производственный опыт без полного факторного повторения; растительный покров не равен восстановлению почвы                    |
| CASE-009/010  | 16 и 27 лет | угольная шахтная почва из песчаника/алевролита, Вирджиния | контроль; 30 см верхнего плодородного слоя; 112 Мг/га опилок; осадки сточных вод 22–224 Мг/га, n=4, рандомизированный полный блочный дизайн (RCBD) | SOM, N, минерализация, агрегация, фракции C/N, микробная биомасса, растительность | через 5 лет эффект добавок был силён; к 16 годам контроль приблизился по общим показателям SOM/N; через 27 лет общее распределение агрегатов во многом сблизилось, но осадки сохраняли наследие C/N и более высокую MBC | один показатель результата показывает сближение, другие — наследие; результата нельзя честно описать одним словом «сработало» |
| CASE-011      | 35 лет      | земля после открытой добычи, Иллинойс                     | суммарно 801–1815 Мг/га осадков сточных вод на сухую массу против полей с минеральным удобрением                                                   | следовые количества металлов в подземной воде                                     | большинство нормируемых металлов ниже пределов; Fe/Mn выше, ранний сигнал Zn уменьшился после изменения качества и регулирования осадков                                                                                | не проверялись нитрат, PFAS, лекарственные вещества, патогены и траектория экосистемы                                         |
| CASE-012      | 13 лет      | Cu/Mo-хвосты, Британская Колумбия                         | однократное внесение осадков сточных вод 0/150/250 Мг/га на сухую массу                                                                            | пулы C, биомасса, выбранные химические показатели                                 | преимущество по C и биомассе сохранилось; меньшая доза была эффективнее по запасённому C на единицу массы; при 250 Мг/га Zn превышал ориентир                                                                           | хвосты не равны угольной породе; неполные показатели воды и экологии                                                          |



| Идентификатор | Срок                                                                      | Объект и исходный субстрат                                                       | Воздействие                                                                                                                                              | Что измерено                                                                                                     | Результат                                                                                                                                                                   | Почему этого недостаточно / риск                                                                                                                                                                                                             |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-013      | 21 год                                                                    | загрязнённые металлами аллювиальные хвосты                                       | 224 Мг/га извести + 224 Мг/га осадков сточных вод                                                                                                        | физическое, химическое и биологическое состояние почвы, растения, металлы                                        | многие функции почвы улучшились; содержание металлов в растениях снизилось                                                                                                  | сохранялась проблема биодоступных Cd/Zn; опыт не рандомизирован и не относится к угольной площадке                                                                                                                                           |
| CASE-016      | 5–9 лет для ранних делянок; 2 года полномасштабных работ на момент статьи | крупнозернистые таконитовые хвосты, Миннесота                                    | 10–90 Мг/га торфа, садового/муниципального компоста, бумажных остатков; часть вариантов с удобрением                                                     | растительный покров, биомасса, ранняя стоимость и логистика                                                      | некоторые делянки с 10 Мг/га достигли 90% покрова к пятому году; высокая доза бумажных отходов требовала дополнительного N; источник ближе 100 км был экономически решающим | не уголь; бумажный поток не компостирован; программа частично совпадает с CASE-015; автономность экосистемы и почвы не измерялась                                                                                                            |
| CASE-015      | 2–3 вегетационных сезона                                                  | крупнозернистые таконитовые хвосты, Миннесота                                    | осадки сточных вод в дозах, соответствующих 100/200/400 фунтам доступного N на акр, с остатком бумажного производства или без него; стандартный контроль | химический состав инфильтрационной воды, масса нитрата, металлы, покров и стоимость                              | органические материалы увеличили покров; вариант 200N выбран авторами как компромисс                                                                                        | почти все варианты имели нитрат >10 мг/л; при 400N нитрата было примерно в 3 раза больше, чем при 200N; вариант 400N с бумажным остатком дал наибольший покров, но стоил ≥6× от 200N и высвобождал небольшие количества Hg/Co; срок короткий |
| CASE-017      | 2–19 лет, возрастной градиент                                             | отвалы угольной породы с восстановленным растительным покровом, Синграули, Индия | смешанные травы и деревья; отдельная органическая добавка не испытывалась                                                                                | биомасса, опад, корни, pH, объёмная плотность, влагоудерживающая способность, N/P, C по Уокли—Блэку, микробный C | с возрастом выросли растительная биомасса, измеренный органический C и MBC; к 19 годам сформировалось значительное поступление опада и корней                               | сравнивались разные площадки, а не повторные измерения; исходные различия и состав видов смешиваются с возрастом; угольный C может искажать SOC; расчётный баланс не равен измеренному потоку                                                |

| Идентификатор | Срок                            | Объект и исходный субстрат                                                                  | Воздействие                                                                                            | Что измерено                                                                                        | Результат                                                                                                                          | Почему этого недостаточно / риск                                                                                                                                          |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BIO-009       | 2–32 года, хроноряд             | рекультивированные контурные угольные разработки, Западная Вирджиния                        | засыпанная вскрышная порода + около 20 см верхнего плодородного слоя, уплотнение, смесь трав и бобовых | химический состав, гранулометрия, влажность, микробная биомасса/богатство, состав бактерий и грибов | микробные сообщества менялись постепенно; pH, SOM и гранулометрический состав были важными факторами                               | 32-летняя площадка не показала ясного сближения с эталоном по биомассе, богатству или составу; четыре площадки не равны продольному исследованию; добавки не испытывались |
| CASE-018/019  | 1–21 год, два хроноряда         | технозёмы угольной площадки в сухом лесу, Серрехон, Колумбия                                | перенос верхнего плодородного слоя и восстановление растительности                                     | микроструктура, биогенные агрегаты, следы макрофауны, физико-химические показатели, опад, SOM       | к 20 годам появились сформированные биогенные агрегаты; SOM достигло 63–89% эталона; опад связывает растительность с почвой        | одна программа восстановления; не повторные наблюдения одних деленок и не сравнение почвенных добавок; восстановление оставалось частичным                                |
| CASE-020      | 4–65 лет, хроноряд              | буроугольная отвальная порода, Соколов, Чехия                                               | облесение ольхой                                                                                       | запасы C/N/P, распределение по профилю, опад/органические горизонты, микробные связи                | C/N быстро накапливались первые 15–20 лет; верхние органические слои приблизились к эталону через 30–40 лет                        | минеральные слои и весь профиль отставали; различия материнских материалов и площадок смешиваются со временем                                                             |
| CASE-021      | 0–24 года, повторённый хроноряд | сельскохозяйственно рекультивированный лёсс над буроугольным разрезом, Гарцвайлер, Германия | пионерная фаза люцерны, севооборот, компост и вспашка                                                  | SOC, агрегаты, макропористость, связность пор, микробная биомасса                                   | минералогия основы, N-фиксирующая культура и компост выполняли разные функции; одни растительные остатки не удерживали высокий SOC | механизм переносим, но лёссовая сельскохозяйственная почва не равна сырой угольной породе; это хроноряд                                                                   |
| CASE-022      | до 35–37 лет                    | кислая сернистая почва буроугольной площадки, Лужица, Германия                              | мелиорация и облесение сосной/дубом                                                                    | организмы, корни/микориза, химический состав, баланс ионов в просачивающейся воде                   | часть биологических характеристик приблизилась к недобычным площадкам, выщелачивание снизилось                                     | окисление пирита определяло химический состав десятилетиями; внешнее восстановление леса не устраняет геохимический источник                                              |

| Идентификатор | Срок                                                     | Объект и исходный субстрат                                                      | Воздействие                                                                                                      | Что измерено                                                | Результат                                                                                                                                                              | Почему этого недостаточно / риск                                                                                                                   |
|---------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-023      | 16–56 лет + повторное обследование примерно через 15 лет | нерекультивированные угольные отвалы Соколова, Чехия                            | самопроизвольная сукцессия листовенных пород                                                                     | повторные измерения запасов С по глубине и микрорельефу     | средний наблюдаемый прирост почвенного С около 0,50 т С/га/год                                                                                                         | траектории площадок различались; в материнском материале есть ископаемый С; перенос возможен только после прохождения инженерного допуска          |
| CASE-024      | база оценок за 24 года                                   | 48 угольных разрезов, Южная Африка                                              | обычное восстановление с различным последующим обслуживанием                                                     | 299 многокритериальных оценок                               | пригодность земель и потери почвы часто соответствовали порогам; плодородие почвы, форма рельефа и видовой состав оставались слабыми местами                           | отраслевое наблюдательное сопоставление, а не опыт с почвенными добавками; показывает, что потребность в обслуживании может сохраняться            |
| CASE-025      | 5 лет                                                    | рекультивированные сельхозземли над просадками от угледобычи, Шаньси, Китай     | равные 2,7 т С/га в виде биоугля, компоста, остатка биогазовой установки, коровьего навоза или кукурузной соломы | общие, стабильные, лабильные и легко окисляемые фракции С   | разные материалы сформировали разные профили пулов С: биоуголь лидировал по общему С и индексу управления, компост — по легко окисляемой фракции, навоз — по лабильной | оценивался только С; поступление питательных элементов не выровнено; вода, растительность и автономность не измерялись                             |
| CASE-026      | 7 лет                                                    | рекультивированная кукурузная земля над просадками от угледобычи, Шаньси, Китай | контроль / минеральное удобрение / разложившийся куриный навоз, RCBD, n=3                                        | SOM/питательные элементы и богатство/ состав бактерий       | навоз улучшил SOM/N и изменил микробное сообщество                                                                                                                     | сообщество всё ещё отличалось от сельхозугодья; система требовала продолжающихся внесений; металлы, антибиотики, вода и грибы не оценены полностью |
| CASE-028      | 2–21 год, хроноряд                                       | облесённая угольная отвальная порода, Ранигандж, Индия                          | естественное и управляемое восстановление растительности                                                         | физико-химические показатели, MBC/ ферменты, растительность | с возрастом выросли многочисленные показатели почвы и растений                                                                                                         | различия площадок и истории смешиваются со временем; не опыт с добавками; оговорка об ископаемом С                                                 |

| Идентификатор | Срок                                    | Объект и исходный субстрат                                                              | Воздействие                                                                                                     | Что измерено                                                                           | Результат                                                                                                                                          | Почему этого недостаточно / риск                                                                                                                                           |
|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-030      | около 20–25 лет, поперечное сравнение   | отвал каменноугольной породы, Верхняя Силезия, Польша                                   | самопроизвольная сукцессия на голой породе / сукцессия по верхнему плодородному слою / посадки по верхнему слою | структура, вода, питательные элементы, лёгкие/окклюдированные/минеральные фракции C    | вариант с посадками и верхним слоем имел большее влагоудержание и больше стабильных фракций C; общий SOC не различался                             | исторической рандомизации не было; механическое уплотнение повредило почву с нанесённым верхним слоем; биологические показатели отсутствуют                                |
| CASE-031      | 6 лет                                   | искусственно созданный верхний почвенный слой над угольным разрезом, Кандиота, Бразилия | четыре многолетние травы; все засаженные деланки известковали, удобряли и ежегодно снабжали N                   | ТОС в слое 0–3 см, химические фракции C, спектроскопия органического вещества          | покровные культуры частично увеличили пулы C относительно голой искусственно созданной почвы; отдельные виды благоприятствовали C гуминовых кислот | естественный и голый варианты не рандомизированы; только поверхностный слой; ежегодные внесения; общий C оставался значительно ниже естественной почвы                     |
| CASE-032      | 15 месяцев                              | кислые песчаные касситеритовые хвосты, Жамари, Бразилия                                 | шесть вариантов растительного покрова × компост/NPK/известь, шесть повторностей                                 | химический состав, органическое вещество и физические свойства                         | варианты с известью, органическими материалами и удобрением улучшили химические показатели                                                         | органическое вещество и физические свойства не различались; короткий неугольный опыт и смешанное воздействие ограничивают причинную интерпретацию                          |
| CASE-033      | около 10 лет после внесения в 1978 году | пиритсодержащая угольная отвальная порода, Баадс, Шотландия                             | 0/10/25/50 т извести/га с торфом, осадком сточных вод, выветренным куриным помётом или Alginure                 | pH, доступные металлы, растительность; соседнее долгосрочное сравнение воды и металлов | на большинстве деланок с 50 т извести/га pH всё ещё был $\geq 5,12$ ; варианты только с органикой обычно оставались голыми                         | сохранившиеся деланки редки и несбалансированы; есть смешение влияния склона и притока; осадок до использования не анализировался; требовалось повторное внесение органики |

| Идентификатор | Срок       | Объект и исходный субстрат                                                                 | Воздействие                                                                                                | Что измерено                                                                     | Результат                                                                                                                                           | Почему этого недостаточно / риск                                                                                                                                        |
|---------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-034      | 3 года     | засолённые Cu-хвосты, Ла-Косинера, Чили                                                    | козий навоз / осадки сточных вод / виноградные или оливковые остатки / смеси, 13 вариантов × 3 повторности | CEC/SOC/NPK, микробные показатели, DOC/Cu в поровой воде, биомасса и Cu растений | вариант осадка B1 и некоторые системы с виноградными остатками/навозом дали высокую позднюю биомассу; варианты сохраняли преимущество над контролем | три года орошения; многие показатели плодородия снижались; очень большие ранние импульсы DOC/Cu; оливковые остатки почти устранили продукцию; автономность не проверена |
| CASE-035      | 12 месяцев | восстановленный профиль угольной площадки в наружных контейнерах, Мпумаланга, Южная Африка | девять вариантов с органикой/золой-уносом и контроль, n=4                                                  | pH, объёмная плотность, две культуры, корни, питательные элементы, C             | люцерна с компостированным навозом и древесной щепой была лучшим вариантом по совокупности показателей                                              | мини-лизиметр, один зимний и летний сезоны, высокие дозы и смешанные компоненты; нет данных о качестве воды или сохранении эффекта в поле                               |

### Предварительный синтез

1. Раннее озеленение систематически переоценивает успех: на сроках 9–16 лет ответы могут отличаться от 1–3 лет.
2. Самый опасный ложный успех — сочетание хорошего растительного покрова с потерями нитрата, DOC или металлов в воде.
3. Высокая доза органического материала не является сильным воздействием по определению; часто это сильный импульс питательных веществ и потребления кислорода.
4. Одно отношение C:N не гарантирует стабильность: по-прежнему необходимы происхождение материала, история процесса, зрелость, формы N и полевая гидрология.
5. Физический корнеобитаемый слой и биологическую траекторию следует тестировать отдельно от добавленного органического C.
6. Самый длинный контролируемый случай угольной площадки показывает причинно важную вещь: сама растительность может за десятилетия догнать раннее внесение материала по части функций, тогда как отдельные унаследованные фракции C/N остаются различными. Поэтому успех должен оцениваться по нескольким показателям и учитывать стоимость ускорения, а не только финальную разницу.

## 14. Отрицательные результаты

Отрицательный результат здесь — не обязательно полный провал проекта. Это результат, который опровергает простое обещание «внесли органику — стало лучше».

### Отрицательные и ограничивающие случаи

Статус: итоговый список для синтеза, 26 сентября 2026 года. «Отрицательный» здесь означает результат, который опровергает простое обещание, а не обязательно полную неудачу проекта.

| Доказательство | Положительный внешний признак                | Что пошло не так или не подтвердилось                                                                                  | Урок                                                                    |
|----------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| FAIL-001       | Снижение стока и эрозии на угольной площадке | DO $\leq 0,4$ мг/л и COD до 7 229 мг/л при высокой дозе бумажного осадка                                               | Меньше стока не означает более безопасную воду                          |
| FAIL-004       | Озеленение после внесения осадка сточных вод | Нитрат до $\sim 300$ мг/л и 2 327 кг неорганического N/га за два года                                                  | Наибольший импульс питательных веществ может стать событием загрязнения |
| FAIL-005       | Навоз смешан до номинального C:N 20/29       | Потери N оставались 107/393 кг/га, тогда как компост потерял $<1\%$ N                                                  | C:N не заменяет зрелость и историю процесса                             |
| FAIL-003       | Внесены удобрение/осадок/компост             | Пиритсодержащая порода давала массивный поток Fe/сульфатов независимо от органического материала                       | Активное кислотообразование требует контроля источника                  |
| CASE-002       | Компост из зелёных отходов вокруг деревьев   | Нет общего прироста высоты и диаметра ствола на высоте груди (DBH); выживание зависело от вида, у ольхи результат хуже | Эффект компоста нельзя обобщать между видами растений                   |
| CASE-015       | Максимальный ранний покров                   | Вариант с наибольшей дозой имел больший вынос нитрата и стоимость $\geq 6\times$                                       | Максимальная биомасса — плохое правило отбора                           |
| CASE-033       | Органические материалы на угольной породе    | Делянки только с органикой в основном оставались голыми; без достаточного известкования эффект не сохранялся           | Органика не заменяет коррекцию pH                                       |

| Доказательство | Положительный внешний признак                           | Что пошло не так или не подтвердилось                                                                       | Урок                                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| CASE-034       | Некоторые варианты дали высокую позднюю биомассу        | Ранние импульсы DOC/Cu; оливковые остатки почти остановили продукцию; питательные показатели снижались      | Идентичность отхода и химия воды важнее слова «органика»                 |
| CASE-032       | Химические показатели улучшились после воздействия      | ОМ и физические свойства через 15 месяцев не различались                                                    | Коррекция плодородия не равна почвообразованию                           |
| CASE-029       | Ранний ответ ферментов/растений                         | Биологический выигрыш не сохранился; определяющими оставались pH/EC/ солонцеватость/вода                    | Ранний микробный сигнал может быть временным                             |
| BIO-006        | Рекультивированное пастбище пригодно для выпаса         | Выпас/вытаптывание увеличили уплотнение; огороженный участок удерживал больше воды                          | Животные допустимы после этапа стабилизации, а не до него                |
| BIO-009        | 32 года стандартной рекультивации                       | Микробная биомасса, богатство и состав не показали ясного сближения с референсом                            | Возраст + покров не гарантируют восстановления микробиома                |
| MIC-001        | Культивированные местные бактерии улучшили N/SIR        | Смесь бактерий + цианобактерий не улучшила ни одного измеренного свойства почвы; разнообразие не изменилось | Больше организмов или сложности не обязательно лучше                     |
| MIC-003        | Добавление микробиома способно восстановить функцию     | Инокулят с низким разнообразием не восстановил нитрификацию                                                 | Культивирование с потерей разнообразия может удалить необходимые гильдии |
| MIC-006        | Инокуляция AMF увеличила колонизацию корней             | Ферменты и гломалин не улучшились                                                                           | Маркер колонизации не равен функции экосистемы                           |
| НУР-001        | Некоторые инокуляты улучшили ранние показатели растений | Чай из местной шахтной почвы не помог; поздние различия биомассы сузились                                   | «Местная живая почва» сама по себе не доказывает пользу                  |

### Как использовать

Каждый будущий вариант должен иметь парный показатель безопасности и заранее описанное условие неудачи. Ни один положительный результат для растений не отменяет оценку воды, загрязнителей, стойкости или воздействия на донорский участок.

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Зелёный склон может быть этапом восстановления. Он может быть и хорошо замаскированной проблемой.



# 15. Долгосрочные исследования

| Недели–5 лет                                                                             | 7–16 лет                                                          | 20–40 лет                                                                                    | 56–65 лет                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| растительность ·<br>ферменты ·<br>минеральный N ·<br>фитотоксичность ·<br>водные неудачи | стойкость ·<br>сближение ·<br>наследие<br>внесённых<br>материалов | органические горизонты ·<br>агрегаты · циклы опада/<br>корней · фауна ·<br>устойчивые пулы C | продолжающаяся<br>почвообразовательная<br>траектория |
| эксперименты /<br>полевые повторные<br>наблюдения                                        | продольные и<br>повторные<br>наблюдения                           | опыты + хроноряды                                                                            | хроноряд; не единый 65-летний<br>опыт                |

Рисунок 3. Горизонт доказательств и процессы, различимые на разных сроках. Длина блока обозначает временное окно, а не размер эффекта.

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАКТ).** Временные окна корпуса показывают разные процессы: недели–5 лет — ранний отклик растений, ферменты, минеральный N, фитотоксичность и проблемы с водой; 7–16 лет — устойчивость эффекта, сближение вариантов и наследие внесённых материалов; 20–40 лет — органические горизонты, агрегаты, фауна и циклы опада и корней; 56–65 лет — продолжающаяся почвообразовательная траектория.

Вирджиния даёт редкое длительное рандомизированное сравнение: к 16 и 27 годам контроль сблизился с вариантами внесения по части общих показателей, но отдельные фракции C/N и микробная биомасса сохраняли наследие воздействия. Соколов 4–65 лет показывает накопление C/N/P и формирование горизонтов, однако это хроноряд. Serreñón до 21 года связывает растительность, опад, фауну и биогенную структуру, но не является рандомизированным опытом внесения материалов. Лужица показывает многолетнее преобладание пиритной геохимии даже под растительностью.



**Отвал Smolnická, Соколовский буроугольный бассейн, Чехия, 2023 год.** Фото: Lubor Ferenc, CC BY-SA 4.0. Это современный постдобычный ландшафт того же бассейна, но не конкретные участки возрастного ряда CASE-020/023 ; фотография не доказывает измеренные изменения C, N, P или почвенного профиля.

**Обязательная граница:** хроноряд сравнивает участки разного возраста; продольное исследование повторно измеряет тот же эксперимент. Единую «65-летнюю кривую» из разных участков рисовать нельзя.



Bundesarchiv, Bild 183-1987-0212-305  
Foto: Link, Hubert | 22. Januar 1987

**Лесной остров на территории бывшего разреза Lohsa III, Лужица, 1987 год.** Фото: Hubert Link; Bundesarchiv, Bild 183-1987-0212-305 / CC BY-SA 3.0 DE. Снимок показывает рекультивированный участок региона, но не измеряет кислотность, вынос элементов или состояние конкретной площадки CASE-022 .



## 16. Технозёмы

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Технозём (Technosol) — не обещание вернуть историческую почву, существовавшую до добычи. Это созданная или глубоко преобразованная почвенная система, в которой минеральная корневая зона, почвенные добавки, растения и биологические процессы могут со временем сформировать функции.

Функциональный технозём требует: безопасного материнского материала; достаточной доли мелкозёма; рыхлой укладки без разрушительного уплотнения; управляемой воды; совместимых pH/ЕС; квалифицированной органики; растений и мониторинга. Опыт Garzweiler показывает, что минеральная основа, пионерная азотфиксирующая культура и компост выполняют разные функции. Факторный опыт в Кузбассе показывает различие между физической корневой зоной и биологической траекторией.



**Открытый буроугольный разрез Garzweiler, Германия, 2023 год.** Фото: Stephan Sprinz, CC BY 4.0. Фотография показывает масштаб добычного объекта, но не исследованный почвенный профиль и не результат 24-летней рекультивации CASE-021.

# 17. Гипотеза предварительно живого материала

| Звено гипотезы                                                                  | Прямое доказательство                                      | Близкий аналог                                                                   | Не проверено                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Безопасные органические потоки → зрелый компост                                 | Да: стандарты, полевые опыты и данные о зрелости           | Муниципальные и сельскохозяйственные системы компостирования                     | Не существует универсальной рецептуры для всех потоков |
| Небольшой биологический инокулят → размножение части организмов                 | Да: культивируемые местные бактерии из 1 г донорской почвы | Носители, синтетические сообщества (SynCom), ловушечные культуры                 | Нет универсальной дозы донорского материала            |
| Вторичное созревание → функционально иной материал                              | Механистически правдоподобно                               | Польский искусственно созданный компост и аналоги с предварительным выращиванием | Нет прямого полевого сравнения В/С/Д/Е                 |
| Предварительно заселённый материал → устойчивое преимущество в полевых условиях | Нет                                                        | Ранние аналоги по реакции растений и микроорганизмов                             | Центральное обещание гипотезы                          |
| Снижение внешних внесений                                                       | Частично в долгосрочных траекториях                        | Самопроизвольная сукцессия и устойчивая растительность                           | Не доказано для системы Е                              |

**НЕИЗВЕСТНО (UNKNOWN).** Не найден прямой эксперимент, доказывающий преимущество предварительно заселённого зрелого компоста перед обычным зрелым компостом или прямой инокуляцией. Это не заявление о мировой новизне; это граница закрытого поиска.

## 1. Исходная идея Натальи

Проверяемая последовательность состоит не в прямом внесении отходов или обычного компоста на отвал. Она предполагает:

1. собрать прослеживаемые и безопасные органические потоки;
2. провести контролируемое компостирование с санитарно достаточной термофильной фазой;
3. подтвердить зрелость и отсутствие неприемлемых загрязнителей;
4. после термофильной фазы внести небольшое количество совместимой живой почвы или другого биологического инокулята;
5. дать смеси пройти отдельную вторичную фазу созревания;
6. внести полученный материал только на инженерно безопасный, подготовленный техногенный субстрат;
7. проверить, возникает ли более устойчивый цикл «растения → корни и опад → микроорганизмы и фауна → доступные элементы → новые растения».

Ключевое отличие от обычного вопроса «помогает ли компост» — предполагаемый дополнительный эффект **инокуляции до внесения и последующего развития сообщества в органическом носителе.**

## 2. Найдены ли прямые аналоги

В пределах проведённого мирового поиска **не найден опубликованный эксперимент, полностью совпадающий со всей последовательностью:**

готовый санитарно безопасный зрелый компост → малое количество совместимого инокулята из естественной почвы → контролируемое вторичное созревание → подготовленная угольная порода → растения → долгосрочная полевая проверка безопасности и снижения зависимости от внешних поступлений.

Это не доказательство новизны и не утверждение, что такого опыта нигде не было. Это граница найденной литературы.

После финального целевого поиска наиболее близкими оказались **два разных аналога, каждый закрывающий только часть последовательности.**

НУР-011 (Польша, 2026) — наиболее близкий по назначению продукта и полевому применению. Смесь куриных перьев, пшеничной соломы и лигнита 20:60:20 инокулировали тремя культивированными штаммами **в начале** процесса, компостировали 41 день в динамическом реакторе, а готовый продукт внесли на постдобычную песчаную почву в Конине. Поздней инокуляции после санитарной стадии не было; в поле имелись лишь один обработанный и один невнесённый участок, без варианта с тем же зрелым неинокулированным компостом. Поэтому статья показывает, что заранее микробно обогащённый компост из отходов можно изготовить и применить на постдобычной земле, но не показывает, ведёт ли он себя иначе обычного зрелого компоста.

НУР-001 Coaltech/University of Cape Town — наиболее близкий по конструкции **инокулят → отдельная предпосадочная инкубация → минеральный субстрат угольного происхождения.** Смесь 95% ультратонких хвостов углеобогащения и 5% солодового остатка инокулировали компостным или вермикомпостным «чаем», жидкостью пивоваренного дигестера, коммерческим консорциумом либо «чаем» из местной шахтной почвы, активировали и выдерживали семь дней перед посадкой *Eragrostis tef*. Система отличается от исходной гипотезы: органический компонент не был зрелым компостом, инокулят был жидким, вторичная стадия была короткой, а опыт — горшечным.

Тем не менее он даёт причинно важный результат. Компостный «чай» и коммерческий консорциум улучшили ранние показатели растений, а инокулят из местной шахтной почвы — нет. Ко второму циклу различия в микробной биомассе

стали небольшими и не объясняли продуктивность растений. Следовательно, сам факт добавления живой местной почвы не гарантирует полезного результата; важны происхождение донора, функция сообщества, носитель и судьба инокулята после посадки.

### 3. Ближайшие мировые технологии

| Источник                                    | Последовательность                                                                                                                  | Категория                                        | Что добавляет к гипотезе                                                                                          | Главная граница                                                                                                |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| НУР-001 Coaltech 2023                       | хвосты углеобогащения + 5% солодового остатка → жидкий микробный инокулят → 7 дней инкубации → сосуды                               | близкий аналог E, не прямое совпадение           | предварительная инкубация биологически усиленного технозёма; прямое сравнение нескольких инокулятов               | не зрелый компост, короткий срок; «чай» из местной почвы не помог                                              |
| НУР-011 Польша 2026                         | перья + солома + лигнит → культивированный инокулят в день 0 → 41 день компостирования → 18,3 т/га на постдобычный песок → кукуруза | инженерно подготовленный инокулированный компост | полный путь от смеси отходов через инокулированное компостирование до полевого применения; есть контроль процесса | инокулят внесён не поздно; поле не сравнивает инокулированный и обычный компост, по одному участку, один сезон |
| НУР-002 Asemaninejad и соавт. 2018          | остатки добычи + осадок целлюлозного производства + <0,02% лесного гумуса                                                           | близкий аналог C                                 | очень малое внесение донорской почвы иногда существенно меняло биомассу и микробиом                               | вторичное созревание не установлено; Cu/Ni иногда становились более растворимыми                               |
| НУР-003 Romero-Estonllo и соавт. 2023       | шахтная почва + компост, стабилизация 15 дней → PGPR/AMF при посадке                                                                | близкий аналог D, не прямое совпадение           | PGPR дали эффект; результат AMF отдельно и совместно не был универсальным                                         | инокулят внесён при посадке, а не до отдельного созревания                                                     |
| НУР-004 Li и соавт. 2026                    | коровий навоз + рисовая солома → инокуляты для стадий в дни 0/5/14/22                                                               | аналог процесса компостирования                  | время инокуляции меняло сукцессию, TN, гумификацию, GI и отклик в горшках                                         | не донорская почва и не шахтный субстрат                                                                       |
| НУР-005/006 исследования сукцессии компоста | термофильная фаза → охлаждение → длительное созревание                                                                              | механизм                                         | зрелый компост биологически не статичен; сообщество и N/C продолжают меняться                                     | нет полевого результата B/C/D/E                                                                                |
| НУР-007 Ngo и Cavagnaro 2018                | компост × 40 дней предпосадочного увлажнения × AMF/растение                                                                         | аналог B-time и прямой инокуляции D              | предпосадочная история меняет минеральный N; компост может повысить рост и снизить колонизацию AMF                | сельскохозяйственная горшечная система, не E                                                                   |



| Источник                   | Последовательность                                                                              | Категория                     | Что добавляет к гипотезе                                                     | Главная граница                                        |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| НУР-008 Ткач и соавт. 2015 | стерильный песок или компост + 10% естественной почвы → растения и последовательное разбавление | С                             | среда-получатель и растение фильтруют сообщество; возможен перенос патогенов | нет вторичного созревания и шахтного субстрата         |
| НУР-009 Нап и соавт. 2022  | слой донорской почвы 1/3/5 см → трёхлетнее полевое восстановление                               | отклик на дозу переноса почвы | происхождение и количество донора совместно направляют траекторию            | это 10/30/50 л/м <sup>2</sup> , а не малый инокулят    |
| НУР-010 SARE ONE22-422     | готовый компост + 10/25/50% отработанного грибного субстрата → 14 дней                          | наиболее близкая процедура    | грибная биомасса и F:В менялись с дозой до внесения                          | поле отменено; нет результатов по растениям/почве/воде |

#### 4. Что уже доказано

##### Доказано непосредственно

- Термофильная фаза радикально перестраивает микробиом компоста; охлаждение и созревание сопровождаются новой сукцессией. Добавлять чувствительное сообщество естественной почвы до санитарной термофильной стадии нелогично, если цель — сохранить именно его живые компоненты.
- Даже зрелый компост, пригодный для коммерческого применения, продолжает меняться при продолжительном созревании: снижаются дыхательная активность и содержание растворимого лабильного С, меняется бактериальное сообщество и усиливается нитрификация (НУР-006).
- Время внесения целевых микробных консорциумов способно изменить процесс компостирования и итоговые показатели продукта (НУР-004). Это доказательство значения времени инокуляции, но не доказательство превосходства естественной почвы.
- На материалах добычных земель некоторые инокулянты улучшают приживание растений, а другие при том же носителе не дают эффекта (НУР-001, НУР-003).
- Очень малое внесение лесного гумуса может воздействовать на реакцию растений и микроорганизмов в искусственно созданном технозёме, но эффект зависит от добычного остатка и органического носителя, а подвижность металлов может ухудшиться (НУР-002).
- Происхождение и доза донорского материала важны; больший перенос почвы часто сильнее направляет сообщество, но увеличивает экологическую цену (НУР-009).
- Инокулят может переносить нежелательные организмы, а богатый питательными элементами компост может ослабить колонизацию AMF (НУР-007, НУР-008).

**Подтверждено близкими механизмами**

- Вторичное созревание может снизить долю легко разлагаемого С и нестабильность с преобладанием  $\text{NH}_4$ ; это должно проверяться по дыхательной активности, DOC, отношению  $\text{NH}_4:\text{NO}_3$  и фитотоксичности, а не по календарю.
- Добавление минеральной фракции создаёт поверхности для сорбции и потенциальных органо-минеральных связей. Их величина определяется содержанием глины, минералогией, оксидами Fe/Al, Ca, pH и растворённым органическим веществом; одно наличие почвенного инокулята не доказывает стабилизацию.
- Предварительная инкубация способна изменить исходный импульс питательных элементов, но направление не универсально: нитрификация может уменьшить  $\text{NH}_4$  и одновременно накопить мобильный  $\text{NO}_3$ .

**5. Что не доказано**

- Не доказано, что система Е в среднем лучше обычного зрелого компоста (В), прямого внесения цельной донорской почвы (С) или культивированного инокулята непосредственно при внесении (D).
- Не доказано, что естественная почва является лучшим инокулятом по сравнению с микробиомом компоста, культивированными местными консорциумами, AMF/PGPR или спонтанной колонизацией при участии растений.
- Не установлена универсальная минимальная эффективная доза донорской почвы.
- Не доказано, что дополнительное микробное разнообразие сохранится после контакта с добычным субстратом, климатом и растением.
- Не доказано снижение потребности в повторном внесении через 5–20 лет.
- Не доказана безопасность в отношении стока/фильтрата, металлов, нитрата, Р, патогенов и зачатков инвазивных организмов.
- Не доказано, что искусственно собранное сообщество движется к местной референсной экосистеме, а не к устойчивому, но иному антропогенному состоянию.

**6. Химические основания****Углерод**

Во время первой фазы легкодоступные соединения минерализуются до  $\text{CO}_2$ , воды и микробных продуктов. Часть С переходит в микробную биомассу и некромассу; часть остаётся как дисперсное органическое вещество. Вторичное созревание после добавления минеральной почвы может дать новые минеральные поверхности для сорбции и агрегации, но защита зависит от минералогии и насыщения поверхностей. Возможен и обратный эффект: инокуляция ускорит разложение, увеличит потери  $\text{CO}_2$  и оставит меньше органического С к моменту внесения.

**Азот**

Органический N проходит аммонификацию до  $\text{NH}_4^+$ , микробную иммобилизацию, нитрификацию до  $\text{NO}_3^-$ , газовые потери и, в анаэробных микроразонах, денитрификацию. Более зрелый материал обычно даёт меньший шок лабильного N, но вторичное созревание не гарантирует меньшего полевого риска: превращение  $\text{NH}_4^+$  в  $\text{NO}_3^-$  способно повысить мобильность N. Поэтому проверяются не только общий N или C:N, но и  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , потенциально минерализуемый N, дыхательная активность и N в фильтрате.

**Фосфор**

P высвобождается при минерализации, включается в микробную биомассу, сорбируется оксидами Fe/Al, осаждаётся с Ca или остаётся растворимым. Минеральная фракция донорской почвы может уменьшить содержание растворённого P при подходящей сорбционной ёмкости или, наоборот, внести P и органические лиганды и повысить подвижность. Требуются испытания сорбции и измерение водоекстрагируемого P конкретной смеси.

**pH и СЕС**

Компост и донорская почва способны увеличить буферность и СЕС благодаря заряженным органическим/минеральным поверхностям. Но pH смеси нельзя надёжно получить массовым усреднением. В пиритсодержащей породе кислотообразование может многократно превышать буферную способность добавки; в засоленном/солонцеватом материале органическое внесение не заменяет коррекцию солей/солонцеватости.

**Соли и вода**

Вторичное созревание не удаляет автоматически растворимые соли. ЕС, хлорид, сульфат и натрий должны измеряться до внесения. Улучшение агрегации и влагоудерживающей способности полезно только в том случае, если одновременно не растут DOC/COD, нитрат, P и металлы в воде.

**7. Биологические основания**

Небольшая порция совместимой донорской почвы теоретически может внести бактерии, грибы, пропагулы AMF, деструкторов, простейших, нематод, микроартропод, споры и семена. Она также добавляет минеральную поверхность и питательные элементы, поэтому без контроля со стерилизованным донорским материалом биологический эффект нельзя отделить от физико-химического.

Почему эффект может сохраняться:

- органический носитель даёт инокуляту защищённую среду и субстрат до контакта с неблагоприятной матрицей добычных отходов;
- вторичная фаза позволяет заселить носитель и сформировать взаимодействия;
- после посадки корни дают новую нишу и источник углерода;

- совместимый донорский материал может ускорить поступление редких функциональных групп.

Почему эффект может исчезнуть:

- зрелый компост уже имеет большое собственное сообщество;
- pH, соли, металлы и влажность среды-получателя, а также видовой состав растений отфильтруют большинство внесённых таксонов;
- инокулят может быть количественно слишком мал или функционально несовместим;
- богатый питательными элементами компост может снизить зависимость растений от AMF;
- различие сообществ может быть ранним и исчезнуть после истощения лабильного C.

## 8. Риски

1. Патогены, паразиты, семена сорняков, инвазивные организмы и нежелательные грибы из донорской почвы.
2. Повреждение донорской экосистемы при извлечении почвы.
3. Импульс нитрата, P и солей после вторичного созревания.
4. Мобилизация металлов и металлоидов органическими лигандами или изменённым pH.
5. Анаэробные зоны, запах, метан/N<sub>2</sub>O и высокая потребность в кислороде при нестабильном продукте.
6. Размножение сообщества, которое хорошо растёт в носителе, но плохо функционирует в добычном субстрате.
7. Ложное объяснение эффекта «микробами», когда его вызвали минералы или питательные элементы донорской почвы.
8. Стоимость и воспроизводимость: микробиом может быть нестабилен от партии к партии.

## 9. Проблема донорской почвы

Найденные дозы охватывают порядки величины, но не образуют универсальной кривой «доза–ответ»:

- НУР-002 : лесной гумус менее 0,02% сухой массы органического носителя — чрезвычайно малый сигнал;
- ВТО-002 : 5% и 25% свежей лесной почвы в тепличной смеси с постдобычным субстратом — уже существенная доля;
- НУР-008 : 10% об./об. естественной почвы и последующие последовательные разведения в контролируемом микрокосме;

- НУР-009 : перенос слоя почвы толщиной 1, 3 и 5 см — около 10, 30 и 50 л/м<sup>2</sup>, экологически дорогой перенос;
- НУР-010 : 10–50% отработанного грибного субстрата, богатого грибами, — добавка-носитель, а не малый почвенный инокулят.

Эти числа нельзя сложить в один «оптимальный процент». Они различаются по цели, единице дозы, донорскому материалу и среде-получателю. Для нового опыта необходим логарифмический пилотный ряд доз с контролями из живого и стерилизованного материала. Приоритетная иерархия донорских источников:

1. материал, который всё равно будет законно снят или уничтожен;
2. малый образец ризосферы или лесной подстилки, размножаемый без повторного изъятия;
3. культивированный на месте совместимый консорциум с известной биобезопасностью;
4. коммерческий инокулят только после подтверждения таксонов и функций;
5. неповреждённое ценное донорское местообитание — исключить.

#### 10. Сравнение систем A/B/C/D/E и B-time

| Система | Вариант                                                                                      | Ожидаемое различие                                                        | Что может дать ложный вывод                                                                                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A       | шахтный субстрат без органического внесения                                                  | исходная естественная сукцессия и геохимическое ограничение               | разные исходные пятна, дождь семян и гидрология                                                                        |
| B       | квалифицированный зрелый компост                                                             | C/питательные элементы/структура + собственный микробиом компоста         | ранний импульс питания принять за почвообразование                                                                     |
| C       | B + малое количество цельной живой донорской почвы, смешанные при внесении                   | перенос цельной донорской почвы без предварительного развития в компосте  | минералы/питательные элементы донора; жёсткий субстрат сразу отфильтрует инокулят                                      |
| D       | B + культивированный местный бактериальный/грибной инокулят, смешанные при внесении          | перенос культивируемой фракции без предварительного развития в компосте   | эффект носителя; культивационное смещение; жёсткий субстрат сразу отфильтрует инокулят                                 |
| E       | предварительно заселённый зрелый компост + контролируемое вторичное созревание               | возможная колонизация носителя, изменённые формы C/N и сообщество до поля | эффект дополнительного времени/влаги/аэрации, а не живого инокулята; перенос патогенов; потери C/N; накопление нитрата |
| B-time  | тот же зрелый компост, прошедший такую же вторичную выдержку, как E, но без живого инокулята | отделяет эффект времени/влажности/аэрации от предварительного заселения   | не контролирует носитель, если его не добавить отдельно                                                                |



Научное основание ожидать различие Е с В/С/D и В-time существует, потому что созревание и время инокуляции способны изменить химические свойства и сообщество. Научного основания заранее считать Е лучше нет.

## 11. Теоретический расчёт

### 11.1 Назначение

Это **МОДЕЛЬ / ГИПОТЕЗА, НЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ФАКТ**. Расчёт показывает масштаб нагрузки и помогает отсеять опасные варианты; он не предсказывает рост растений или формирование почвы.

### 11.2 Один наблюдавшийся профиль материала

Для прозрачного примера использовано не придуманное значение «среднего компоста», а эмпирическое среднее для козьего компоста из **ORG-007** (образцы аналитической лаборатории Университета штата Юта, 2005–2019): влажность 54%; в исходном состоянии N 1,0%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,9%, K<sub>2</sub>O 1,9%; pH 8,4; EC 5 дСм/м; C:N 10. Пересчёт на сухое вещество даёт примерно N 2,17%, элементный P 0,85%, элементный K 3,43%; ориентировочный C из указанного C:N × N — около 21,7% сухой массы. Последняя величина годится только для предварительной массовой оценки и не заменяет прямой анализ общего органического углерода (ТОС).

| Доза сухого компоста      | Влажная масса при 54% влажности | Примерный С | Общий N     | Элементный P | Элементный K |
|---------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 20 Мг сухого вещества/га  | 43,5 Мг/га                      | 4,35 Мг/га  | 435 кг/га   | 171 кг/га    | 685 кг/га    |
| 50 Мг сухого вещества/га  | 108,7 Мг/га                     | 10,87 Мг/га | 1 087 кг/га | 427 кг/га    | 1 713 кг/га  |
| 100 Мг сухого вещества/га | 217,4 Мг/га                     | 21,74 Мг/га | 2 174 кг/га | 853 кг/га    | 3 426 кг/га  |

Формула для каждого питательного элемента: нагрузка, кг/га = доза на сухую массу, Мг/га × концентрация, % сухой массы × 10.

Эта таблица не рекомендует козий компост и не говорит, что весь общий N/P/K станет доступным. Она показывает, почему даже «умеренная» доза на сухую массу может внести сотни килограммов питательных элементов на гектар и почему дозу следует ограничивать с учётом риска для воды, а не желаемой толщины слоя.

### 11.3 Масса инокулята

Если к 20 Мг сухой массы носителя применить долю **HVP-002** (<0,02% сухой массы), это менее 4 кг сухого гумуса на гектар. Если применить 5% донорской почвы, это 1 Мг/га; 25% — 5 Мг/га. Эти режимы различаются в сотни и тысячи раз и не являются эквивалентными вариантами воздействия.

#### 11.4 Что модель принципиально не вычисляет

- рН и ЕС нельзя честно вывести линейным усреднением;
- потенциально минерализуемый N требует инкубации конкретной смеси;
- доступность P требует данных о сорбции/десорбции для конкретного постдобычного субстрата;
- сохранение C требует отделения C компоста, нового растительного C и ископаемого угольного C;
- реакция воды требует колоночного или лизиметрического опыта.

#### 12. Может ли E реально отличаться от обычного компоста

**Да, измеримо отличаться может.** Литература показывает, что сукцессия сообщества, длительность созревания, история влажности и состав инокулята меняют микробную биомассу/состав, превращения C, формы N, показатели гумификации и иногда состояние растений.

**Но дополнительное преимущество E не доказано.** Эффект может быть равен B, если зрелый компост уже несёт функционально достаточное сообщество; равен C или D, если заселение происходит столь же быстро после прямого внесения; равен B-time, если различие создаёт только дополнительная выдержка; или хуже B/C/D из-за потери питательных элементов, накопления нитрата, переноса патогенов, несоответствия донорского материала, подавления AMF или дополнительной стоимости.

Критически важный недоказанный переход:

изменение микробиома и показателей зрелости во время вторичной фазы → более безопасная вода и более самостоятельная постдобычная почвенная система спустя годы.

Именно этот переход должен проверять эксперимент.

#### 13. Как проверить экспериментально

##### Этап 1 — контролируемый мезокосм

На одном тщательно охарактеризованном безопасном постдобычном субстрате:

- **а**: подготовленный постдобычный субстрат без компоста;
- **в**: обычный зрелый квалифицированный компост;
- **с**: B + малое количество цельной живой донорской почвы, смешанные при внесении;
- **д**: B + культивированный местный бактериальный/грибной инокулят, смешанные при внесении;



- **E** : предварительно заселённый зрелый компост + заданное вторичное созревание до внесения;
- **B-time** : тот же зрелый компост, прошедший такую же вторичную выдержку, как E, но без живого инокулята;
- **C-killed** : та же масса донорского минерального материала после стерилизации;
- **D-killed/carrier** : инактивированный культивированный продукт + идентичный носитель;
- **E-killed/carrier-time** : тот же носитель и та же вторичная фаза с инактивированным инокулятом.

#### Обязательные правила:

1. Выровнять сухую массу компоста, целевые C/N/P/K, массу донорского минерального материала, воду, смешивание и температуру инкубации.
2. Не фиксировать календарное время заранее: переход определять по стабильности температуры, кислороду, дыханию,  $\text{NH}_4\text{:NO}_3$ , ЕС, прорастанию/ фитотоксичности и санитарным критериям.
3. Блокировать донорские партии и положение мезокосмов; варианты рандомизировать.
4. Размер выборки определять по пилотной дисперсии и предварительно зарегистрированному расчёту мощности, а не выбирать красивое число.
5. Засаженные и незасаженные подделанки должны различать фильтрацию растениями и процесс, вызванный только внесённым материалом.
6. Использовать несколько местных функциональных групп растений; AMF-зависимые и менее зависимые растения не объединять в один показатель.

#### Совместные первичные показатели:

- безопасность: нитрат, аммоний, растворённый/взвешенный P, DOC/COD, DO, ЕС, pH, соли и значимые для площадки металлы в фильтрате;
- траектория автономности: выживание/возобновление растений, поступление опада/корней, микробная биомасса/функция, грибное сообщество/AMF, агрегация, инфильтрация и удержание воды после прекращения внешних поступлений.

Правила остановки: неприемлемый фильтрат, неудовлетворительный контроль патогенов/сорняков, анаэробная нестабильность, токсичность для растений или мобилизация металлов. Дальше переходят только безопасные варианты, не уступающие по водным показателям.

## Этап 2 — полевой опыт с повторностями

Переносить в поле не «лучший по биомассе», а варианты, безопасные по Парето. Использовать рандомизированные блоки, исходный сезон наблюдений, измерение стока/фильтрата, отсутствие повторного внесения после становления и обследования через 1, 2, 3, 5, 7, 10+ лет. Успех требует снижения зависимости от вмешательства, а не одного зелёного сезона.



**Полевой опыт НУР-011 на постдобычной земле Konin/Kleczew.** Figure 1 из Choińska-Pulit et al. (2026), CC BY 4.0. На схеме показаны контрольная площадка, опытная площадка и разделительная полоса. В каждом варианте была одна крупная зона; множество измеренных растений не заменяет независимую повторность делянок.

# 18. Польский эксперимент 2026 года

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАСТ) · БЛИЗКИЙ АНАЛОГ · полевой эксперимент ( НУР-011 ).**

Ближайший технологический аналог использовал смесь перо/солома/лигнит 20:60:20 , микробную инокуляцию, 41-дневную обработку и внесение в постдобычную почву с полевой нормой 18,3 т/га продукта; в опыте с кукурузой получена ранняя положительная реакция растений. Не установлено окончательно, рассчитана ли полевая норма на влажную или сухую массу.

| Поле карточки                    | Зафиксировано                                                                                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сырьё                            | Перо : солома : лигнит = 20:60:20                                                                                     |
| Инокуляция                       | Микробные штаммы и время внесения приведены в библиографической записи НУР-011                                        |
| Обработка                        | 41 день; условия в реакторе, C:N и NH4-N сохраняются в доказательной записи                                           |
| Полевая доза                     | 18,3 т/га; основу расчёта следует сверять с исходной публикацией                                                      |
| Культура / показатель результата | Кукуруза; ранняя реакция растений                                                                                     |
| Сила доказательств               | Исследование искусственно созданного материала и полевое применение; близкий аналог, но не прямое испытание системы E |

**НЕТ ПОЛЕВОГО КОНТРОЛЯ С ТЕМ ЖЕ ЗРЕЛЫМ НЕИНОКУЛИРОВАННЫМ КОМПОСТОМ.** Поэтому опыт не устанавливает отдельный эффект инокуляции и не доказывает преимущество нашей последовательности.



**Полевой тест НУР-011 : контроль без компоста слева, площадка с компостом справа.** Figure 6 из Choińska-Pulit et al. (2026), CC BY 4.0. Видимое различие относится к одному сезону и полному компостному материалу; оно не изолирует эффект инокуляции и не доказывает долгосрочное восстановление почвы.

**Г. Польский эксперимент 2026 года**

**Публикация:** Anna Choińska-Pulit, Justyna Sobolczyk-Bednarek, Dominika Kufka, Amelia Zielińska. «Разработка и полевая оценка микробно-инокулированного компостного материала из пера, соломы и лигнита для восстановления постдобычных почв» (*Development and Field Evaluation of a Microbially-Inoculated Feather–Straw–Lignite Compost Material for the Reclamation of Post-Mining Soils*). *Materials* 2026, 19(14), 3035; опубликована 14 июля 2026 года; DOI 10.3390/ma19143035 (НУР-011).

| Поле              | Проверенная запись                                                                                                                                   |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сырьё             | куриные перья 20%, пшеничная солома 60%, лигнит 20%                                                                                                  |
| Инокулят          | многоштаммовый комплекс: <i>Bacillus altitudinis</i> 33, <i>Bacillus methylotrophicus</i> Alk, <i>Streptomyces fulvissimus</i> K59                   |
| Момент инокуляции | в начале процесса, а не после термофильной стадии                                                                                                    |
| Процесс           | переход от лабораторного масштаба к динамическому реактору объёмом 200 дм³; 41 день                                                                  |
| Продукт           | C:N 12,09; NH4-N 0,03%; внесение 18,3 т/га                                                                                                           |
| Поле              | песчаная постдобычная почва в районе Конины; кукуруза ( <i>Zea mays</i> ); полевая оценка 2025 года, один сезон                                      |
| Дизайн опыта      | одна обработанная делянка и одна делянка без добавок; множество измеренных растений внутри одной делянки не заменяет независимую повторность делянок |
| Результат         | уреаза почвы 3,91 UU; P2O5 3,4 г/кг; средняя высота побегов 30,23 против 25,88 см, разница 15%, $t(645)=6,63$ , $p<0,001$                            |



| Поле        | Проверенная запись                                                                                                                                                                  |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ограничения | условия влажности и температуры ранней весной ограничивали абсолютную активность ферментов; отсутствуют показатели воды и фильтрата, сохранения эффекта на микробиом и автономности |

Критическая граница: **обычного зрелого неинокулированного компоста как полевого контроля не было**. Инокулированные и неинокулированные партии сравнивались во время компостирования, но полевое сравнение не отвечает на вопрос об обычном компосте В против предварительно инокулированного материала D/E. Это близкий аналог, а не прямое испытание гипотезы (HYP-011).

## 19. Культивируемый местный микробиом

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАСТ) · ПРЯМОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ДЛЯ КУЛЬТИВИРУЕМОЙ ФРАКЦИИ · контролируемый 28-недельный эксперимент (MIS-001)**. В опыте в Пилбаре из 1 г донорской почвы получили культивируемую бактериальную фракцию, размножили её, поместили на носитель и внесли в постдобычную почву. Через 28 недель отдельный вариант с бактериями дал +75% общего N относительно контроля И +147% субстрат-индуцированного дыхания относительно контроля; бактерии + цианобактерии не дали лучшего результата по измеренным свойствам.

**КУЛЬТИВИРУЕМАЯ ФРАКЦИЯ — НЕ КОПИЯ ВСЕГО ПОЧВЕННОГО МИКРОБИОМА.** Масштабирована культивируемая часть сообщества, а не почва целиком и не полный набор её функций.

**Критическая граница:** это культивируемая фракция, а не увеличенная копия почвы. Культивирование отбирает организмы, способные расти в заданной среде; редкие таксоны, облигатные симбионты и часть взаимодействий теряются, а дрейф сообщества продолжается при масштабировании.

### Н. Культивируемый местный микробиом

#### Что реально можно выращивать

- Культивируемые местные бактерии и некоторые свободноживущие грибы можно размножать в контролируемой среде и доставлять через носитель (MIS-001/002).
- AMF можно увеличивать через ловушечные культуры с растением-хозяином; это облигатные биотрофы, поэтому им нужны совместимые живые растения (MIS-004/005).

- Определённые консорциумы/SynCom легче стандартизировать, но они воспроизводят узкую часть пищевой сети ( MIC-007/008 ).

#### Прямой факт о малом донорском образце

MIC-001 : 1 г местной естественной почвы → 25 мл бульона, 7 дней → серийный перенос 1 мл, ещё 7 дней → 1 мл культуры на экструдированную гранулу → деградированная постдобычная почва Пилбары. Через 28 недель вариант с бактериями повысил общий N на 75% и субстрат-индуцированное дыхание на 147%; смесь бактерий и цианобактерий не улучшила измеренные свойства почвы. Это выращивание культивируемой фракции, а не умножение всей почвы.

MIC-005 : 50 г полевого материала → сосуд 1.000 мл с автоклавированным песком и растениями-хозяевами → четыре месяца. Это подтверждает размножение AMF с помощью хозяина, но не задаёт гектарную дозу.

#### Цельная почва, культивированный инокулят и SynCom

| Подход                                | Плюс                                                                                  | Потеря/риск                                                                                  | Доказательная граница                                                                                                                   |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цельная почва                         | максимально сохраняет неизвестные бактерии, грибы, propagules, фауну и взаимодействия | ущерб донору, патогены/семена, малая масштабируемость                                        | направление траектории доказано, универсальной минимальной дозы нет; эффект может остаться в инокулированном слое ( HYP-009 , MIC-009 ) |
| Культивированный/обогащённый инокулят | большой объём из малого образца; возможны контроль качества и доставка в носителе     | отбор быстрорастущей культивируемой фракции, дрейф сообщества, утрата гильдий/взаимодействий | отдельные функции постдобычной почвы улучшались, экологическая эквивалентность не доказана ( MIC-001/002/003 )                          |
| Определённый консорциум / SynCom      | воспроизводимые состав и целевые функции                                              | узкая пищевая сеть, непредсказуемая конкуренция/фасилитация                                  | закрепление и польза зависят от контекста ( MIC-007/008 , HYP-001/011 )                                                                 |

Культивационное смещение отбирает организмы по среде, источнику C, кислороду, температуре и серийным переносам; теряются редкие гильдии, трофические/пространственные взаимодействия и облигатные симбионты без хозяина ( MIC-002/003 ). Доставка в носителе возможна через гранулы, компостные среды для AMF и сконструированные органические/минеральные матрицы, но сам носитель меняет pH, воду и питательные элементы, поэтому необходим неинокулированный контроль носителя ( MIC-001/004 ).

Предварительное заселение зрелого компоста технически возможно как концепция носителя, но не доказано, что после вторичного созревания оно превосходит внесение того же инокулята непосредственно на участок. Это проверяемая гипотеза  $E > D/C$ , а не установленный факт.



## 20. Цельная почва, культивированный инокулят и синтетическое сообщество (SynCom)

| Подход                                   | Что переносится                                                                         | Преимущество                                            | Потеря                                                          | Масштаб                                            | Риск                                                                              | Доказательства                                                        |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Цельная почва                            | Живое сообщество, минеральные частицы, органическое вещество, споры и неизвестные связи | Максимальная полнота переносимого материала             | Изменчивость; нельзя отделить биоту от среды                    | Ограничен доступностью донорского материала        | Воздействие на донорский участок, патогены, сорняки, экологическое несоответствие | Литература о полевом переносе почвы; близкие аналоги                  |
| Культивированный местный инокулят        | Культивируемая фракция выбранных бактерий и грибов                                      | Масштабирование малого образца, контролируемый носитель | Культивационное смещение, редкие таксоны и облигатные симбионты | Возможен переход от лаборатории к мезокосму и полю | Дрейф, загрязнение, низкая устойчивость                                           | МІС-001 и родственные работы                                          |
| Синтетическое сообщество (SynCom)        | Определённые штаммы с известными функциями                                              | Повторяемость и причинная проверка                      | Упрощённая сеть, отсутствие неизвестных функциональных групп    | Хорошо масштабируется технически                   | Экологическое несоответствие, разрушение сообщества, отсутствие функций           | Лабораторные и тепличные доказательства сильнее полевых               |
| Прямая инокуляция                        | Живой материал вносится прямо в субстрат или посадочную зону                            | Простота, нет вторичного созревания                     | Слабая защита и короткое окно приживания                        | Потенциально возможна в полевом масштабе           | Высыхание, поедание, разбавление                                                  | Много разрозненных полевых аналогов                                   |
| Предварительно заселённый зрелый компост | Инокулят получает время в носителе до поля                                              | Возможная защита, накопление биомассы/ метаболитов      | Сообщество может измениться ещё до поля                         | <b>ПОКА НЕ ПОДДАЁТСЯ РАСЧЁТУ</b>                   | Загрязнение, срок хранения, потеря целевых таксонов                               | Центральная гипотеза; прямое сравнительное доказательство отсутствует |

## 21. Микориза

**ДОКУМЕНТИРОВАНО (ФАСТ).** Арбускулярные микоризные грибы — облигатные биотрофы: их нельзя масштабировать тем же способом, что свободноживущие бактерии. Для размножения нужно живое растение-хозяин; применяются ловушечные культуры, споры и колонизированные фрагменты корней.

**Ограничения:** выбор растения-хозяина меняет сообщество; тепличное размножение не гарантирует полевого приживания; высокая колонизация не равна улучшению активности ферментов, содержания гломалина, состояния воды или роста; воздействие на донорский участок и риск патогенов сохраняются. В А–Е для АМФ нужен отдельный модуль размножения с растением-хозяином и соответствующие контроли.

### 7. Микориза

АМФ — облигатные биотрофы: для нормального размножения им нужен совместимый живой хозяин. Доказанные схемы включают растения-ловушки, споры, колонизированные фрагменты корней и субстрат с гифами. МИС-004 показывает размножение на ферме в разбавленной среде на основе компоста; МИС-005 — 50 г шахтного/референсного материала в ловушечном сосуде 1 л с тремя группами растений-хозяев на четыре месяца.

Это сильнейший пример того, что малый донорский образец можно увеличить без массового снятия плодородного слоя почвы. Но результат не универсален:

- растение-хозяин отбирает часть сообщества АМФ;
- высокая доступность Р способна снижать симбиоз и спорообразование;
- инокулят местного происхождения может быть лучше адаптирован, но «местный» не гарантирует совместимости или безопасности;
- коммерческий инокулят воспроизводимее, но может плохо соответствовать местным растениям и местной среде;
- колонизация корней не гарантирует роста растений, восстановления активности ферментов или сохранения эффекта в полевых условиях (МИС-006).

## 22. Эксперимент А–Е

|                                                      |                                                                                   |                                                                |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>A</b><br>подготовленный субстрат без<br>компоста  | <b>B</b><br>обычный зрелый компост                                                | <b>C</b><br>B + цельная донорская почва /<br>прямая инокуляция |
| <b>D</b><br>B + культивированный местный<br>инокулят | <b>E</b><br>предварительно заселённый<br>зрелый компост + вторичное<br>созревание | <b>B-time</b><br>тот же срок выдержки без<br>живого инокулята  |

Рисунок 4. Основные системы А–Е и временной контроль. Контроли с инактивированным материалом, носителем и AMF добавляются к причинному дизайну; Е не считается победителем заранее.

**ГИПОТЕЗА (HYPOTHESIS).** Эксперимент должен отдельно выявить эффект зрелого компоста, цельной донорской почвы, культивированного инокулята, времени предварительного заселения и носителя. Победа Е не предполагается заранее.

**ГИПОТЕЗА (HYPOTHESIS).** Представленный ниже дизайн предназначен для проверки гипотезы; он не является разрешением на полевое применение.

### 1. Проверяемая гипотеза

Может ли однократное внесение квалифицированного органического материала, отдельно или вместе с биологической инокуляцией, ускорить переход безопасного постдобычного субстрата к системе, которая после укоренения всё больше поддерживает растения, структуру почвы и круговорот питательных элементов собственными корнями, опадом и микробиомом — без неприемлемого воздействия на воду?

Отдельная вложенная гипотеза: отличается ли культивированный инокулят из малого местного донорского образца от прямого внесения донорской почвы и даёт ли предварительное заселение зрелого компоста дополнительный эффект?

### 2. Нулевой этап инженерной безопасности: площадка

Биологический эксперимент запрещён при активном горении, геотехнической нестабильности, неконтролируемом кислотообразовании/дренаже или неприемлемой подвижности солей и токсикантов. До рандомизации должны быть

определены минералогия, кислотно-основной баланс, pH, EC/SAR там, где это применимо, общее и выщелачиваемое содержание загрязнителей, гранулометрический состав, объёмная плотность, гидрология, уклон и тепловое состояние.

### 3. Этап 1: контролируемый мезокосм

Один гомогенизированный, безопасный и охарактеризованный постдобычный субстрат; одна партия зрелого квалифицированного компоста; одна совместимая донорская экосистема; одинаковые минеральные и растительные входы.

#### Основные варианты

- **A**: постдобычный субстрат без добавок;
- **B**: постдобычный субстрат + зрелый компост;
- **C**: зрелый компост + малое количество живой донорской почвы, смешанные при внесении;
- **D**: зрелый компост + культивированный бактериальный/грибной инокулят из того же донорского образца, смешанные при внесении;
- **E**: зрелый компост, предварительно заселённый тем же культивированным инокулятом и прошедший заданное вторичное созревание до внесения.

#### Обязательные причинные контроли

- **B-time**: компост проходит ту же вторичную выдержку, что и E, но без живого инокулята;
- контроль C с инаktivированным материалом (**C-killed**): та же масса донорского минерального материала после стерилизации;
- контроль D с инаktivированным материалом и носителем (**D-killed/carrier**): инаktivированный культивированный продукт с идентичным носителем;
- контроль E с инаktivированным материалом, носителем и той же выдержкой (**E-killed/carrier-time**): тот же носитель и та же вторичная фаза с инаktivированным инокулятом;
- подфактор AMF — только с совместимыми растениями-хозяевами и парным контролем без AMF.

Во всех вариантах необходимо выровнять сухую массу компоста, воду, носитель, смешивание, температуру и измеримые поступления C/N/P/K/солей. Равный объём жидкости нельзя считать равной дозой инокулята: необходимо регистрировать жизнеспособные клетки/пропагулы, биомассу, состав сообщества и функциональные маркеры.

#### Повторность и рандомизация

- независимые донорские партии и партии компоста учитываются как случайные эффекты, а не псевдоповторности;

- сначала проводится пилот для оценки дисперсии, затем рассчитывается мощность для совместных первичных показателей безопасности и автономности;
- используется блочная рандомизация по положению камеры/стенда;
- засаженные и незасаженные подварианты отделяют фильтрующее влияние растений от динамики самого материала;
- протокол и правила исключения предварительно регистрируются до получения результатов.

#### **Продолжительность и отбор проб**

Исходное состояние; временной ряд вторичного созревания; после внесения — 1, 2, 4 и 8 недель, затем 3, 6, 12, 18 и 24 месяца. Переход к полевому этапу требует как минимум одного полного вегетационного цикла и безопасного профиля фильтрата.

### **4. Измерения**

#### **Совместные первичные показатели безопасности**

Объём фильтрата/стока; pH; ЕС; щёлочность/кислотность; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; растворённый/взвешенный P; DOC; COD/DO там, где это применимо; сульфаты; специфичные для площадки металлы/металлоиды; связанные с сырьём PFAS и органические загрязнители; патогены и зачатки сорняков.

#### **Совместные первичные показатели функций и автономности**

Выживание, рост, размножение и возобновление растений; поступление корней/опада; микробная биомасса; дыхание и активность ферментов; превращения N; мобилизация P; состав бактерий/грибов; функциональные гены, где это возможно; колонизация AMF; устойчивость агрегатов; объёмная плотность/пористость; инфильтрация/удержание воды; эрозия; состояние после прекращения полива, удобрения и внесения материалов.

#### **Сохранение инокулята**

Донорское/культивированное сообщество отслеживается подходящими для штаммов маркерами и секвенированием сообщества. Измеряются и присутствие, и функция: обнаружение ДНК само по себе не означает закрепления, а закрепление само по себе не означает пользы.

### **5. Правила остановки**

Вариант прекращается или не переходит на следующий этап при неприемлемом выносе загрязнителей с фильтратом, неудовлетворительном контроле патогенов/сорняков, анаэробной нестабильности, токсичности для растений, солевом повреждении, мобилизации металлов, эрозии или явном экологическом несоответствии. Отбор ведётся по правилу Парето: ни один вариант не продвигается только потому, что даёт максимальную биомассу.

## 6. Этап 2: полевой опыт с повторностями

На полевой этап переходят только безопасные варианты мезокосма, не уступающие контролям по заданным критериям. Минимальная структура:

- две независимые площадки в пределах одного широкого класса субстрата, предпочтительно три;
- рандомизированные блоки внутри площадки по уклону, экспозиции, влажности и исходной химии;
- окончательное число повторностей определяется расчётом мощности; шесть блоков на площадку — только иллюстративное значение, а не фиксированное требование;
- делянки примерно  $10 \times 10$  м или больше, с буферными зонами и постоянными ядрами наблюдения;
- полосы движения техники изолируются, чтобы уплотнение не стало скрытым вариантом воздействия;
- внутри блоков размещаются повторные стоковые площадки и/или лизиметры;
- соседняя референсная экосистема и лучший местный старый технозём регистрируются как ориентиры траектории, а не как варианты опыта.

В полевом сравнении по возможности сохраняются А–Е. Если стоимость требует сокращения вариантов, С, D и Е нельзя объединять, пока гипотеза культивированного микробиома остаётся главным вопросом.

## 7. Временной горизонт

По возможности до воздействия собирается полная гидрологическая и биологическая исходная линия. После воздействия: событийный отбор проб, затем 1, 2, 4 и 8 недель; 3, 6 и 12 месяцев; ежегодно со 2-го по 5-й год; обязательные повторные обследования через 7, 10, 15 и 20 лет. Ни один результат до пятого года не называется устойчивым почвообразованием.

## 8. Критерий успеха

Успех — это снижение зависимости от вмешательства, а не просто зелёный покров. После заранее объявленного периода становления прекращаются повторное внесение материала, регулярный полив и «спасительное» удобрение. Вариант считается успешным, только если без повторной внешней загрузки сохраняет безопасную воду, возобновление растений, внутреннее поступление корней/опада, биологические циклы, физическую структуру и приемлемую траекторию сообщества.

## 9. Модуль с животными

Козы, овцы и крупный рогатый скот исключаются из этапов 1–2. Отдельный поздний опыт с выпасом допустим только после достижения порогов по покрову, корням, эрозии, воде и загрязнителям. Он требует огороженных участков без



выпаса, повторных загонов, правила остановки по влажности, защиты молодых древесных растений и контроля воздействия на животных. Ангорские козы — один из возможных вариантов, а не заранее предпочтительный ответ.

#### 10. Что может установить эксперимент

Дизайн разделяет эффект органического материала (В по сравнению с А), прямого внесения цельной донорской почвы (С по сравнению с В и контролем `C-killed`), культивированного местного инокулята (D по сравнению с В и контролем `D-killed/carrier`) и предварительного заселения со вторичным созреванием (Е по сравнению с D, `B-time` и контролем `E-killed/carrier-time`). Он также проверяет, приводит ли изменение микробного сообщества к полезным результатам для растений, процессов и воды и сохраняется ли эффект после прекращения внешних поступлений. Причинный вывод будет относиться только к указанным субстрату, материалу, донору, климату и цели восстановления, а не доказывать универсальную применимость.

## 23. Кузбасс: переносимость

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Кузбасс используется для проверки переносимости, а не как основание мирового вывода. Один рецепт нельзя одинаково применять к горящим, кислотообразующим, засоленным/солонцеватым, нестабильным, грубым, уплотнённым, молодым технозёмам и старым заросшим отвалам.

### Переносимость мировой базы на Кузбасс

Матрица не рекомендует конкретную площадку; она определяет условия допуска для проверки переносимости мировых данных на конкретный объект.

| Тип/состояние отвала                                       | Что сначала проверить                                                   | Что потенциально переносимо                                                                                               | Что не переносить автоматически                                                         | Решение                                                       |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Горящий/нагревающийся                                      | тепловое обследование, газы, внутреннее горение, устойчивость           | инженерное тушение/изоляция, мониторинг                                                                                   | компост, навоз, инокулят, животные                                                      | БИОЛОГИЧЕСКИЙ ОПЫТ НЕДОПУСТИМ до устранения источника         |
| Активно кислотообразующий / пиритсодержащий                | кислотно-основной учёт, сульфаты/Fe, дренаж                             | контроль источника, покрытия, щелочная/минеральная коррекция                                                              | успех только органического материала на нейтральных отвалах                             | СНАЧАЛА ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ                                    |
| Засоленный/солонцеватый                                    | ЕС, SAR/ESP, соли, дренаж                                               | отбор солеустойчивых вариантов, обоснованная коррекция гипсом/минеральным материалом                                      | компост/дигестат с высокой ЕС; зависимый от полива кейс как доказательство автономности | ограниченный мезокосм после коррекции                         |
| Геотехнически нестабильный / эродирующий крутой склон      | уклон, сдвиг, осадка, пути стока                                        | планировка, дренаж, контроль эрозии, стабилизация корневой зоны                                                           | внесение большой влажной массы до стабилизации                                          | СНАЧАЛА ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ                                    |
| Грубый/каменистый, мало мелкозёма, но химически приемлемый | гранулометрический состав, мелкозём, объёмная плотность, удержание воды | рыхлая минеральная корневая зона, суглинок/мелкозём, квалифицированный компост в ограниченной дозе, местное семенное сено | компост как замена минерального скелета                                                 | наиболее перспективен после проверки «материал × субстрат»    |
| Уплотнённый реконструированный слой                        | сопротивление проникновению, поровая сеть, движение техники             | контроль движения, рыхление/рыхлая укладка, корни, органический материал низкого риска                                    | вывод о пользе только по химическим показателям                                         | физическая коррекция предшествует биологической интерпретации |

| Тип/состояние отвала                      | Что сначала проверить                          | Что потенциально переносимо                                                             | Что не переносить автоматически                                   | Решение                                                     |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Существующий молодой озеленённый технозём | сообщество, корни/опад, вода, исходные микробы | факторный опыт «компост × инокулят», проверка автономности без повторных внесений       | животные на раннем этапе                                          | возможная экспериментальная площадка                        |
| Старый самопроизвольно заросший отвал     | безопасность/геохимия, история референса       | референсная траектория, хроноряд/повторное обследование, малый неразрушающий отбор проб | трактовка возраста как воздействия или ненужное внесение органики | референс/контроль; обычно не объект для внесения материалов |

### Локальные данные, меняющие дизайн

KUZ-003/005/006/007 показывают, что влажность, рельеф, мелкозём, материал корневой зоны и местные пропагулы могут быть важнее возраста. Лёссовидный материал и местное семенное сено выполняли разные функции; верхний слой почвы также внёс запас семян сорняков. Поэтому мировые результаты по компосту нельзя переносить без общей минеральной основы и контроля растительных входов.

KUZ-008 исключает горящие отвалы из области биологического воздействия. KUZ-009/010 показывают, почему название региона не является спецификацией субстрата и почему данные конкретной площадки должны предшествовать рецепту.

### Переносимые мировые выводы

1. Доза ограничивается рисками для воды и загрязнителями, а не желаемой толщиной слоя.
2. Зрелый квалифицированный компост отличается от свежего навоза, смешанных ТКО и необработанного осадка сточных вод.
3. Физика корневой зоны и гидрология — самостоятельные измерения воздействия.
4. Ископаемый углерод угля необходимо отделять от нового биологического углерода.
5. Успешный первый сезон означает только становление, а не восстановление.
6. Предварительно инокулированный живой материал и ангорские козы остаются экспериментальными модулями, а не практикой по умолчанию.



**На породном отвале возле Апанаса, 2020 год.** Архив Натальи Зубковой.  
Фотография показывает присутствие автора и видимый масштаб  
промышленно изменённого рельефа; она не измеряет температуру, состав  
газов или границы внутреннего очага.

## 24. Ангорские козы и Майминская СЭС

### 24.1. Ангорские козы

#### Короткий ответ

Для первого полевого опыта — **нет**. Навоз можно исследовать как обработанный и квалифицированный внешний материал, не вводя коз, овец или коров на молодой участок. Животные добавляют трудноразделимые воздействия: выборочное поедание, вытаптывание, уплотнение, локальные участки концентрации мочи и навоза, перенос семян и паразитов. Это сделает причинный ответ хуже, а не лучше.

#### Что подтверждено

- На испанском восстановленном угольном пастбище (В10-006) влагоудерживающая способность и доступная вода были выше на огороженном участке; вытаптывание копытными усиливало уплотнение. Кустарники-няни частично защищали почву от вытаптывания и одновременно накапливали органическое вещество.
- Выпас может быть допустимым **конечным землепользованием**, если восстановленная земля уже способна его выдерживать. Система оценки риска В10-007 связывает безопасность с плотностью выпаса, продуктивностью, поведением управляющего и выполнимостью ограничений.
- На угольном объекте Навахо (В10-008) тщательно спланированный выпас крупного рогатого скота с ограждением, ежедневным надзором, контролем корма и воды и анализами здоровья животных оказался предварительно осуществимым. Но это был опыт постдобычного землепользования, а не доказательство того, что крупный рогатый скот создал почву. Эпизод с богатой сульфатом карьерной водой показал, что кормовая растительность сама по себе не гарантирует безопасность площадки.

#### Козы против овец

Надёжного сравнительного опыта по восстановлению добычной земли с козами и овцами в найденном корпусе нет. Поэтому нельзя объявить овец «лучше» только потому, что они чаще пасутся на траве, а козы сильнее объедают кустарники, или объявить коз полезными из-за их навоза.

Биологически вероятные различия требуют отдельной проверки:

- козы способны сильнее повреждать древесный подрост и кустарники-няни при доступе к ним;
- овцы могут сильнее концентрироваться на травостое и также создавать уплотнение на влажной или слабоструктурной поверхности;

- для обоих видов результат определяется плотностью выпаса, длительностью, сезоном, влажностью, уклоном, кормовой растительностью и защитой молодых растений сильнее, чем названием животного.

Это рабочие механизмы для оценки риска, а не установленное ранжирование видов.

#### Что добавил мировой поиск

| Доказательство              | Система                                                                                            | Что реально измерено                                                                             | Что нельзя переносить                                                                                                                   |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BIO-010                     | Ангорские козы / мериносовые овцы / смешанный выпас; 7,5–12,5 животных/га; юг Австралии, 1981–1984 | состав пастбища, травостой, оголённая земля и взаимодействие с нагрузкой в опыте с повторностями | это зрелое улучшенное пастбище, а не молодой отвал; благоприятный результат коз на одном пастбище не означает общего приоритета коз     |
| BIO-011                     | Ангорские козы в системе кратковременного выпаса в Техасе                                          | сезонный рацион из трав, разнотравья и кустарников и потребление                                 | выбор кустарников не доказывает пользы для круговорота питательных элементов; он также означает риск для кустарников и молодых деревьев |
| BIO-012                     | Ангорские козы против молочая, Северная Дакота                                                     | четырёхлетний ответ плотности целевого сорняка                                                   | контроль инвазивного вида — услуга управления землёй, а не доказательство педогенеза                                                    |
| Литература по выпасу на СЭС | главным образом овцы на сформированном сельскохозяйственном/солнечном травостое                    | ранние ответы здоровья почвы, пастбища и биоразнообразия                                         | строительство, затенение и прежнее земледелие смешиваются с эффектом выпаса; эти площадки не являются отвалами                          |

Первый сравнительный полевой опыт с ангорскими козами и мериносовыми овцами оказался полезной прививкой от простого вывода «овца всегда безопаснее». На конкретном сформировавшемся однолетнем пастбище высокая плотность выпаса сильнее увеличивала долю непокрытой почвы при выпасе овец, а ангорские козы поддерживали больше клевера и меньше сорняков. Но сопутствующие данные о реакции животных указывали на более высокую смертность ангорских коз при высокой нагрузке и холодном стрессе. Следовательно, вид и порода не заменяют рамки управления: решающими остаются климат, плотность выпаса, сезон, покрытие и целевая растительность.

#### Ангорские козы — предварительный профиль, не финальный ответ

- **Размер:** консультационные источники подтверждают, что ангорские козы меньше многих распространённых пород; взрослые козлы весят около 180–225 фунтов (примерно 82–102 кг). Для самок найден порог племенной кондиции  $\geq 75$



фунтов (~34 кг), но это не надёжная средняя масса взрослой самки породы, поэтому среднюю массу самок ещё не фиксируем.

- **Рацион:** это животное смешанного пастбищно-веточного питания, а не чистый «кустарникоед». В техасском исследовании рациона доля веточно-кустарникового корма менялась примерно от 10 до 38% по сезонам; среднее составляло около 21%, а временами преобладала трава.
- **Управление растительностью:** есть прямые данные по контролю молочая и изменению состава улучшенного пастбища.
- **Экологический риск:** предпочтение кустарников делает молодые деревья, кустарники-няни и древесное возобновление потенциальными объектами повреждения. Животные могут переносить семена; давление копыт и пятна мочи/навоза остаются пространственно неравномерными.
- **Благополучие животных:** мохеровая порода требовательна к питанию и уязвима к холоду/сырости, особенно после стрижки; неподходящие климат или укрытие могут сделать идею неприемлемой даже при полезном ответе растительности.
- **Возврат питательных элементов:** фекальный выход измеряли в техасском исследовании рациона, но универсальные килограммы N/P на одну ангорскую козу в год нельзя вывести без сценария рациона, потребления, удержания, мочи и живой массы. Общие таблицы козьего навоза не являются доказательством для конкретной породы.

Пока допустим только условный ответ: ангорские козы **могут** быть инструментом целевого управления растительностью на уже стабильной, хорошо укоренённой площадке с защищённым древесным подростом. Доказательств, что они создают почвенную систему или дают чистую пользу на бывшем угольном отвале, пока нет.

#### Решение для дизайна

1. В фазах 1–3 полевого опыта сельскохозяйственные животные исключены.
2. Компост из навоза испытывается как отдельный материал с известной дозой и составом.
3. Если будущая цель участка включает выпас, отдельный поздний опыт начинается только после достижения пороговых значений растительного покрова, закрепления корней, эрозии, уплотнения, состояния воды и загрязнителей в кормовой растительности.
4. Вариант с выпасом требует огороженного контроля без выпаса, повторных загонов, заданной нагрузки, правила остановки по влажности почвы и мониторинга объёмной плотности, инфильтрации, эрозии, растительного сообщества и воздействия на животных.

**Вывод**

Животные могут быть частью будущего управления устойчивым пастбищем. Пока нет основания делать их частью механизма запуска почвообразования. Для исходного вопроса они не нужны и в ранней фазе скорее мешают чистому и безопасному эксперименту.

**Источники**

- ВТО-006 : DOI 10.1016/j.agee.2023.108483.
- ВТО-007 : DOI 10.1016/j.agsy.2012.03.002.
- ВТО-008 : DOI 10.21000/JASMR97010255.
- ВТО-010 : DOI 10.1071/AN09128.
- ВТО-011 : DOI 10.2307/3899028.
- ВТО-012 : Lym, Sedivec & Kirby (1997), Montana State University Range Science archive.

**Главный вывод:** ангорские козы не нужны для запуска почвообразования. Возможная роль — управление растительностью на поздней стадии после появления устойчивого растительного и почвенного слоя. Выпас и объедание древесно-кустарниковой растительности могут менять ботанический состав и контролировать отдельные кустарники, но плотность выпаса, сезон, вытаптывание, уплотнение, непокрытая почва, влагоудерживающая способность и благополучие животных определяют знак эффекта. Ангорские козы чувствительны к холоду и сырости после стрижки; им нужны укрытие и надлежащее управление.

## 24.2. Майминская СЭС: границы происхождения

| Статус                     | Что можно утверждать                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ДОКУМЕНТИРОВАНО</b>     | Наталья была на Майминской СЭС зимой 2019 года ( AUTH-002 ).                                                                                                                              |
| <b>ВОСПОМИНАНИЕ АВТОРА</b> | Наталья вспоминает предложение использовать овец.                                                                                                                                         |
| <b>ВОЗМОЖНЫЙ СВИДЕТЕЛЬ</b> | Денис Шакин назван возможным свидетелем разговора; независимое подтверждение в корпусе отсутствует.                                                                                       |
| <b>ВНЕШНЕЕ СООБЩЕНИЕ</b>   | 29 июня 2020 года «Коммерсантъ Красноярск», ссылаясь на пресс-службу Hevel, сообщил о 50 овцах на Усть-Канской СЭС и возможном распространении практики, включая Майминскую ( AUTH-003 ). |
| <b>НЕ ДОКАЗАНО</b>         | Не доказано, что предложение Натальи стало причиной эксперимента Hevel.                                                                                                                   |

## 25. Экономическая модель

**СЦЕНАРНАЯ МОДЕЛЬ (SCENARIO MODEL). НЕ СМЕТА АПАНАСА.** Модель описывает условный сложный 100-га угольный отвал апанасского типа. Она не является нормативом, средней стоимостью рекультивации, коммерческой сметой или реконструкцией расходов существующего объекта.

**МОДЕЛЬ СЛОЖНОГО 100-ГА ОТВАЛА АПАНАССКОГО ТИПА — НЕ СМЕТА АПАНАССКОГО ОТВАЛА.** Апанас задаёт тип сложности и масштаб рассуждения, но модель не реконструирует его фактические работы, объёмы или расходы.

### 25.1. Три уровня результата

| Сценарий                  | 100 га          | На гектар            | Статус                           |
|---------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|
| Нижний сценарий сложности | \$4,7–5,9 млн   | \$47 000–59 000/га   | сценарный диапазон               |
| Центральный               | \$9,5 млн       | \$95 000/га          | округлённый центральный сценарий |
| Высокая сложность         | \$15,4–21,3 млн | \$154 000–213 000/га | сценарный диапазон               |

Курс пересчёта: 84,3414 RUB/USD на 26 сентября 2026 года, официальный ряд Банка России ( ECO-004 ).

## 25.2. Центральный сценарий

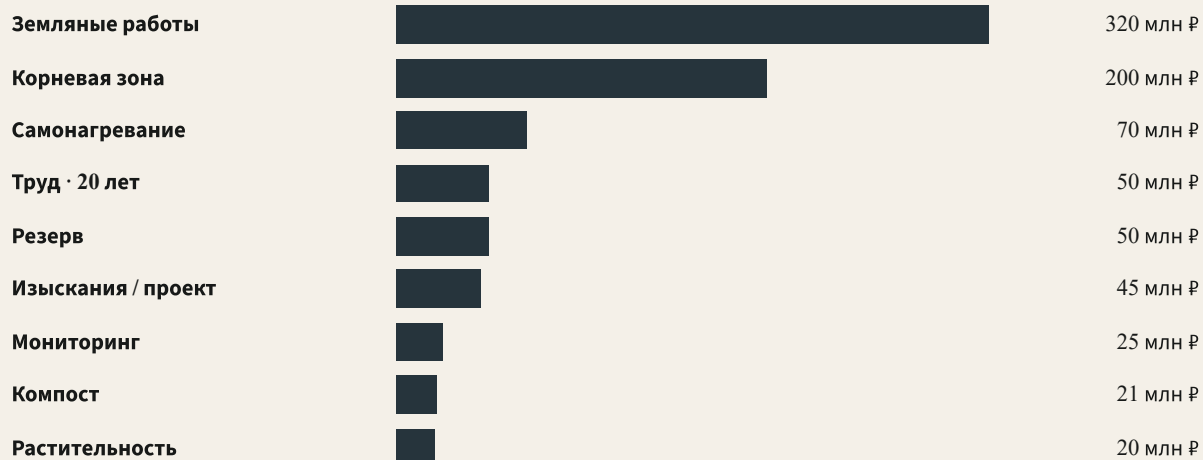


Рисунок 5. Структура центрального сценария; строки округлены, сумма модели округлена до 800 млн ₽. Это не фактические расходы объекта.

| Строка                                   | млн ₽      | Доказательный статус                   | Комментарий                                                          |
|------------------------------------------|------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Контроль / ликвидация самонагревания     | ~70        | СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ + внешний ориентир | Фактическая площадь активной зоны неизвестна                         |
| Изыскания, проектирование и контроль     | ~45        | ВНЕШНИЙ ОРИЕНТИР + СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ | Не предложение для конкретной площадки                               |
| Переформирование части массива           | ~320       | РАССЧИТАНО из объёма и ставки          | Главный фактор стоимости; оператор в подрядной ставке не дублируется |
| Реконструкция минеральной корневой зоны  | ~200       | РАССЧИТАНО + СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ       | Зависит от толщины и местного материала                              |
| Компост / органический материал          | ~21        | РАССЧИТАНО по ориентиру                | Не включает неизвестную стоимость системы Е                          |
| Растительность                           | ~20        | ВНЕШНИЙ ОРИЕНТИР + СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ | Становление, а не гарантия экосистемы                                |
| Дополнительный человеческий труд, 20 лет | ~50        | СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ                    | Длительное сопровождение сверх ставок подрядчика                     |
| Экологический мониторинг, 20 лет         | ~25        | СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ                    | Отбор проб, обследование, обслуживание оборудования, данные          |
| Резерв / повторные вмешательства         | ~50        | СЦЕНАРНОЕ ДОПУЩЕНИЕ                    | Повторные работы без ложной точности                                 |
| <b>Округлённый итог</b>                  | <b>800</b> | <b>РАССЧИТАНО, округлено</b>           | <b>\$9,5 млн / 100 га</b>                                            |

**Неожиданный результат модели:** в центральном сценарии основные факторы стоимости — земляные работы и реконструкция корневой зоны, а не компост. Это не универсальный закон. Исходный вопрос начинался с навоза, но экономика привела его к породе.

### 25.3. Человеческий труд

Отдельная строка труда относится к длительному сопровождению: полевым рабочим, техникам, эколога, агрономам, почвоведом, персоналу отбора проб и обследования растительности, обслуживанию мониторинга и сбору данных. Операторы и водители не добавляются второй раз, если они уже входят в подрядную ставку техники/транспорта.

### 25.4. Коэффициент вскрыши: доказательная граница

| Источник / объект                               | Период                             | Коэффициент вскрыши     | Единица   | Контекст                                                                      | Ограничение                               |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Кузбасская топливная компания ( ECO-005 )       | IV кв. 2010                        | 6,1                     | м³/т угля | Фактический агрегированный квартальный показатель открытой добычи компании    | Не отдельный разрез и не Апанас; 2010 год |
| КТК ( ECO-005 )                                 | 2010 / 2009                        | 7,3 / 7,1               | м³/т угля | Годовые производственные показатели                                           | Контекст среднего по группе               |
| Центральный Кузбасс, пологие пласты ( ECO-006 ) | данные/ проектная практика до 2017 | 9,3–12,3; расчётно 11,5 | м³/т угля | Текущий фактический диапазон и граничный проектный параметр смешанной системы | 11,5 — не универсальное среднее           |
| Quintette, Канада ( ECO-007 )                   | опубликовано 2016                  | 3,5–6,4                 | м³/т угля | Сопоставимый контекст открытой добычи                                         | Другая геология и система                 |
| Serrejón, Колумбия ( ECO-007 )                  | опубликовано 2016                  | 5–6                     | м³/т угля | Крупная открытая разработка                                                   | Не Кузбасс                                |

Диапазон 6,1–11,5 м³/т угля выбран только как **параметр сценарного сопоставления** для сложной открытой разработки. Он не переносится на подземную добычу, не называется универсальным для Кузбасса и не приписывается Апанасу.

## 25.5. Модельный объём угля и стоимость восстановления на тонну

**СЦЕНАРНАЯ МОДЕЛЬ (SCENARIO MODEL).** Условный объём отвальной массы: 32,3 млн м<sup>3</sup> / 100 га.

связанный объём добычи угля = объём отвальной массы / коэффициент вскрыши

- $32,3 / 11,5 = 2,8087$  млн т ;
- $32,3 / 6,1 = 5,2951$  млн т ;
- публикационный диапазон: 2,8–5,3 млн т угля .

**ЭТО НЕ РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОБЫЧИ АПАНАССКОГО ОБЪЕКТА.** Это математическая связь между условным объёмом отвальной массы и связанной добычей.

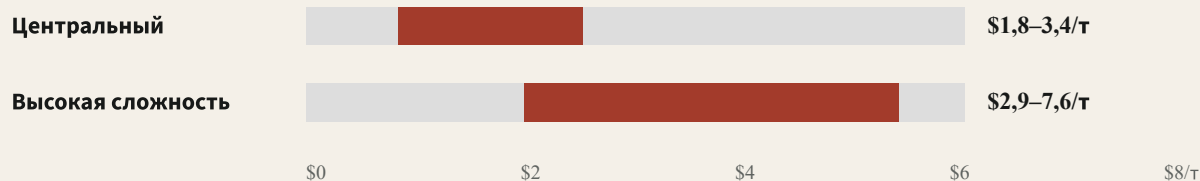


Рисунок 6. Сценарная стоимость восстановления на тонну связанной модельной добычи. Не полная экологическая цена угля.

сценарная нагрузка восстановления = сценарная стоимость восстановления / связанный модельный объём угля

- Центральный сценарий \$9,485 млн :  $\$9,485 / 5,295 = \$1,79/т$  ;  $\$9,485 / 2,809 = \$3,38/т$  → **\$1,8–3,4/т.**
- Высокая сложность \$15,4–21,3 млн , независимое сочетание крайних значений:  $\$15,4 / 5,295 = \$2,91/т$  ;  $\$21,3 / 2,809 = \$7,58/т$  → **\$2,9–7,6/т.**

**СЦЕНАРНАЯ СТОИМОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ — НЕ ПОЛНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕНА УГЛЯ.** Диапазоны \$1,8–3,4/т и \$2,9–7,6/т — сценарная стоимость восстановления нарушенной земли в расчёте на тонну связанной модельной добычи угля. Это не «истинная стоимость», не полная экологическая цена и не полная цена тонны.



## 25.6. Что входит и не входит

| Входит в модель                                                                                                                                                                                     | Не входит в модель                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Безопасность и контроль самонагревания; инженерные изыскания; земляные работы; корневая зона; органический материал; растительность; дополнительный труд; мониторинг; резерв повторных вмешательств | Климатический ущерб; CO <sub>2</sub> от сжигания; ущерб здоровью; внешние эффекты загрязнения воздуха; денежная оценка биоразнообразия; исторический ущерб воде; сельскохозяйственные потери; переселение; социальные/культурные последствия; полная юридическая ответственность и другие внешние эффекты |

## 25.7. Чувствительность без ложной статистики

|                                        |                                                 |                                          |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Очень сильное влияние</b>           | объём земляных работ × ставка за м <sup>3</sup> | объём корневой зоны × источник/транспорт |
| <b>Сильное</b>                         | площадь активной зоны самонагревания            | доля массива, требующая реформирования   |
| <b>Среднее в центральной структуре</b> | расстояние перевозки                            | доза компоста                            |
| резерв повторных вмешательств          |                                                 |                                          |
| труд и интенсивность мониторинга       |                                                 |                                          |

Рисунок 7. Прозрачный ранговый анализ чувствительности: 3–5 главных параметров без выдуманных вероятностных распределений. Ранг относится к центральной структуре модели.

Прозрачное сценарное сравнение «по одному параметру за раз» показывает, что итогом сильнее всего управляют: (1) доля/объём земляных работ и цена перемещения м<sup>3</sup>; (2) объём и источник минерального материала корневой зоны; (3) площадь активной зоны самонагревания; затем расстояние перевозки и резерв повторных вмешательств. Доза компоста, труд и мониторинг важны, но в центральной структуре имеют меньшую абсолютную массу. Это не моделирование методом Монте-Карло: распределения для вероятностного вывода не доказаны.

Сохранение пригодных верхней почвы, суглинка или мелкозёма во время добычи потенциально снижает будущую стоимость реконструкции корневой зоны. Это экономическое следствие сценарной модели, требующее расчёта для конкретной

площадки, а не готовое количественное обещание.

## 25.8. Система E

**НЕИЗВЕСТНО (UNKNOWN).** Система E — **ПОКА НЕ ПОДДАЁТСЯ РАСЧЁТУ.** Для предварительно заселённого зрелого компоста + вторичного созревания неизвестны доза инокулята на гектар, выход жизнеспособного инокулята, масштабирование «донор — продукт», срок хранения, носитель, длительность и режим созревания, требования к площади и оборудованию, контроль загрязнения и стойкость в поле. Цена не вычисляется до эксперимента.

### 1. Итоговая таблица параметров

| Параметр                                                                      | Мин. | Типичное/<br>справочное | Макс. | Единица                                             | Условия                                                                                                                        | Источник     | Уверенность                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|-------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------|
| Муниципальный, садовый и иной компост в полевых опытах на постдобычных землях | 10   | —                       | 112   | Мг/га; основа дозы зависит от случая                | 10–90 в программе Миннесоты; 112 садового компоста в комбинированном варианте в Огайо; не универсальный рекомендуемый диапазон | CASE-004/016 | средняя: показатели известны, влажность часто не указана |
| Компост зелёных отходов вокруг деревьев                                       | 0,75 | —                       | 0,75  | кг/дерево, фактически внесённая масса               | локальное внесение, а не сплошное распределение по гектару                                                                     | CASE-002     | высокая                                                  |
| Инженерно подготовленный инокулированный компост                              | 18,3 | —                       | 18,3  | т/га; основа массы продукта определена не полностью | польский постдобычный песок; перо: солома: лигнит 20:60:20; процесс 41 день                                                    | HYP-011      | средняя                                                  |
| Выдержанный куриный помёт                                                     | 1    | —                       | 4     | т/га; основа дозы не указана                        | факторный опыт с торфом, осадком, Alginure и известью на пиритсодержащей породе угольного отвала                               | CASE-033     | высокая для указанной дозы; низкая для влажности         |

| Параметр                                                      | Мин. | Типичное/<br>справочное | Макс. | Единица                                                      | Условия                                                                                     | Источник             | Уверенность                                                                              |
|---------------------------------------------------------------|------|-------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Коровий навоз в опыте с равным внесением С                    | 8,0  | —                       | 8,0   | т/га; как указано в источнике                                | обеспечивал 2,7 т С/га в пятилетнем опыте в Шаньси                                          | CASE-025             | высокая для дозы; влажность недоступна                                                   |
| Разложившийся куриный помёт                                   | 12   | —                       | 12    | т/га на одно внесение; основа дозы не указана                | семилетняя рекультивированная система с кукурузой; повторное удобрение перед посевом        | CASE-026             | высокая для дозы; периодичность нужно подтвердить по полной таблице до расчёта стоимости |
| Смеси органических мелиорантов                                | 40   | —                       | 132   | т/га; как указано для варианта в диссертации                 | годовой опыт в ёмкостях с реконструированным угольным профилем; эффекты компонентов смешаны | CASE-035             | средняя                                                                                  |
| Биосолиды в длительных полевых опытах с однократным внесением | 22   | —                       | 250   | сухая масса, Мг/га                                           | Вирджиния 22/56/112/224 ; Британская Колумбия 150/250; другие полевые случаи 224            | CASE-009/010/012/013 | высокая                                                                                  |
| Биосолиды в коротком опыте в Миннесоте                        | 7,17 | —                       | 28,69 | сухая масса, Мг/га                                           | исходно 3,2/6,4/12,8 тонны на акр сухой массы                                               | CASE-015             | высокая                                                                                  |
| Биосолиды при повторном накопительном внесении                | 801  | —                       | 1.815 | накопленная сухая масса, Мг/га                               | 35-летние поля в Иллинойсе; несколько внесений, а не одна доза                              | CASE-011             | высокая для накопленного итога; график внесений в текущем извлечении отсутствует         |
| Осадок сточных вод в старом шотландском опыте                 | 5    | —                       | 20    | т/га, частично высушенный ; точная доля вещества отсутствует | сочетался с 0/10/25/50 т извести/га                                                         | CASE-033             | высокая для дозы; низкая для сухого вещества                                             |

| Параметр                                                      | Мин.  | Типичное/<br>справочное | Макс.  | Единица                                           | Условия                                                                                            | Источник               | Уверенность                                                  |
|---------------------------------------------------------------|-------|-------------------------|--------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Остаток бумажного производства в опыте Миннесоты              | 62,77 | —                       | 125,54 | сухая масса, Мг/га                                | исходно 28/56 короткой тонны на акр сухой массы; заделка на 15,2 см                                | CASE - 015             | высокая                                                      |
| Торфяные, бумажные и компостные остатки в программе Миннесоты | 10    | —                       | 90     | Мг/га; основа зависит от материала и исследования | ранние многоплоща дочные опыты                                                                     | CASE - 016             | средняя                                                      |
| Биоуголь в опыте с равным внесением С                         | 8,3   | —                       | 8,3    | т/га; как указано в источнике                     | обеспечивал 2,7 т С/га                                                                             | CASE - 025             | высокая для дозы; влажность отсутствует                      |
| Компост в опыте с равным внесением С                          | 11,0  | —                       | 11,0   | т/га; как указано в источнике                     | обеспечивал 2,7 т С/га                                                                             | CASE - 025             | высокая для дозы; влажность отсутствует                      |
| Остаток биогазовой установки в опыте с равным внесением С     | 7,7   | —                       | 7,7    | т/га; как указано в источнике                     | обеспечивал 2,7 т С/га                                                                             | CASE - 025             | высокая для дозы; влажность отсутствует                      |
| Солома кукурузы в опыте с равным внесением С                  | 6,7   | —                       | 6,7    | т/га; как указано в источнике                     | обеспечивал а 2,7 т С/га                                                                           | CASE - 025             | высокая для дозы; влажность отсутствует                      |
| Известь в обычных горных и полевых опытах                     | 2     | —                       | 224    | Мг/га или т/га                                    | Жамари 2; Кандиота 10,4; Шотландия 10/25/50; хвосты с металлами 224                                | CASE - 013/031/032/033 | высокая; зависит от субстрата и не является общим диапазоном |
| Дополнительная известь по старому правилу для пирита          | 40    | —                       | 40     | т CaCO <sub>3</sub> /га на 1% FeS <sub>2</sub>    | историческое проектное правило из шотландской диссертации; не современное предписание для площадки | CASE - 033             | низкая; только исторический ориентир                         |

| Параметр                                                    | Мин.              | Типичное/<br>справочное | Макс.             | Единица                                   | Условия                                                                                                      | Источник                  | Уверенность                                              |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|
| Минеральная добавка FGD                                     | 280               | —                       | 280               | Мг/га                                     | кислые угольные земли Огайо; иногда +112 Мг/га садового компоста и 20-см восстановленного слоя               | CASE-004                  | высокая для случая; без химических данных не переносится |
| Слой плодородной почвы/корневая зона                        | 0,10              | —                       | 0,50              | толщина, м                                | Кузбасс: 10 см в опыте / $\geq 20$ см в производстве; Вирджиния 30 см; Кандиота 30–40 см; Польша около 50 см | KUZ-006, CASE-009/030/031 | высокая                                                  |
| Солодовый остаток в искусственном угольном технозёме        | 5                 | —                       | 5                 | % мас./мас.                               | 95% хвостов флотации угля; при предварительной оценке оптимум около 5–10%, в финальном дизайне 5%            | HYP-001                   | высокая для горшечного опыта                             |
| Активированный микробный инокулят в искусственном технозёме | $2,5 \times 10^7$ | —                       | $2,5 \times 10^7$ | клеток/г технозёма                        | после приготовления и активации «чая»; инкубация 7 дней после смешивания                                     | HYP-001                   | высокая                                                  |
| Соотношение при экстракции почвенного/компостного «чая»     | 1:4               | —                       | 1:4               | твёрдое вещество: вода, по массе к объёму | 22 °C, темнота, ежедневное ручное встряхивание, 7 дней, затем грубая фильтрация                              | HYP-001                   | высокая                                                  |
| Исходный образец для культивирования местных бактерий       | 1                 | —                       | 1                 | г донорской почвы на 25 мл бульона        | 7 дней при 30 °C, серийный перенос 1 мл, ещё 7 дней; 1 мл культуры на гранулу                                | MIC-001                   | высокая                                                  |

| Параметр                                                                                           | Мин. | Типичное/<br>справочное | Макс. | Единица                                | Условия                                                                                                      | Источник                 | Уверенность                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|-------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|
| Исходный образец для ловушечной культуры AMF                                                       | 50   | —                       | 50    | г полевого материала на сосуд 1 000 мл | автоклавированный песок + три группы растений-хозяев; четыре месяца                                          | MIC-005                  | высокая                                                |
| Доза инокулята цельной почвой                                                                      | —    | —                       | —     | —                                      | универсального минимума нет; исследования используют несопоставимые объёмные, послойные и суспензионные дозы | BIO-001/002/005, NYP-009 | высокая в отношении отсутствия универсального значения |
| Начальная влажность компостной смеси                                                               | 50   | 60                      | 70    | % влажной массы                        | диапазон USDA для управления процессом, а не влажность готового продукта при перевозке                       | ORG-010                  | высокая как инженерный ориентир                        |
| Начальное C:N компостной смеси                                                                     | 20:1 | —                       | 40:1  | массовое отношение                     | диапазон для быстрого компостирования; не доказательство зрелости                                            | ORG-010                  | высокая                                                |
| Требования по дополнительному снижению патогенов (PFRP) в реакторе или статической куче с аэрацией | 3    | —                       | 3     | дней при $\geq 55^{\circ}\text{C}$     | температурно-временной режим санитарной обработки, а не полная длительность компостирования                  | ORG-010                  | высокая                                                |
| PFRP в бурте                                                                                       | 15   | —                       | 15    | дней при $\geq 55^{\circ}\text{C}$     | не менее пяти перемешиваний; только санитарная стадия, затем требуется созревание                            | ORG-010                  | высокая                                                |



| Параметр                                                          | Мин. | Типичное/<br>справочное | Макс. | Единица              | Условия                                                                              | Источник | Уверенность                                                       |
|-------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|-------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------|
| Предельная рыхлая объёмная плотность компостной смеси для аэрации | —    | —                       | 641   | приблизительно кг/м³ | исходный порог 1 080 фунтов/ярд³; выше него воздушный поток может быть недостаточным | ORG-010  | средняя после пересчёта единиц; ориентир процесса, а не перевозки |
| Объёмная плотность чистой древесной щепы                          | 264  | —                       | 368   | приблизительно кг/м³ | исходно 445–620 фунтов/ярд³; только для оценки сырья                                 | ORG-010  | средняя; нужны фактические размер щепы и влажность                |

## 2. Внесение, повторность и длительность эффекта по отдельным случаям

| Кейс                   | Материал                                           | Доза                                                                    | Внесение / подготовка                                                                                            | Повторность            | Срок наблюдения, лет | Сохранился ли эффект                                                                                         | Источник     |
|------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Вирджиния CASE-009/010 | биосолиды; опилки; плодородная почва               | биосолиды 22/56/112/224 сухих Мг/га; опилки 112 Мг/га; слой почвы 30 см | рекультивированная угольная площадка; рандомизация, n=4; точная глубина заделки в текущем извлечении отсутствует | одно исходное внесение | 16 и 27              | часть ранних общих различий сошлась; наследие фракций C/N и MBC сохранилось                                  | CASE-009/010 |
| Огайо CASE-004         | FGD± садовый компост; восстановленный слой/известь | 280 Мг/га FGD; 112 Мг/га компоста; восстановленный слой 20 см           | комбинированное минеральное, органическое и профильное воздействие                                               | одно исходное внесение | 16                   | наследие растительности сохранилось; данные о воде и автономности неполны                                    | CASE-004     |
| Уэльс CASE-002         | муниципальный компост зелёных отходов              | 0,75 кг/дерево                                                          | локально вокруг высаженных деревьев                                                                              | одно                   | 11                   | универсального выигрыша по высоте и диаметру ствола на высоте груди (DBH) нет; выживаемость зависела от вида | CASE-002     |

| Кейс                            | Материал                                                                                  | Доза                                                                                | Внесение / подготовка                                                                                                   | Повторность                                        | Срок наблюдения, лет                             | Сохранился ли эффект                                                                                   | Источник |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Иллинойс<br>CASE-011            | биосолиды                                                                                 | 801–1.815 сухих Мг/га накопительн о                                                 | повторные внесения на поля                                                                                              | повторно; подробный график не извлечён             | 35                                               | узкий ряд данных по металлам в грунтовой воде сохранился; экологический эффект не оценён               | CASE-011 |
| Британская Колумбия<br>CASE-012 | биосолиды                                                                                 | 150/250 сухих Мг/га                                                                 | однократная добавка к хвостам                                                                                           | одно                                               | 13                                               | преимущество по C/биомассе сохранилось; меньшая доза эффективнее на единицу массы; при 250 был риск Zn | CASE-012 |
| Хвосты с металлами<br>CASE-013  | известь + биосолиды                                                                       | 224 + 224 Мг/га                                                                     | совместное внесение; точная глубина смешивания не извлечена                                                             | одно                                               | 21                                               | многие почвенные функции сохранились; риск Cd/Zn остался                                               | CASE-013 |
| Миннесота<br>CASE-015           | биосолиды ± остаток бумажного производства                                                | 7,17/14,35/28,69 сухих Мг/га биосолидов; 62,77/125,54 сухих Мг/га бумажного остатка | поверхностное распределение и заделка около 15,2 см; склоны заранее спланированы; семена и 4,48 Мг/га соломенной мульчи | одно                                               | 2–3 вегетационных сезона                         | покров увеличился, но нитратный и стоимостной ущерб рос с дозой; дальнейшая устойчивость неизвестна    | CASE-015 |
| Миннесота<br>CASE-016           | торф, садовый компост или компост из твёрдых коммунальных отходов (MSW), бумажные остатки | 10–90 Мг/га                                                                         | полевые участки и полноразмерные склоны; отмечены источники ближе 100 км                                                | одно указанное внесение                            | 5–9 для участков; 2 для раннего полного масштаба | некоторые варианты 10 Мг/га достигли 90% покрова к 5-му году; 44,8 Мг/га достигли стандарта за 3–5 лет | CASE-016 |
| Шаньси<br>CASE-025              | биоуголь/ компост/ дигестат/ навоз/ солома                                                | 8,3/11,0/7,7/8,0/6,7 т/га; по 2,7 т C/га                                            | заделка в слой 0–30 см; исходная линия и внесение в 2011 году, отбор 0–20 см в 2011 и 2016 годах                        | однократное исходное внесение с одинаковой дозой C | 5                                                | различия в пулах C сохранялись до 2016 года                                                            | CASE-025 |

| Кейс                     | Материал                                                    | Доза                                                                                               | Внесение / подготовка                                                             | Повторность                                                                               | Срок наблюдения, лет                        | Сохранился ли эффект                                                                                                          | Источник |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Шаньси<br>CASE-026       | разложившийся куриный помёт                                 | 12 т/га плюс заданный эквивалент питательных элементов                                             | уплотнённые выровненные/засыпанные сельхозземли; удобрение перед посевом кукурузы | повторно в семилетней системе; число внесений требует проверки до расчёта                 | 7                                           | SOM/N и бактерии изменились; сообщество осталось отличным от соседней пашни                                                   | CASE-026 |
| Польша<br>CASE-027       | осадок или компост + озёрный мел                            | осадок 33; компост 45 Мг/га в максимальных вариантах                                               | полевая фиторемедиация; глубина не извлечена                                      | не сообщается                                                                             | точный срок требует проверки полной таблицы | отклик SOC/растений, но фитотоксичность для сосны в варианте с осадком                                                        | CASE-027 |
| Шотландия<br>CASE-033    | торф/осадок/куриный помёт/Alginure + известь                | торф/осадок 5/10/20; помёт 1/2/4; Alginure 2,4/5,2/10,4; известь 0/10/25/50 т/га                   | пиритсодержащая порода; также 300 кг/га NPK и посев                               | авторы сочли, что старые добавки требуют повторения; документированной повторной дозы нет | около 10                                    | эффект 50 т извести часто сохранялся; варианты только с органикой в основном оставались без растительности                    | CASE-033 |
| Чили<br>CASE-034         | козий навоз/биосолиды/виноградные и оливковые остатки/смеси | точные дозы вариантов сохранены в первичной статье; безопасная нормализация в реестре не выполнена | заделка до 20 см; 13 вариантов ×3; полив в течение трёх сезонов укоренения        | повторного органического внесения нет; полив повторялся                                   | 3                                           | в части вариантов поздняя биомасса; плодородие снизилось, ранний импульс DOC/Cu, варианты с оливковыми остатками не сработали | CASE-034 |
| Южная Африка<br>CASE-035 | смеси навоза/щепы/травы/люцерны/зола-уноса                  | 40 или 132 т/га по варианту                                                                        | реконструированный профиль порода–подпочва–почва в ёмкостях 1×1×1,2 м             | одно                                                                                      | 1                                           | положительная смесь по нескольким показателям в пределах опыта; полевая устойчивость неизвестна                               | CASE-035 |

| Кейс                | Материал                                                           | Доза                                                                                   | Внесение / подготовка                                                                                                           | Повторность                                                            | Срок наблюдения, лет                       | Сохранился ли эффект                                                                                                | Источник |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Кузбасс<br>KUZ-006  | лессовидный суглинок или плодородная почва + местное семенное сено | слой 10 см в факторном опыте; в производстве $\geq 20$ см + 5 т семенного сена на 3 га | планировка, укладка корневой зоны, механическое распределение семенного сена                                                    | одно внесение материала/семенного сена                                 | 4–9                                        | сильная траектория покрова/сообщества; автономность почвы/воды не доказана                                          | KUZ-006  |
| Польша<br>HYP-011   | инокулированный компост перо:солома:лигнит                         | 18,3 т/га                                                                              | сырьё 20:60:20, инокуляция в день 0, 41 день реакторного компостирования, внесение на постдобычный песок                        | одно полевое внесение                                                  | один сезон                                 | сообщён отклик растений/почвы; нет полевого варианта с тем же неинокулированным компостом и долговременной проверки | HYP-011  |
| Coaltech<br>HYP-001 | 5% солодового остатка + культивированные/«чайные» инокуляты        | носитель 5% по массе; $2,5 \times 10^7$ клеток/г                                       | 7 дней экстракции, 7 дней активации, смешивание при 50% полевой влажностью, 7 дней инкубации при 30 °C с ежедневным газообменом | подготовка для каждого горшечного цикла; не полевое повторное внесение | два растительных цикла примерно по 90 дней | ранняя польза компостного «чая»/ЕМ; «чай» из местной почвы не помог; позднее различия сузились                      | HYP-001  |
| Пилбара<br>MIC-001  | культивированные местные бактерии/цианобактерии в гранулах         | 1 г донорской почвы → культура; 1 мл культуры на гранулу                               | две стадии культивирования по 7 дней; носитель — экструдированная посевная гранула                                              | одно                                                                   | 28 недель                                  | бактерии улучшили N/SIR; смесь с цианобактериями — нет; долговременная устойчивость неизвестна                      | MIC-001  |

### 3. Подготовка субстрата до внесения органических материалов

Экономическая модель должна содержать отдельные модули; внесение органического материала — не первая строка затрат:

| Состояние              | Обязательная работа до биологического этапа                            | Доказательная база |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Горящий/нагретый отвал | тепловое обследование, тушение/изоляция, контроль газов и устойчивости | SUB-003, KUZ-008   |

| Состояние                            | Обязательная работа до биологического этапа                                                           | Доказательная база                    |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Активно кислотообразующий материал   | кисотно-основной учёт; разделение/инкапсуляция/покрытие/дренаж и рассчитанная щелочная коррекция      | SUB-001/003 , FAIL-003 , CASE-022/033 |
| Геотехническая нестабильность/эрозия | планировка, проектирование рельефа и дренажа, стабилизация                                            | SUB-003 , KUZ-006 , CASE-024          |
| Уплотнённая корневая зона            | управляемое движение техники, рыхление/разуплотнение или рыхлая укладка                               | KUZ-005/006 , CASE-021/030            |
| Грубый материал/мало мелкозёма       | при необходимости минеральный мелкозём или слой корневой зоны; компост не заменяет минеральный скелет | KUZ-005/006 , CASE-016                |
| Засолённый/солонцеватый материал     | дренаж и специфичная для материала коррекция солей/солонцеватости до внесения материалов с высокой ЕС | CASE-008/029/034                      |
| Токсичный/подвижный материал         | изоляция/удаление/стабилизация и испытания на выщелачивание                                           | SUB-001 – SUB-006 , CASE-005/013/034  |

#### 4. Компостирование: технологические входы, а не фиксированный рецепт

| Этап/параметр                                | Документированное значение                                                                                                                                                  | Что требуется технологически                                                        | Источник        |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Смесь сырья                                  | исходное C:N 20:1–40:1 ; влажность 50–70% , ориентир около 60%                                                                                                              | сортировка, измельчение, рецептура/материальный баланс                              | ORG-010         |
| Активная аэробная фаза                       | контроль кислорода, влажности и температуры                                                                                                                                 | ворошитель/погрузчик для буртов либо принудительная аэрация/реакторное оборудование | ORG-010         |
| Санитарная обработка, статическая/реакторная | ≥55 °C не менее 3 суток                                                                                                                                                     | подтвердить прогрев всей массы, а не одной точки                                    | ORG-010         |
| Санитарная обработка, бурт                   | ≥55 °C не менее 15 суток и не менее пяти перемешиваний                                                                                                                      | документированный журнал перемешивания и температуры                                | ORG-010         |
| Созревание                                   | универсальной календарной длительности нет                                                                                                                                  | разложение с меньшей скоростью до прохождения показателей стабильности/зрелости     | ORG-005/010     |
| Выпуск продукта                              | испытание Дьюара (Dewar)/самонагревание, дыхание, NH <sub>4</sub> :NO <sub>3</sub> там, где используется, прорастание/фитотоксичность, ЕС/pH, патогены/сорняки/загрязнители | репрезентативный отбор проб и контроль качества партии                              | ORG-005/008/010 |

| Этап/параметр                           | Документированное значение | Что требуется технологически                                            | Источник |
|-----------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| Продemonстрированный инженерный процесс | всего 41 день              | динамический реактор для продукта перо/солома/лигнит; инокулят в день 0 | НУР-011  |

В выбранном корпусе не найдено обоснованного универсального выхода готового продукта. **ORG-006** документирует значительные потери массы, С и питательных элементов при компостировании, но специфичные для источника коэффициенты нельзя использовать как общий выход. Будущий экономический расчёт должен опираться на материальный баланс конкретной партии и предприятия.

## 5. Вторичное созревание и входы инокулята

| Технология                               | Количество                                                               | Носитель / условия                                                             | Дополнительная фаза                                                         | Требования к оборудованию                                                            | Доказательная граница                                   |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Coaltech: чай из местной почвы/ компоста | 1:4 твёрдое вещество:вода; итог $2,5 \times 10^7$ клеток/г технозёма     | жидкость; активация на солодовом остатке; 95:5 хвосты углеобогащения:с олод    | 7 суток экстракции + 7 суток активации + 7 суток инкубации после смешивания | тёмные сосуды, шейкер/мешалка, фильтрация, подсчёт клеток, инкубация при 30 °C       | тепличный опыт, не зрелый компост и не поле ( НУР-001 ) |
| Культивированные местные бактерии        | 1 г почвы/25 мл бульона; серийный перенос 1 мл; 1 мл культуры на гранулу | питательный бульон, затем экструдированная гранула                             | культура 7 + 7 дней                                                         | стерильные сосуды/ инкубатор, контроль качества культуры, производство/ сушка гранул | только культивируемая фракция, 28 недель ( MIC-001 )    |
| Ловушечная культура AMF                  | 50 г полевого материала на сосуд 1 000 мл                                | автоклавированный песок, растения-хозяева <i>Brachiaria</i> / подсолнечник/соя | 4 месяца                                                                    | теплица, полив, растения-хозяева, стресс/обрезка, анализ спор/ корней                | опыт по размножению, не полевая доза ( MIC-005 )        |
| Прямой инокулят цельной почвой           | универсальной дозы нет                                                   | донорская почва/ суспензия/ крошка                                             | различается                                                                 | отбор, биобезопасность, контроль ущерба донорскому участку                           | зависит от контекста ( BIO-001/002/005 , НУР-009 )      |
| Система Е                                | <b>не сообщается: прямого эксперимента нет</b>                           | зрелый компост, предварительно заселённый культивированным местным инокулятом  | длительность, температура и влажность не установлены                        | неизвестно до мезокосма                                                              | гипотеза; стоимость технологии пока нельзя рассчитать   |

## 6. Транспортная масса и объём

Документированные примеры:

- В дизайне CASE-015 для осадков сточных вод предполагалось около 28% сухого вещества: 11 влажных коротких тонн на акр давали около 3,1 короткой тонны на акр на сухую массу. Поэтому перевозимая влажная масса была примерно в 3,6 раза больше сухой. В отчёте также есть описание влажности партии, которое выглядит противоречивым в извлечённом тексте; до экономического использования необходимо визуально сверить исходную таблицу.
- В CASE-015 для бумажного остатка указано около 40% влажности в описании дизайна и 25,9% в более позднем описании проанализированной партии; следует использовать значение конкретной партии, а не среднее по фрагментам.
- В ORG-007 средняя лабораторная влажность полученного компоста менялась от 28% для коровьего до 54% для козьего; это примеры для первичной оценки, а не входы проекта.
- В ORG-010 плотность чистой древесной щепы составляла 445–620 фунтов/ярд<sup>3</sup> ≈ 264–368 кг/м<sup>3</sup>; компостной смеси с плотностью выше примерно 1 080 фунтов/ярд<sup>3</sup> ≈ 641 кг/м<sup>3</sup> может не хватать воздушного пространства. Ни один диапазон не заменяет измеренную плотность доставленной партии.

Необходимые поля будущего проекта:

влажная масса = сухая масса / доля сухого вещества

рыхлый объём = влажная масса / измеренная рыхлая объёмная плотность

эквивалент внесённого слоя = объём / 10 000 м<sup>2</sup>

Во всех трёх формулах должны использоваться одна и та же партия и одно состояние уплотнения. Номинальный обработанный слой 20 см не означает 2 000 м<sup>3</sup> компоста на гектар, если компост смешан с минеральным материалом.

## 7. Фактически наблюдавшиеся графики мониторинга

| Семейство доказательств | Фактическая структура отбора проб/наблюдений                                                                                 | Экономическое следствие                                                                                   |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-015                | 10 отборов инфильтрационной воды с июня 2002 по сентябрь 2003 года плюс события стока; растительность отслеживали три сезона | ранний событийный мониторинг воды трудоёмок                                                               |
| CASE-009/010            | один рандомизированный опыт оценивали примерно через 5, 16 и 27 лет                                                          | повторные длительные обследования показывают схождение и остаточное наследие, невидимые в первый год      |
| CASE-011                | ряд данных по грунтовой воде за 35 лет повторного применения биосолитов                                                      | повторные внесения требуют мониторинга воды на протяжении жизненного цикла, а не одной пробы при закрытии |



| Семейство доказательств     | Фактическая структура отбора проб/наблюдений                                                                         | Экономическое следствие                                                                                  |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-012/013                | повторное обследование через 13 и 21 год после однократной высокой дозы                                              | однократное внесение всё равно создаёт долговременные выгоды и обязательства мониторинга                 |
| CASE-025                    | пробы слоя 0–20 см в 2011 и 2016 годах                                                                               | две точки выявляют устойчивое изменение C, но не сезонные потери                                         |
| CASE-026                    | семилетний опыт удобрения; итоговая химия почвы и секвенирование бактерий                                            | микробный анализ не обязателен ежемесячно, но только итоговая точка пропускает переходные эффекты        |
| CASE-034                    | трёхлетний многосезонный мониторинг поровой воды, химии, микробов и биомассы                                         | вода и биомасса могут показывать противоположные направления; нужны оба блока                            |
| KUZ-006                     | исходная почва в 2014 году, повтор в 2018-м; растительность в 2015–2023 годах, ежегодные измерения фокусных растений | химию почвы можно измерять реже растительности, но исходная линия обязательна                            |
| BIO-009 / длинные хроноряды | возрастные интервалы 2–32+ года                                                                                      | референс/хроноряд снижает стоимость повторных отборов, но не заменяет причинность продольного наблюдения |

Поддержанный синтезом график мониторинга: исходная линия + ранний событийный отбор проб + ежегодно в годы 1–5 + годы 7, 10, 15 и 20. Это предложенный дизайн, выведенный из пробелов между кейсами, а не график, скопированный из одного источника; мониторинг представлен отдельной строкой сценарной модели.

#### 8. Интерпретация жизненного цикла

- Первые измеримые эффекты для растений: от нескольких недель до одного вегетационного сезона в горшечных/полевых опытах.
- Ранний ущерб для химии/воды: первые события стока/фильтрата и первые 1–2 года (FAIL-001/004/005, CASE-015/034).
- Физические/биологические эффекты для почвы: нередко 3–10 лет до устойчивого разделения вариантов.
- Сохраняющееся наследие внесённых материалов: показано через 10–27 лет для отдельных вариантов.
- Самопроизвольное/управляемое растительностью развитие профиля: 20–65 лет в хронорядах.
- Повторное вмешательство: явно присутствует в опытах с осадками сточных вод в Иллинойсе и сельскохозяйственных системах удобрения; старые шотландские варианты с органическими материалами были признаны требующими возобновления. Многие опыты с однократным внесением не доказали, что будущие вмешательства не понадобятся.

## 9. Недостающие входы экономической модели

Эти значения нельзя заполнять предположениями:

- специфичный для предприятия выход компоста из влажного сырья;
- влажность доставленного продукта и его рыхлая/уплотнённая объёмная плотность;
- доля браковки из-за загрязнения;
- длительность вторичного созревания и требования системы Е к ёмкостям и площади;
- выход жизнеспособного инокулята и срок хранения на один донорский образец;
- точная полевая доза С/D/E;
- объём земляных работ на площадке, дренаж и стоимость инженерного допуска;
- местный перечень лабораторных показателей и частота мониторинга;
- вероятность и стоимость неудачи/повторных работ.

Эти параметры требуют измерений для конкретной площадки и предприятия; доказательный корпус их не предоставляет.

# 26. Время как часть восстановления

**СИНТЕЗ (SYNTHESIS).** Деньги на восстановление можно запланировать и потратить; потерянные десятилетия нельзя купить обратно. Это авторская интерпретация фактической временной шкалы, а не денежный коэффициент. Корпус не позволяет назначить цену одному «потерянному году».

Долгосрочные данные показывают одновременно сохранение и сближение эффектов: часть воздействия почвенных добавок исчезает по общим показателям, часть наследия остаётся; горизонты, агрегаты, фауна и устойчивые пулы С развиваются десятилетиями; в хронорядах до 65 лет почвообразовательная траектория продолжается. Это не означает, что каждый объект потребует ровно 65 лет.

**56–65 ЛЕТ: ЧАСТЬ ДАННЫХ — ХРОНОРЯД, А НЕ НЕПРЕРЫВНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОДНОГО УЧАСТКА.** Самые длинные траектории в корпусе не следует пересказывать как единый 65-летний продольный эксперимент.

## 27. Что остаётся неизвестным

1. Нет универсального рецепта внесения материалов для угольных отвалов: минералогия, pH, соли, гранулометрический состав, гидрология и климат меняют результат.
2. Не найден прямой факторный опыт В/С/D/E и В-time для зрелого компоста, прямого внесения цельной донорской почвы, культивированного местного инокулята и предварительно заселённого материала с вторичным созреванием на добычной земле.
3. Не найден прямой факторный опыт С/D/E: малое количество донорской почвы против культивированного инокулята против заранее заселённого компоста.
4. Нет универсальной минимальной эффективной дозы донорской почвы или коэффициента 1 кг донора → X тонн эквивалентного живого субстрата.
5. Не доказано, что культивированное сообщество сохраняет функции цельной почвы; обогащение неизбежно отбирает таксоны.
6. Неизвестно, сохраняется ли возможное преимущество предварительного заселения спустя годы после переноса на угольную породу.
7. Большинство полевых исследований не измеряют одновременно воду, химию, физику, микробиом, фауну и размножение растений.
8. Хроноряды отделяют время от различий между площадками менее надёжно, чем продольные рандомизированные опыты.
9. Общий углерод в угольных отходах не всегда отделяет ископаемый С от нового биогенного С.
10. Долгосрочная судьба PFAS, фармацевтических веществ, микропластика и смешанных загрязнителей в некоторых органических потоках изучена недостаточно.
11. Нет прямого сравнения коз и овец на добычной земле, тем более опыта с ангорскими козами как технологией формирования почвы.
12. Нет основания называть один вид навоза универсально лучшим.
13. Реальную стоимость на гектар и углеродно-логистический след нельзя вычислить без конкретных предприятия, влажной массы, расстояния, дозы и площадки.
14. Для Кузбасса недостаточно парного долгосрочного мониторинга воды, микробиологии и физики почвы в одной экспериментальной сети.
15. Наука не даёт общего обещания вернуть историческую почву; достижимой целью может быть безопасный самоподдерживающийся технозём или экосистема.

Эти пробелы не требуют бесконечного поиска. Пункты 2–6 закрываются новым причинным экспериментом; 7–9 — дизайном и измерениями; 10 — квалификацией сырья; 11–12 — необязательными поздними опытами; 13–14 — будущей оценкой выполнимости для конкретной площадки; 15 — заранее выбранной целью восстановления.

Дополнительно остаются зависящие от конкретной площадки неопределённости по загрязнителям, отсутствие прямого опыта восстановления добычной земли с ангорскими козами, отсутствие универсального «лучшего» навоза, неизвестная стоимость системы Е и отсутствие гарантии восстановления исторической почвы.

## 28. Вывод и программа нового эксперимента

| Категория                     | Итог                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ</b>         | Безопасный минеральный субстрат корневой зоны, растения и почвенная биота способны запускать восстановление отдельных функций; органические материалы иногда ускоряют или меняют траекторию.                             |
| <b>ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ УСЛОВНО</b> | Контролируемый зрелый компост и отдельные инокуляты могут быть полезны после нулевого этапа инженерной безопасности; культивируемую фракцию технически возможно масштабировать из малого донорского образца.             |
| <b>НЕ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ</b>      | Универсальный рецепт; равенство зелёного покрова восстановленной почве; способность органических материалов заменить инженерные работы; культивированный инокулят как копия почвы; козы как технология почвообразования. |
| <b>НЕИЗВЕСТНО</b>             | Устойчивое преимущество системы Е над В/С/D; оптимальная доза и состав; сохранение эффекта в полевых условиях; долгосрочное состояние воды; цена масштабирования.                                                        |

Новый эксперимент должен сравнить А/В/С/D/Е и В-time при одинаковом зрелом материале, с контролями инактивированного материала, носителя и AMF, рандомизацией и достаточной повторностью; сначала в мезокосме, затем в полевом этапе с повторностями. Совместные первичные показатели: безопасность воды и функциональность/автономность. Правила остановки должны срабатывать при проблемах с нитратом, DOC, металлами, засолением, фитотоксичностью или устойчивостью площадки. Победа Е возможна только как измеренное стойкое преимущество, а не как заранее выбранный сюжет.

Человек, вероятно, не может изготовить копию почвы, утраченной при добыче. Но после инженерного допуска он может создать начальные условия, при которых снова начнут работать процессы почвообразования, измерить их и постепенно уменьшать собственное вмешательство.

## 28.1. Что это исследование не доказывает

| Не доказано                                                  | Точная граница                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Система Е лучше В/С/D                                        | Прямого сравнительного опыта в закрытом корпусе не найдено; это не доказывает абсолютного отсутствия такого исследования в мировой литературе.         |
| Культивируемый микробиом равен цельной почве                 | МТС-001 показывает масштабирование культивируемой фракции, а не копирование полного сообщества, редких таксонов, облигатных симбионтов и всех функций. |
| Существует универсально лучший навоз                         | Состав зависит от вида, рациона, подстилки, влажности, хранения и обработки.                                                                           |
| Существует универсальная доза органической почвенной добавки | Доза зависит от материала, основы расчёта, субстрата, климата, воды, цели и загрязнителей.                                                             |
| Ангорские козы восстанавливают почву на добычной земле       | Прямого опыта восстановления добычной земли с ангорскими козами в корпусе нет; возможна лишь поздняя роль в управлении растительностью.                |
| 56–65 лет гарантируют возврат исторической почвы             | Часть длинных данных — хроноряды; даже длительная траектория не обещает копию почвы, существовавшей до добычи.                                         |
| Экономическая модель является сметой Апанаса                 | Это сценарий сложного 100-га отвала апанасского типа, а не расчёт существующего объекта.                                                               |
| \$1,8–3,4/т — полная экологическая цена угля                 | Это только сценарная стоимость восстановления; климат, здоровье, биоразнообразие, исторический ущерб воде и социальные внешние эффекты не включены.    |

Эта карта ограничений является краткой навигацией. Полные основания и идентификаторы источников находятся в разделах 3, 15, 17–20, 24–27 и в реестре источников.

## 29. Реестр источников

Полный замороженный реестр приведён ниже. Путь проверки: утверждение → идентификатор источника → библиографическая запись → DOI/URL или локальная копия → ограничение.

### Реестр источников доказательного исследования V1.0

Версия: 26 сентября 2026 года. Этот файл является замороженным реестром для `SOIL_RESTORATION_EVIDENCE_RU_V1.0.pdf`. Запись источника означает включение в доказательный корпус, но не автоматическое принятие всех выводов публикации. Публикации одной группы доказательств не считаются независимыми подтверждениями.

**Доказательная граница:** запись источника в реестр не означает, что его выводы приняты без проверки.

Поля

| Идентификатор | Источник                                                                                                  | Тип                 | Объект/география          | Что подтверждает                                                                                                                                                    | Что не подтверждает / ограничение                                  | URL/DOI                                                                                                       | Локальная копия | Статус                |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| SUB-001       | Li et al. (2019), <i>Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review</i> | рецензируемый обзор | угольные земли, глобально | Разрушение и реконструкция затрагивают физические, химические и биологические свойства; необходимы как минимум рельеф, почва, гидрология, растительность и ландшафт | Обзор не доказывает эффективность конкретной органической поправки | <a href="https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015">https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015</a> | —               | Принят для карты поля |

| Идентификатор | Источник                                                    | Тип                                             | Объект/география       | Что подтверждает                                                                                                                                             | Что не подтверждает / ограничение                                        | URL/DOI                                                                                           | Локальная копия                                       | Статус |
|---------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|
| SUB-002       | OSMRE / ARRI, Forestry Reclamation Approach                 | федеральная программа и техническое руководство | Аппалачи, США          | Нужны подходящий корнеобитаемый материал, рыхлая укладка, совместимый покров, местные деревья и правильная посадка; уплотнение — самостоятельное ограничение | Озеленение/ лесопосадка не доказывает восстановление исходной экосистемы | <a href="https://www.osmre.gov/programs/arri">https://www.osmre.gov/programs/arri</a>             | —                                                     | Принят |
| SUB-003       | INAP, Global Acid Rock Drainage Guide                       | международное техническое руководство           | добычные отходы        | Сульфиды, кислород и вода способны поддерживать загрязнённый дренаж десятилетиями и столетиями; приоритет — прогнозирование и предотвращение у источника     | Биологические добавки не заменяют контроль источника загрязнения         | <a href="https://www.inap.com.au/acid-drainage/">https://www.inap.com.au/acid-drainage/</a>       | papers/SUB-003_GARD_2024_Sustainable_Mine_Closure.pdf | Принят |
| SUB-004       | Tibbett (2024), <i>Post-mining ecosystem reconstruction</i> | рецензируемое вводное руководство               | постдобычные ландшафты | Для опасных и глубоко изменённых материалов часто требуется реконструкция безопасной устойчивой экосистемы, а не буквальное возвращение прошлого состояния   | Не является испытанием конкретной технологии                             | <a href="https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.03.065">https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.03.065</a> | —                                                     | Принят |



| Идентификатор | Источник                                                                | Тип                            | Объект/география       | Что подтверждает                                                                                                     | Что не подтверждает / ограничение                                              | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|
| SUB-005       | Ren et al. (2022), мониторинг самовозгорания отвала после рекультивации | первичное полевое исследование | Шаньси, Китай          | Самовозгорание может возобновиться после рекультивации и снова повредить растительность                              | Растительный индикатор не заменяет инженерную диагностику очага                | <a href="https://doi.org/10.1002/dr.4297">https://doi.org/10.1002/dr.4297</a>                             | —               | Принят |
| SUB-006       | Querol et al. (2011), soil cover and spontaneous combustion             | обзор + полевые данные         | угольные отвалы, Китай | Горение связано с газами, конденсатами, выщелачиванием; почвенное покрытие требует отдельной инженерной оценки       | Нельзя свести к «нанести почву и посадить»                                     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.09.002">https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.09.002</a>       | —               | Принят |
| CHEM-001      | Angst et al. (2021), plant- vs microbial-derived stabilized SOM         | рецензируемый обзор            | почвы                  | Устойчивая SOM формируется из растительных и микробных соединений в агрегатах и MAOM; вклад зависит от почвы и среды | Не даёт универсальной доли стабильного углерода для отвалов                    | <a href="https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189">https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189</a> | —               | Принят |
| CHEM-002      | Witzgall et al. (2021), particulate OM                                  | первичный изотопный опыт       | минеральные почвы      | На поверхности разлагающегося опада одновременно образуются агрегаты и органо-минеральные связи                      | Лабораторный механизм нельзя автоматически переводить в полевой масштаб отвала | <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8">https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8</a>       | —               | Принят |

| Идентификатор | Источник                                                                      | Тип                                  | Объект/география                                | Что подтверждает                                                                                                                                                                               | Что не подтверждает / ограничение                                                                 | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус                |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| CHEM-003      | Müller et al. (2024), roots, aggregation and OM formation                     | первичное инкубационное исследование | засушливые верхние и нижние почвенные горизонты | Корни и грибы усиливают агрегацию; наследие корней различается между верхними и нижними горизонтами                                                                                            | Это не опыт на добычном объекте; часть эффектов в нижнем горизонте после отмирания не сохранялась | <a href="https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109503">https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109503</a> | —               | Принят с ограничением |
| CHEM-004      | Álvarez et al. (1996), P adsorption in coal mine soils                        | первичное исследование               | As Pontes, Испания                              | Fe/Al, pH и органический C объясняли значительную долю различий сорбции P                                                                                                                      | Не доказывает доступность P для всех растений или риск стока                                      | <a href="https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04934-7">https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04934-7</a>   | —               | Принят                |
| CHEM-005      | Kleber et al. (2021), mineral–organic interfaces                              | рецензируемый синтез                 | почвы и осадки                                  | Взаимодействия минералов с органическим веществом динамичны: адсорбция может вести к защите, реакции или дальнейшему окислению; «прилипло к минералу» не означает «навсегда стабилизировалось» | Это не полевой опыт на добычном объекте и не источник простого коэффициента хранения C            | <a href="https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y">https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y</a>       | —               | Принят                |
| CHEM-006      | Lavallee et al. / Cotrufo framework (2022 chapter), SOM formation/persistence | рецензируемый синтез                 | почвы                                           | Рабочее разделение DOM, POM и MAOM; сохранение эффекта зависит от микробной переработки, доступности и минералогии, а не от представления о едином «гумусе»                                    | Концептуальная схема не заменяет фракционирование на конкретном отвале                            | <a href="https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002">https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002</a>   | —               | Принят                |

| Идентификатор | Источник                                                              | Тип                                        | Объект/география      | Что подтверждает                                                                                                                         | Что не подтверждает / ограничение                           | URL/DOI                                                                                                                                                               | Локальная копия | Статус               |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|
| ORG-001       | US EPA, <i>Composting Yard Trimmings and Municipal Solid Waste</i>    | официальное техническое руководство        | муниципальный компост | Описывает мезофильную/термофильную фазы, аэрацию и температурный контроль патогенов                                                      | Сам факт нагрева кучи не доказывает зрелость всего продукта | <a href="https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/cytmsw.pdf">https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/cytmsw.pdf</a>                                             | —               | Принят               |
| ORG-002       | Ontario Compost Quality Standards                                     | официальный стандарт                       | Канада                | Зрелость проверяется совокупностью показателей; допускаются респирация и тесты прорастания/роста                                         | Один срок выдержки не является достаточным критерием        | <a href="https://www.ontario.ca/page/ontario-compost-quality-standards">https://www.ontario.ca/page/ontario-compost-quality-standards</a>                             | —               | Принят               |
| ORG-003       | USDA ARS, fresh poultry manure vs compost in reclaimed coal mine soil | официальный отчёт о первичном исследовании | США                   | Свежий низко-С:N навоз создаёт высокий риск потерь N; компостирование с С-богатым материалом снижало вынос растворённого органического С | Птичий навоз не заменяет сравнение коз/овец/коров/лошадей   | <a href="https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=333125">https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=333125</a> | —               | Принят               |
| ORG-004       | FAO manure composition tables                                         | межправительственная справочная база       | сельское хозяйство    | Состав навоза зависит от вида и влажности; значения следует сравнивать на единой базе                                                    | Справочные средние не заменяют анализ конкретной партии     | <a href="https://www.fao.org/4/w6928e/w6928e22.htm">https://www.fao.org/4/w6928e/w6928e22.htm</a>                                                                     | —               | Принят как диапазоны |

| Идентификатор | Источник                                                 | Тип                                           | Объект/география                                                                   | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                      | Что не подтверждает / ограничение                                                                                               | URL/DOI                                                                                                                     | Локальная копия                              | Статус |
|---------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------|
| ORG-005       | US EPA, <i>Compost Use on State Highway Applications</i> | официальная техническая спецификация          | внесение компоста в придорожные и ландшафтные почвы                                | Зрелость нельзя установить одним показателем: нужны биотесты, оценка стабильности или респирометрия, а также контроль инертных примесей, металлов, патогенов и семян сорняков                                         | Документ не предназначен специально для добычных объектов и не охватывает современные вопросы PFAS и других новых загрязнителей | <a href="https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/highwy4.pdf">https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/highwy4.pdf</a> | papers/ORG-005_EPA_compost_specification.pdf | Принят |
| ORG-006       | Faverial et al. (2016), manure-based compost quality     | контролируемый эксперимент по компостированию | навоз крупного рогатого скота, лошадей, коз и птицы с зелёными отходами; Гваделупа | Вид исходного навоза существенно влиял на C:N, питательные элементы и NH <sub>4</sub> ; термофильная стадия и стабилизация снизили NH <sub>4</sub> до сходных низких значений, но сопровождалась потерями C, N, P и K | Тропический маломасштабный процесс не задаёт состав других партий и не является полевым опытом на добычном объекте              | <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157884">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157884</a>                     | —                                            | Принят |

| Идентификатор | Источник                                                                                                               | Тип                                                          | Объект/география                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                        | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                                                                                                               | Локальная копия                                                       | Статус                                         |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| ORG-007       | Utah State University Analytical Laboratory, manure/compost averages 2005–2019                                         | официальная лабораторная сводка                              | твёрдый навоз и компост; штат Юта, США | Даёт сопоставимые средние значения на влажную массу для N, P2O5, K2O, pH, ЕС, влажности и C:N у навоза коз, овец, мясного и молочного скота, лошадей и компоста                                                         | Это не рецензируемый опыт; происхождение и условия партий различаются; число исходных образцов козьего навоза не указано как большое; данные пригодны только для предварительной оценки                  | <a href="https://extension.usu.edu/yardandgarden/research/sustainable-manure-and-compost-application">https://extension.usu.edu/yardandgarden/research/sustainable-manure-and-compost-application</a> | —                                                                     | Принят как эмпирическая предварительная оценка |
| ORG-008       | European Commission JRC (2014), <i>End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment</i> | официальное техническое предложение и аналитическая кампания | компост и дигестат; Европейский союз   | Даёт отдельные определения компоста и дигестата, требования к разделению исходных потоков, стабильности, патогенам, проросткам сорняков, физическим примесям и предельным уровням металлов и органических загрязнителей | Не является универсальным действующим разрешением; предшествует современным данным о PFAS и микропластике; соответствие критериям продукта не доказывает пригодность для конкретного добычного субстрата | <a href="https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87124">https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87124</a>                                                       | <a href="#">papers/ORG-008_JRC_end_of_waste_compost_digestate.pdf</a> | Принят как система квалификационных требований |

| Идентификатор | Источник                                                                                | Тип                                                                     | Объект/география                                        | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                              | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                           | Локальная копия                                  | Статус                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| ORG-009       | Zhang / UC Davis / US EPA workshop (2017), <i>Digestate Alone and With Compost</i>      | техническая презентация с данными пилотных и полевых испытаний продукта | дигестат из пищевых отходов и навоза молочного скота    | Показывает, что цельный, жидкий, концентрированный и гранулированный дигестат — разные продукты; для одной гранулы из пищевых отходов указаны влажность 8,98%, N 4,99%, C 37,76%, P 1,75% и K 2,67% на влажную массу                          | Рассмотрен один технологический продукт и агрономический опыт; это не исследование добычной земли, не норматив и не характеристика «типичного дигестата» | <a href="https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-11/documents/cba2017-digestate_alone_and_with_compost.pdf">https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-11/documents/cba2017-digestate_alone_and_with_compost.pdf</a> | papers/ORG-009_EPA_food_waste_digestate_case.pdf | Принят только как конкретный пример изменчивости |
| ORG-010       | USDA NRCS (2010), <i>National Engineering Handbook, Part 637, Chapter 2: Composting</i> | официальное инженерное руководство и справочные таблицы                 | сельскохозяйственное и муниципальное сырьё для компоста | Даёт сопоставимые ориентиры N, C:N, влажности и насыпной плотности для пищевых отходов, навоза, листьев, травы, бумаги, картона и древесных потоков; описывает управление процессом и несколько независимых испытаний зрелости и стабильности | Справочник содержит исторические диапазоны из разных материалов и не заменяет анализ партии; не охватывает PFAS и не является опытом на добычной земле   | <a href="https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2/1712930995/Chapter%202%20-%20Composting.pdf">https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2/1712930995/Chapter%202%20-%20Composting.pdf</a>               | papers/ORG-010_USDA_NRCS_composting_handbook.pdf | Принят как справочник для предварительной оценки |

| Идентификатор | Источник                                                       | Тип                                          | Объект/география                               | Что подтверждает                                                                                                                            | Что не подтверждает / ограничение                                                                         | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус                |
|---------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| BIO-001       | Wubs et al. (2016), <i>Soil inoculation steers restoration</i> | шестилетний полевой эксперимент              | бывшая пашня, Нидерланды                       | Малые дозы инокулята способны направлять растительное и почвенное сообщества по разным траекториям                                          | Опыт проведён не на добычном объекте; переносимость на токсичный или безжизненный субстрат не установлена | <a href="https://doi.org/10.1038/nplants.2016.107">https://doi.org/10.1038/nplants.2016.107</a>           | —               | Принят с ограничением |
| BIO-002       | Small-volume forest topsoil additions (2022)                   | первичные тепличные опыты                    | Mount Polley Mine, Канада                      | Малые объёмы лесной почвы улучшали колонизацию симбионтами и рост части семян; важна совместимость донора и растения                        | Теплица и ранний рост не доказывают долгосрочную полевую устойчивость                                     | <a href="https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104622">https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104622</a>   | —               | Принят с ограничением |
| BIO-003       | Mycorrhizal fungi in mine restoration (2022)                   | рецензируемый обзор                          | добычные земли, глобально                      | Эффекты AMF зависят от минерала и условий; долгосрочных полевых данных недостаточно                                                         | Не оправдывает универсальный коммерческий инокулят                                                        | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106580">https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106580</a> | —               | Принят                |
| BIO-004       | Torres-Arias et al. (2021), 29-year revegetation and AMF       | долгосрочный хроноряд и полевое исследование | железорудные хвосты; Квебек и Лабрадор, Канада | За 29 лет состав засеянных видов менялся, микоризация возрастала после многолетней колонизации, а разные роды AMF появлялись в разное время | Объект не угольный; хроноряд по разным хвостохранилищам не равен одному повторно измеряемому эксперименту | <a href="https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104145">https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104145</a>   | —               | Принят с ограничением |



| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                  | Тип                                                                        | Объект/география                                                        | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                   | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                            | URL/DOI                                                                                             | Локальная копия | Статус                                                          |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| BIO-005       | Gerrits et al. (2023), soil translocation synthesis                                                                                                       | систематический обзор полевых опытов                                       | площадки экологического восстановления                                  | Эффект переноса цельной почвы зависит от контекста; когда целью является биота, могут быть достаточны малые комочки, а не сплошное снятие верхнего слоя донорской почвы                                                            | Обзор посвящён результатам для растительных сообществ и не доказывает химическую безопасность добычной почвы                                                                                 | <a href="https://doi.org/10.1111/1365-2664.14364">https://doi.org/10.1111/1365-2664.14364</a>       | —               | Принят                                                          |
| BIO-006       | Guignabert et al. (2023), <i>Soil amelioration induced by nurse shrubs in coal mines reclaimed to pastures and their synergistic effects with grazing</i> | первичное полевое сравнение огороженных участков и участков с кустарниками | рекультивированное пастбище на открытом угольном разрезе; север Испании | Влагоудерживающая способность и доступная растениям вода были выше без выпаса; вытаптывание копытными усиливало уплотнение; кустарники-няни добавляли органическое вещество и плодородие и частично защищали почву от вытаптывания | Не сравнивает коз, овец и крупный рогатый скот; история выпаса и влияние диких и домашних копытных смешаны; не доказывает, что сельскохозяйственные животные необходимы для почвообразования | <a href="https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108483">https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108483</a> | —               | Ключевой аргумент против использования животных на раннем этапе |

| Идентификатор | Источник                                                                                                      | Тип                                                                | Объект/география                                          | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                         | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                  | URL/DOI                                                                                             | Локальная копия                                                        | Статус                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| BIO-007       | Maczkowiack et al. (2012), <i>Grazing as a post-mining land use: A conceptual model of the risk factors</i>   | рецензируемая система оценки риска и опрос заинтересованных сторон | шесть открытых разрезов; бассейн Боуэн, Австралия         | Риск выпаса определяется не только почвой, но и продуктивностью, решениями о плотности поголовья, коммерческой жизнеспособности и соблюдением условий управления                                                                                                         | Это концептуальная модель риска, а не опыт с вариантами воздействия; относится прежде всего к выпасу крупного рогатого скота как конечному землепользованию, а не к созданию почвы | <a href="https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.002">https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.002</a> | —                                                                      | Принят как система принятия решений после восстановления |
| BIO-008       | Gamble, Gadzia & Raisbeck (1997), <i>Livestock Grazing for Reclaimed Land at Navajo Mine: Animal Response</i> | полевой отчёт конференции                                          | рекультивированный угольный разрез; штат Нью-Мексико, США | При тщательно управляемом выпасе крупного рогатого скота с ограждением, планированием воды и кормов и контролем здоровья первые два года не выявили неблагоприятного сигнала для здоровья животных; выявлены производственные опасности и эпизод ухудшения качества воды | Короткий срок, программа связана с компанией, а реакция животных важнее восстановления почвы; нет сравнения коз и овец и нет доказательства пользы для почвообразования            | <a href="https://doi.org/10.21000/JASMR97010255">https://doi.org/10.21000/JASMR97010255</a>         | <a href="#">papers/BIO-008_Navajo_Mine_grazing_animal_response.pdf</a> | Принят с сильным ограничением                            |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                        | Тип                                          | Объект/география                                                                                                      | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | URL/DOI                                                                                   | Локальная копия                                                                | Статус                                                                               |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| BIO-009       | Kane et al. (2020),<br><i>Soil microbial succession following surface mining is governed primarily by deterministic factors</i> | рецензируемый<br>хроноряд угольных<br>земель | земли после<br>контурной добычи<br>угля; Западная<br>Вирджиния, США; 2,<br>10, 15 и 32 года<br>после<br>рекультивации | Бактериальные и<br>грибные<br>сообщества<br>менялись с<br>возрастом; влияние<br>измеренных<br>детерминированн<br>ых факторов на<br>формирование<br>бактериального<br>сообщества было<br>примерно в семь<br>раз сильнее<br>стохастической<br>составляющей, а<br>вариация грибов<br>объяснялась только<br>экологическими<br>факторами;<br>особенно важны<br>SOM,<br>гранулометрически<br>й состав и pH | Сравниваются<br>четыре разные<br>площадки, а не<br>повторные<br>наблюдения одной;<br>биомасса, богатство<br>и состав сообществ<br>даже через 32 года<br>не показывали<br>ясного<br>приближения к<br>референсному<br>пастбищу;<br>применялась<br>стандартная<br>рекультивация<br>верхним<br>плодородным<br>слоем, травами и<br>бобовыми без<br>органической<br>добавки | <a href="https://doi.org/10.1093/emsec/fiaa114">https://doi.org/10.1093/emsec/fiaa114</a> | —; полный<br>открытый HTML<br>проверен, PDF<br>endpoint издателя<br>вернул 403 | Принят как<br>долгосрочная<br>микробная<br>траектория с<br>ограничением<br>хроноряда |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                             | Тип                                          | Объект/география                                                                                                                                | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                           | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                       | URL/DOI                                                                       | Локальная копия | Статус                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| BIO-010       | McGregor (2010), <i>Influence of stocking rate and mixed grazing of Angora goats and Merino sheep... 1. Botanical composition...</i> | четырёхлетний опыт с выпасом и повторностями | улучшенное однолетнее пастбище умеренного климата, юг Австралии; ангорские козы, овцы-мериносы и смешанный выпас при 7,5, 10 и 12,5 животных/га | Взаимодействие вида животных и нагрузки было сильным; на этом конкретном пастбище при высокой нагрузке козы сохраняли больше клевера, меньше сорняков и вызывали меньший рост площади оголённой земли, чем овцы; рацион менялся по сезонам | Это не постдобычная земля, не молодое восстановление и не цель возвращения местной экосистемы; непрерывный выпас и результаты специфичны для состава пастбища и климата; сопутствующие данные указывают на высокую смертность ангорских коз при повышенной нагрузке и холодовом стрессе | <a href="https://doi.org/10.1071/AN09128">https://doi.org/10.1071/AN09128</a> | —               | Принят как сравнение пород, но не доказательство переносимости на отвалы |
| BIO-011       | Taylor & Kothmann (1990), <i>Diet Composition of Angora Goats in a Short-Duration Grazing System</i>                                 | первичное полевое исследование выбора корма  | пастбища плато Эдуардс, Техас, США                                                                                                              | Рацион ангорских коз менялся по сезонам; при наличии кустарников они выбирались непропорционально часто, тогда как в некоторые тёплые сезоны преобладали травы; измерялись потребление и фекальный выход                                   | Два пастбища, конкретная система 0,19 единицы поголовья на гектар в год и конкретный климат; предпочтение корма не доказывает пользу для восстановления или допустимый ущерб молодым древесным растениям                                                                                | <a href="https://doi.org/10.2307/3899028">https://doi.org/10.2307/3899028</a> | —               | Принят для механизма питания ангорских коз                               |

| Идентификатор | Источник                                                                                  | Тип                                                                | Объект/география                                      | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                          | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                       | URL/DOI                                                                                                                   | Локальная копия | Статус                                                             |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|
| BIO-012       | Lym, Sedivec & Kirby (1997), <i>Leafy spurge control with Angora goats and herbicides</i> | четырёхлетний опыт по управлению растительностью на двух площадках | пастбища с инвазивным молочаем в Северной Дакоте      | Повторный выпас ангорских коз снизил плотность целевого инвазивного вида; данные поддерживают целевое управление растительностью при заданном режиме                                                                      | Контроль сорняка не равен восстановлению почвы; выпас способен распространять жизнеспособные семена и менять нецелевую растительность; опыт не рассматривает уплотнение, воду и загрязнители на отвалах | <a href="https://arc.lib.montana.edu/range-science/item/739">https://arc.lib.montana.edu/range-science/item/739</a>       | —               | Принят только как доказательство целевого обьедания растительности |
| CASE-001      | Pichtel et al. (1994), ten-year amendment comparison                                      | 10-летний полевой опыт                                             | кислая пиритсодержащая угольная отвальная порода; США | Сравнивает анаэробно переработанный осадок сточных вод, летучую золу, компостированный осадок целлюлозно-бумажного производства и верхний плодородный слой; показывает долговременные различия pH и растительного покрова | Высокие исторические дозы и прежние стандарты для осадков требуют современной оценки загрязнителей                                                                                                      | <a href="https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300040022x">https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300040022x</a> | —               | Приоритетный случай                                                |
| CASE-002      | Haigh et al. (2019), municipal green-waste compost                                        | 11-летний контролируемый полевой опыт                              | бывшая открытая угледобыча, Уэльс                     | 0,75 кг компоста на дерево изменили выживаемость, но не дали общего прироста высоты или DBH; ответ зависел от вида                                                                                                        | Не измеряет полный почвенный цикл                                                                                                                                                                       | <a href="https://doi.org/10.1177/1178622119877837">https://doi.org/10.1177/1178622119877837</a>                           | —               | Приоритетный смешанный результат                                   |

| Идентификатор | Источник                                         | Тип                    | Объект/география                                 | Что подтверждает                                                                                                                         | Что не подтверждает / ограничение                                                     | URL/DOI                                                                                                       | Локальная копия | Статус                    |
|---------------|--------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| CASE-003      | Růžek et al. (2012), sludge + paper waste + bark | полевой опыт 2001–2008 | буроугольный бассейн, Чехия                      | Однократная смесь отходов и подсев сопровождались измерениями C, микробной биомассы и дыхания                                            | Сложная смесь не позволяет приписать эффект одному компоненту                         | <a href="https://doi.org/10.17221/397/2011-PSE">https://doi.org/10.17221/397/2011-PSE</a>                     | —               | Приоритетный кейс         |
| CASE-004      | FGD product ± yard-waste compost (2013)          | 16-летний полевой опыт | кислые угольные земли, Огайо, США                | Долгосрочная реакция растений отличалась от ранней; сочетание материалов может работать дольше десяти лет                                | FGD не является органическим материалом; необходимы данные о воде и полной экосистеме | <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.081">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.081</a>           | —               | Приоритетный случай       |
| CASE-005      | Tri-State residuals vs topsoil (2014)            | 12-летний полевой опыт | хвосты с Pb и Zn; штат Миссури, США              | Сравнивает осадки сточных вод, известь и компост с собранным верхним плодородным слоем; оценены растения, металлы и мелкие млекопитающие | Металлические хвосты не равны угольной отвальной породе                               | <a href="https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.029">https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.029</a> | —               | Сопоставимый случай       |
| CASE-006      | Detour Lake amendment trial (2026)               | 9-летний полевой опыт  | открытый золотой рудник в бореальной зоне Канады | Сравнены восемь стратегий, включая торф, осадки сточных вод и их сочетания; совместно оцениваются почва, растения и микроорганизмы       | Объект не угольный; работа опубликована недавно, требуется полный текст               | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.130328">https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.130328</a>     | —               | Приоритетный новый случай |

| Идентификатор | Источник                                          | Тип                             | Объект/география                                              | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                              | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                  | URL/DOI                                                                                           | Локальная копия | Статус                                            |
|---------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| CASE-007      | Dong et al. (2026), leguminous green manure       | 10-летний полевой опыт          | рекультивированная угольная разработка; Гуцзяо, Шаньси, Китай | Естественное восстановление сравнили с постоянным выращиванием люцерны и мохнатой вики; люцерна повышала SOC, общий P, содержание водорословных агрегатов, бактериальное разнообразие и биомассу                              | Это управляемая сельскохозяйственная система, а не возврат зональной экосистемы; по доступному тексту нужно дополнительно проверить историю делянок, повторность и показатели воды | <a href="https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1802650">https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1802650</a> | —               | Приоритетный случай внутреннего поступления C и N |
| CASE-008      | Walmsley et al. (2022), <i>From spoil to soil</i> | тепличный и ранний полевой опыт | буроугольный разрез Лой-Янг; Австралия                        | Местные вскрышную породу, подпочву и верхний плодородный слой, уголь, летучую золу, остаток целлюлозно-бумажного производства и компост из зелёных отходов смешивали в технозёмы; полевой мониторинг запланирован на пять лет | Доступны только ранние результаты для растений; высокая ЕС и солонцеватость уже были проблемой; цель в виде продуктивного пастбища не равна экологическому восстановлению          | <a href="https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2215_92">https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2215_92</a> | —               | Перспективный, но незавершённый случай            |



| Идентификатор | Источник                                                                          | Тип                                                           | Объект/география                                              | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                       | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                           | URL/DOI                                                                                     | Локальная копия                                           | Статус                                                              |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| CASE-009      | Bendfeldt et al. (2001), <i>Quality of Amended Mine Soils After Sixteen Years</i> | 16-летний рандомизированный полевой эксперимент               | поверхностная угольная разработка; округ Уайз, Вирджиния, США | Контроль, 30 см верхнего плодородного слоя, 112 Мг/га опилок и осадки сточных вод 22, 56, 112 и 224 Мг/га, n = 4; к 16 годам контроль только с растительностью приблизился к вариантам с добавками по SOM и минерализации N            | Краткосрочный выигрыш не сохранился как общее преимущество качества почвы; состав исторических осадков и контекст с посевом овсяницы и сосны ограничивают переносимость     | <a href="https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1736">https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1736</a> | —                                                         | Ключевой отрицательный долгосрочный случай                          |
| CASE-010      | Wick et al. (2010), 27-year Virginia follow-up                                    | 27-летнее продолжение того же рандомизированного эксперимента | поверхностная угольная разработка; округ Уайз, Вирджиния, США | Делянки с осадками сточных вод сохраняли больше C и N, связанных с агрегатами; дозы 22–56 Мг/га выглядели лучше по части доступных C и N; C микробной биомассы был выше, тогда как общее распределение агрегатов в основном сблизились | Не отменяет 16-летний вывод о сближении по другим показателям; высокая вариабельность между повторностями, один опыт и исторические осадки требуют осторожной интерпретации | <a href="https://doi.org/10.21000/JASMR10011364">https://doi.org/10.21000/JASMR10011364</a> | <a href="#">papers/CASE-010_Wick_27_year_Virginia.pdf</a> | Ключевой смешанный долгосрочный случай; первичный источник проверен |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                          | Тип                                 | Объект/география                                                         | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                           | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                     | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус                                                                 |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------|
| CASE-011      | Oladeji et al. (2012), <i>Effects of long-term application of biosolids for mine land reclamation on groundwater chemistry: trace metals</i>                      | 35-летний мониторинг подземных вод  | 1790 га земель, нарушенных открытой добычей; округ Фултон, Иллинойс, США | На семи полях с осадками сточных вод при накопленной нагрузке 801–1815 сухих Мг/га и семи полях с удобрениями большинство металлов в подземных водах оставались ниже нормативных пределов; Fe и Mn были устойчиво выше, Zn различался главным образом до введения Part 503 | Проверяет следовые металлы, а не нитрат, PFAS, фармацевтические вещества, патогены, микропластик или экологическое восстановление; многократное внесение и исторические продукты не равны современному однократному внесению компоста | <a href="https://doi.org/10.2134/jeq2011.0472">https://doi.org/10.2134/jeq2011.0472</a>                   | —               | Очень длинный ряд по безопасности воды; принят с узкой границей вывода |
| CASE-012      | Antonelli et al. (2018), <i>Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation</i> | 13-летнее полевое продолжение опыта | хвосты с Cu и Mo; Британская Колумбия, Канада                            | Однократные дозы 150 и 250 сухих Мг/га поддерживали более высокий запас C и биомассу через 13 лет; меньшая доза была эффективнее по накопленному C на единицу осадков сточных вод                                                                                          | Хвосты не являются угольным отвалом; использованы высокие дозы осадков; Zn при 250 Мг/га превышал федеральный почвенный норматив; вода, микробные сообщества и автономность оценены не полностью                                      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.001">https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.001</a> | —               | Ключевой положительный долгосрочный случай с ограничением по дозе      |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                             | Тип                                                                 | Объект/география                                         | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                          | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                             | URL/DOI                                                                                           | Локальная копия                                                                  | Статус                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| CASE-013      | Ippolito et al. (2024), <i>Soil health as a proxy for long-term reclamation success of metal-contaminated mine tailings using lime and biosolids</i> | 21-летнее полевое продолжение опыта                                 | аллювиальные хвосты металлических руд                    | После внесения 224 Мг/га извести и 224 Мг/га осадков сточных вод улучшились pH, агрегация, SOC, минерализуемый N, микробные показатели и растительность относительно деградированного участка                                                                             | Это не рандомизированный опыт на угольном объекте; биодоступные Cd и Zn в фильтрате и почве оставались выше экологических уровней предварительной оценки, а кормовые растения могли требовать управления; зелёный участок не означает отсутствия пищевой или водной опасности | <a href="https://doi.org/10.1016/j.sch.2024.100096">https://doi.org/10.1016/j.sch.2024.100096</a> | —                                                                                | Очень длинный случай со смешанным результатом               |
| CASE-014      | Богородская (2016), «Микробиологическая оценка состояния антропогенно нарушенных лесных экосистем Средней Сибири»                                    | шестилетний мониторинг хроноряда до 30 лет и обзор локальных опытов | Бородинский буроугольный разрез, Канско-Ачинский бассейн | На стабильной выровненной поверхности 30-летнего отвала qCO <sub>2</sub> был сопоставим с контролем; на 23-летнем эрозионном склоне микробиоценоз оставался пионерным и несбалансированным; нанесение плодородного слоя почвы ускоряло микробную и растительную сукцессию | Это не Кузбасс; хроноряд не равен повторному эксперименту одного варианта; краткий опыт с навозом, опилками и бактериальным препаратом не даёт долгосрочных данных о безопасности воды или автономности                                                                       | <a href="https://doi.org/10.15372/SJFS20160207">https://doi.org/10.15372/SJFS20160207</a>         | <a href="#">papers/CASE-014_Bogorodskaya_2016_microbiological_assessment.pdf</a> | Ключевой случай: топография может оказаться важнее возраста |

| Идентификатор | Источник                                                                            | Тип                                                    | Объект/география                                  | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                   | URL/DOI                                                                                                                                 | Локальная копия                                                             | Статус                                                |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| CASE-015      | Eger & Antonson (2005), <i>Use of Biosolids to Reclaim Coarse Taconite Tailings</i> | официальный итоговый полевой отчёт                     | грубозернистые таконитовые хвосты; Миннесота, США | Совмещает повторные инфильтрационные контейнеры и демонстрационный склон площадью 12 акров; сравнивает осадки сточных вод при 100, 200 и 400 фунтах доступного N на акр с остатком целлюлозно-бумажного производства и без него, химический состав воды, растительность и фактические затраты проекта | Субстрат не угольный; двух-трёх вегетационных сезонов недостаточно для вывода об автономности почвы; нитрат превышал 10 мг/л на большинстве обработанных делянок, а высокая доза давала примерно втрое больше нитрата, чем вариант 200N; использованы исторические осадки и стандарты загрязнителей | <a href="https://www.lrl.mn.gov/docs/2024/other/241364.pdf">https://www.lrl.mn.gov/docs/2024/other/241364.pdf</a>                       | <a href="#">papers/CASE-015_Eger_2004_taconite_biosolids_cost_water.pdf</a> | Ключевой комплексный случай: вода, стоимость и покров |
| CASE-016      | Eger, Melchert & Dewar (1999), <i>Waste for Wastelands</i>                          | материалы конференции, сводка многообъектной программы | грубозернистые таконитовые хвосты; Миннесота, США | Ранние малые делянки и полномасштабное внесение 10–90 Мг/га торфа, садового компоста, компоста из твёрдых коммунальных отходов и бумажных остатков; показаны дозы, взаимодействие с удобрениями и экономика транспортного расстояния                                                                  | Это та же исследовательская программа Миннесоты, что и последующий CASE-015, поэтому она не является независимым подтверждением; успех задан главным образом нормативом растительного покрова, а цены исторические                                                                                  | <a href="https://www.asrs.us/wp-content/uploads/2021/09/0132-Eger.pdf">https://www.asrs.us/wp-content/uploads/2021/09/0132-Eger.pdf</a> | <a href="#">papers/CASE-016_Eger_Waste_for_Wastelands.pdf</a>               | Принят как ранняя фаза и экономический случай         |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                               | Тип                                                      | Объект/география                                                                | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                      | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                            | URL/DOI                                                                                                     | Локальная копия                                                                              | Статус                                                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| CASE-017      | Tripathi, Singh & Hills (2016), <i>Re-vegetation of coal mine spoil: Carbon budget and carbon sequestration potential</i>              | рецензируемое полевое исследование возрастного градиента | озеленённые отвалы угольной породы; Синграули, Индия; 2, 4, 10, 14, 16 и 19 лет | По возрастному градиенту надземная биомасса выросла примерно в 23 раза, подземная — в 26 раз, измеренный органический С — в 4 раза, MBC — в 6,6 раза; показана возможная траектория «опад — корни — микроорганизмы — С» после посадки | Это не повторный мониторинг: сравниваются разные участки и возрасты; состав видов и исходные условия могут различаться; метод Уокли — Блэка на угольном субстрате может учитывать ископаемый или углеподобный С; расчётный углеродный баланс не равен прямому измерению потоков и не доказывает автономность | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.019">https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.019</a>   | <a href="#">papers/CASE-017_Tripathi_2016_19y_coal_spoil_carbon.pdf</a>                      | Принят с сильным ограничением дизайна и метода измерения С            |
| CASE-018      | Domínguez-Haydar et al. (2018), <i>Assessment of soil fauna footprints at a rehabilitated coal mine using micromorphology and NIRS</i> | рецензируемый хроноряд                                   | открытый угольный разрез Эль-Серрехон, Колумбия; 1–20 лет                       | Между 2- и 20-летними площадками матрица менялась от практически неструктурированного материала без видимой биогенной активности к консолидированным агрегатам, более однородной микроструктуре и следам биотурбации макрофауны       | Это хроноряд, а не одна повторно измеряемая делянка; восстановление включало перенос верхнего плодородного слоя и озеленение, поэтому вклад отдельных механизмов не разделён; органические добавки не испытывались                                                                                           | <a href="https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.032">https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.032</a> | —; полный репозитарный PDF проверен через браузер, автоматическая загрузка защищена anti-bot | Принят как прямое микроморфологическое свидетельство почвообразования |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                        | Тип                                    | Объект/география                                                             | Что подтверждает                                                                                                                                                                                     | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                     | Локальная копия                                         | Статус                                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| CASE-019      | Castellanos-Barliza & León-Peláez (2023), <i>Soil recovery in a chronosequence of revegetated coal mine spoils in Colombian drylands</i>                        | рецензируемый хроноряд                 | Эль-Серрехон, Колумбия; технозёмы сухого леса возрастом 7, 10 и 21 год       | С возрастом улучшались физические, химические и биологические свойства; мелкий опад назван ключевым механизмом; SOM на восстановленных площадках составляло 63–89% от уровня зрелого сухого леса     | Сравниваются три возраста и разные площадки; нарушения обращены лишь частично; это та же программа восстановления, что и CASE-018, поэтому не независимый проект; компост и навоз не испытывались                        | <a href="https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00652">https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00652</a>     | —; открытая авторская PDF-копия проверена через браузер | Принят как комплексный долгосрочный случай угольного объекта |
| CASE-020      | Šourková, Frouz & Šantrůčková (2005), <i>Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining</i> | рецензируемый хроноряд по 19 площадкам | Соколовский буроугольный район, Чехия; ольховые древостои возрастом 4–65 лет | С и N быстро накапливались в первые 15–20 лет; к 30–40 годам верхние органические горизонты приблизились к полуестественному ольховому лесу; вероятными механизмами были фиксация N и качество опада | Минеральные горизонты и запасы по всему профилю всё ещё отставали; площадки и материалы различались — третичная глина или гравийно-песчаная смесь; это не продольный опыт; посадка ольхи не является универсальной целью | <a href="https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.001">https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.001</a> | —                                                       | Принят как долгосрочный случай почвообразования              |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                         | Тип                                      | Объект/география                                                                           | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                               | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                     | URL/DOI                                                                                                                                                                                               | Локальная копия | Статус                                            |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| CASE-021      | Pihlap et al. (2019), <i>Initial soil formation in an agriculturally reclaimed open-cast mining area</i>                                                         | рецензируемый хроноряд с повторностями   | буроугольный разрез Гарцвайлер, Германия; лёссовые поля возрастом 0, 1, 3, 6, 12 и 24 года | Исходный материал с CaCO <sub>3</sub> сильно определял агрегацию; люцерна уменьшала микробное ограничение по N; макропористость и связность пор выросли только после внесения компоста и вспашки; растительные остатки не поддерживали высокий SOC                                             | Сельскохозяйственный восстановленный лёсс существенно отличается от каменистой или пиритсодержащей угольной породы; эффект компоста связан с последовательностью управления; хроноряд не является повторным наблюдением одной деланки | <a href="https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.023">https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.023</a>                                                                                                 | —               | Принят как случай физико-биологического механизма |
| CASE-022      | Hüttl & Weber (2001), <i>Forest ecosystem development in post-mining landscapes: a case study of the Lusatian lignite district; и chronosequence water study</i> | рецензируемый синтез и полевые хроноряды | кислые сернистые почвы буроугольных разработок; Лужица, Германия; до 35–37 лет             | Активность почвенных организмов могла приблизиться к региональным уровням недобычных земель за 20–30 лет, но окисление пирита продолжало определять химический состав; в дубовом хроноряде выщелачивание Fe, Al, Mn, Ca, Mg, NH <sub>4</sub> и SO <sub>4</sub> снижалось в течение десятилетий | Сходство наземной растительности не означает одинаковую почву; буроугольный C способен имитировать часть функций SOM; древостои, виды и история почвенных добавок различались                                                         | <a href="https://doi.org/10.1007/s001140100241">https://doi.org/10.1007/s001140100241</a> ; <a href="https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00102-X">https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00102-X</a> | —               | Принят как инженерно-геохимическое ограничение    |



| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                      | Тип                                              | Объект/география                                                                                                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                             | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                     | URL/DOI                                                                                                 | Локальная копия | Статус                                                       |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|
| CASE-023      | Mustafa et al. (2023), <i>Soil carbon storage in unreclaimed post mining sites estimated by a chronosequence approach and comparison with historical data</i> | рецензируемый хроноряд с повторным обследованием | самопроизвольно развивающиеся угольные отвалы Соколова, Чехия; 16–56 лет, повторное обследование примерно через 15 лет | Средняя фактическая прибавка почвенного С при повторной съёмке составляла около 0,50 т С/га/год; старшие площадки поддерживали сукцессию широколиственных видов без формальной рекультивации | Высокая вариабельность и отсутствие простого возрастного тренда по приросту отдельных площадок; 2–10% ископаемого С в субстрате усложняют измерение; результат не оправдывает бездействие на опасной отвальной породе | <a href="https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106664">https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106664</a> | —               | Принят как редкий случай хроноряда с повторным обследованием |

| Идентификатор | Источник                                                                                                         | Тип                                                      | Объект/география                                             | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                               | Локальная копия                                                    | Статус                                                                         |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-024      | Haagner, Abraha & van Wyk (2025), <i>Benchmarking rehabilitation in the South African opencast coal industry</i> | 24-летняя стандартизированная база наблюдательных оценок | 299 оценок на 48 открытых угольных разработках; Южная Африка | Способность земель и потери почвы часто соответствовали пороговым значениям, но форма ландшафта, состав видов и особенно плодородие почвы ограничивали результативность; недостаточное последующее обслуживание сопровождалось сорняками и инвазивными видами, плохо спроектированные валы — эрозией; обслуживание могло требоваться не менее пяти лет | Это не рандомизированный опыт и не сравнение органических добавок; данные агрегированы по отрасли, а авторство связано с подрядчиком; оценка управления не доказывает автономность почвы | <a href="https://doi.org/10.17159/2411-9717/792/2025">https://doi.org/10.17159/2411-9717/792/2025</a> | <a href="#">papers/CASE-024_South_Africa_2025_benchmarking.pdf</a> | Принят как доказательство производственных неудач и потребности в обслуживании |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                          | Тип                                                                    | Объект/география                                                                                              | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                             | URL/DOI                                                                                               | Локальная копия                                                       | Статус                                                                  |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| CASE-025      | Zhang et al. (2020), <i>Response of soil organic carbon fractions to exogenous carbon input in mine reclamation</i>                               | 5-летнее полевое сравнение с повторностями на фиксированных площадках  | восстановленная пашня в зоне проседания угольной разработки; Сяньюань, Шаньси, Китай                          | При одинаковом поступлении 2,7 т С/га сравнили биоуголь 8,3, компост 11,0, остаток биогаза 7,7, навоз крупного рогатого скота 8,0 и кукурузную солому 6,7 т/га; биоуголь сильнее повысил показатели общего и стабильного С, компост — легкоокисляемый С, навоз — лабильные пулы | Оценивались только фракции С в слое 0–20 см; вода, соли, загрязнители, растительное сообщество и зависимость от вмешательств не оценены; одинаковое поступление С не означает одинаковую дозу питательных веществ или одинаковое воздействие на pH; целью была сельскохозяйственн ая кукуруза | <a href="https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjca.190925">https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjca.190925</a> | <a href="#">papers/CASE-025_Zhang_2020_exogenous_carbon_China.pdf</a> | Ключевое прямое сравнение материалов, но с узким показателем результата |
| CASE-026      | Li et al. (2021), <i>Effects of Seven-Year Fertilization Reclamation on Bacterial Community in a Coal Mining Subsidence Area in Shanxi, China</i> | 7-летний полевой опыт по рандомизированной полной блочной схеме (RCBD) | уплотнённые сельскохозяйственн ые земли в зоне проседания угольной разработки, Луань, Шаньси, Китай; кукуруза | Контроль, химическое удобрение и разложившийся куриный помёт 12 т/га; три повторности, делянки по 100 м²; навоз повысил SOM и доступный N и изменил богатство и состав бактерий                                                                                                 | Бактериальное сообщество по-прежнему отличалось от соседней пашни; навоз мог переносить металлы и остатки антибиотиков; это система удобрения культуры, а не автономная экосистема; отсутствуют показатели воды, грибов и почвенной фауны                                                     | <a href="https://doi.org/10.3390/ijerph182312504">https://doi.org/10.3390/ijerph182312504</a>         | <a href="#">papers/CASE-026_Li_2021_7y_manure_China.pdf</a>           | Принят как повторённое доказательство влияния навоза на микробиом       |

| Идентификатор | Источник                                                                                                  | Тип                                          | Объект/география                                                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                                              | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                         | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус                                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|
| CASE-027      | Placek-Lapaj et al. (2019), <i>Post-mining soil as carbon storehouse under Polish conditions</i>          | полевой опыт с материалами и фиторемедиацией | внешний отвал вскрыши Бельхатовского бурогоугольного разреза, Польша   | Осадок сточных вод или компост вместе с озёрным мелом увеличивали сообщённый запас SOC и C растений у сосны обыкновенной и <i>Miscanthus</i> ; наибольший SOC сообщён при 33 Мг/га осадка и 45 Мг/га компоста | Работа сосредоточена на запасе C; вода, загрязнители и автономность не установлены; осадок замедлял рост сосны, что согласуется с быстрым высвобождением питательных веществ или фитотоксичностью; точные длительность и повторность требуют сверки таблиц полного текста | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.005">https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.005</a> | —               | Принят предварительно; смешанный результат и фитотоксичность |
| CASE-028      | Mukhopadhyay et al. (2015), <i>Soil development in 2–21 years old coalmine reclaimed spoil with trees</i> | хроноряд                                     | угольный разрез Сонепур-Базари, Ранигандж, Индия; 2, 5, 9, 15 и 21 год | Органические C/N, обменные катионы/СЕС, влажность, микробная активность/МВС и богатство местных видов росли по возрастному ряду искусственного/естественного восстановления                                   | Сравниваются разные площадки и истории вмешательств; хроноряд не изолирует влияние возраста; измерение угольного C требует методического контроля; прямого сравнения органических материалов нет                                                                          | <a href="https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.043">https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.043</a> | —               | Принят как интегрированная траектория, но не причинный опыт  |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                      | Тип                                                               | Объект/география                                                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                 | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                   | URL/DOI                                                                                                                 | Локальная копия                                                | Статус                                                  |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| CASE-029      | ACARP C28035 (2023), <i>Topsoil Deficits in Site Rehabilitation: Accelerated Transformation of Spoils to Functional Soils</i> | официальная сводка проекта; 12-месячные полевой и тепличный опыты | угольная вскрыша бассейна Боуэн, Квинсленд, Австралия                  | Компост, вермижидкость и высушенный навоз повышали раннюю активность ферментов относительно гипса + мульчи, но устойчивого улучшения в пределах проекта не наблюдалось; определяющими оставались pH, ЕС, солонцеватость и низкое содержание OM; рост ограничивала вода           | Только 12 месяцев/сезонные данные; доступна сводка страницы проекта, а не полный отчёт; «долгосрочный» здесь означает сохранение эффекта внутри короткого опыта, а не годы; варианта с животными не было            | <a href="https://www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repId=C28035">https://www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repId=C28035</a> | —                                                              | Ключевой краткосрочный контрпример отсутствия стойкости |
| CASE-030      | Misebo et al. (2026), <i>Effects of afforestation on Technosol properties in reclaimed hard coal deep mining spoil heaps</i>  | поперечное полевое сравнение 30 площадок                          | отвал каменного угля Сосница, Верхняя Силезия, Польша; около 20–25 лет | Сукцессия на голой породе, на слое верхней почвы около 50 см и на засаженной почве различалась по пористости, удержанию воды, питательным элементам и фракциям C; в засаженном верхнем слое было больше окклюдированного и минерально-связанного C, хотя общий SOC не различался | Это не исторически рандомизированный опыт; варианты смешивают влияние верхнего слоя, посадки и истории площадки; вычитание геогенного C предполагает сопоставимую исходную вскрышу; биология и стоимость не оценены | <a href="https://doi.org/10.1038/s41598-026-37992-z">https://doi.org/10.1038/s41598-026-37992-z</a>                     | <a href="#">papers/CASE-030_Misebo_2026_Sosnica_Poland.pdf</a> | Принят с оговоркой по дизайну                           |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                                                       | Тип                                                          | Объект/география                                                                                     | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                             | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                       | URL/DOI                                                                                                       | Локальная копия                                                       | Статус                                                                                         |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-031      | Leal et al. (2015), <i>Organic Matter Fractions and Quality of the Surface Layer of a Constructed and Vegetated Soil After Coal Mining. I — Humic Substances and Chemical Characterization</i> | шестилетний рандомизированный блочный полевой опыт           | сконструированный верхний слой над открытым угольным разрезом, Кандиота, Риу-Гранди-ду-Сул, Бразилия | Четыре многолетние травы, четыре повторности, делянки по 20 м <sup>2</sup> ; покровные культуры частично увеличили ТОС и несколько фракций по сравнению с голой сконструированной почвой, а <i>Hemarthria/Urochloa</i> дали большой запас С гуминовых кислот | Все делянки получили исходные извесь и NPK и ежегодно 40 кг N/га; естественная и голая площадки находились вне рандомизированного опыта; отбирался только слой 0–3 см; через шесть лет общий С оставался значительно ниже естественной почвы, а травяные варианты чаще всего не различались по общему С | <a href="https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140783">https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140783</a>         | <a href="#">papers/CASE-031_Leal_2015_Candiota_grasses_carbon.pdf</a> | Принят как бразильская траектория угольной почвы, но не доказательство органического материала |
| CASE-032      | Longo, Ribeiro & de Melo (2011), <i>Use of green fertilizing in the recovery of soils degraded by mining in the amazon forest</i>                                                              | 15-месячный факторный рандомизированный блочный полевой опыт | кислые песчаные касситеритовые хвосты, национальный лес Жамари, Рондония, Бразилия                   | Шесть вариантов растительного покрова, четыре режима внесения и шесть повторностей — 144 делянки на 1,5 га; компост состоял из опилок и коровьего навоза в соотношении 3:1; извесь, органика и удобрение изменили химическое плодородие                      | Это не угольные хвосты; через 15 месяцев значимых различий по измеренным ОМ или физическим свойствам не было; интенсивное внесение не создало быстро почвенную структуру или биологию; короткая длительность и смешанные компоненты ограничивают атрибуцию                                              | <a href="https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100020">https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100020</a> | <a href="#">papers/CASE-032_Longo_2011_Jamari_compost.pdf</a>         | Принят как ранний контрпример отсутствия ответа с повторностями                                |

| Идентификатор | Источник                                                                                        | Тип                                                                                  | Объект/география                                                                                                                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | URL/DOI                                                                            | Локальная копия                                                                       | Статус                                                                                                               |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-033      | Barrett (1992),<br><i>Colliery Spoil Reclamation: An Appraisal of Two Sites in West Lothian</i> | диссертация;<br>долгосрочный<br>повторный отбор и<br>старые делянки с<br>материалами | пиритсодержащая<br>угольная порода<br>Фулшилс и Баадс,<br>Шотландия; работы<br>с 1970-х, повторное<br>обследование 1990–<br>1991 годов | На делянках Баадс<br>1978 года<br>сравнивали торф,<br>осадок сточных вод,<br>выветренный<br>куриный помёт,<br>Alginure и 0, 10, 25 и<br>50 т извести на<br>гектар; примерно<br>через десять лет 50<br>т/га извести всё ещё<br>контролировали<br>кислотность на<br>большинстве<br>делянок; в Фулшилс<br>также оценивали<br>воду и металлы | Сохранившиеся<br>делянки редки и<br>несбалансированы,<br>есть смешение<br>экспозиции и<br>притока; осадок не<br>анализировался до<br>использования;<br>варианты только с<br>органикой обычно<br>оставались голыми<br>и считались<br>требующими<br>повторного<br>внесения, но<br>точный<br>относительный<br>ранг нельзя считать<br>причинным | <a href="https://theses.gla.ac.uk/75629/">https://theses.gla.ac.uk/<br/>75629/</a> | <a href="#">papers/CASE-<br/>033_Barrett_1992<br/>_West_Lothian_co<br/>lliery.pdf</a> | Принят как редкое<br>долгосрочное<br>свидетельство<br>неудачи и<br>необходимости<br>обслуживания в<br>Великобритании |



| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                                                            | Тип                                               | Объект/география                                  | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | URL/DOI                                                                               | Локальная копия | Статус                                                                                 |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-034      | Santibáñez & Ginocchio (2012), <i>Potential Use of Organic- and Hard-Rock Mine Wastes on Aided Phytostabilization of Large-Scale Mine Tailings under Semiarid Mediterranean Climatic Conditions</i> | трёхлетний рандомизированный блочный полевой опыт | медные хвосты Ла-Косинера, Кокимбо, Чили; 2400 м² | Тринадцать вариантов, три повторности, делянки по 25 м²; козий навоз, осадки сточных вод, виноградные и оливковые остатки и смеси заделывали на 20 см. Осадки сточных вод и виноградные остатки дали наибольшую позднюю биомассу; измерялись химические и микробные реакции и Cu в поровой воде | Это не уголь; полив продолжался три сезона становления; большинство показателей плодородия и SOC со временем снижались; ранняя реакция на осадки сточных вод включала экстремальные импульсы DOC и Cu и почти нулевую биомассу первого года, а оливковые остатки не сработали; авторы прямо указывают, что автономность не доказана | <a href="https://doi.org/10.1155/2012/895817">https://doi.org/10.1155/2012/895817</a> | —               | Ключевой латиноамериканский случай сравнения материалов и неудач; полный HTML проверен |

| Идентификатор | Источник                                                                                                             | Тип                                                                    | Объект/география                                                                                                                    | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                     | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                         | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия                                                     | Статус                                                                                   |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE-035      | Coetzee (2015), <i>Organic Matter Contribution of Ameliorants to Reclaimed Surface Mined Soil and Carbon Storage</i> | однолетний уличный мини-лизиметрический опыт, магистерская диссертация | реконструированный профиль «порода — подпочва — верхний слой» угольного отвала на опытной ферме Университета Претории, Южная Африка | Десять вариантов и четыре повторности; 40 контейнеров; сочетания компостированного коровьего навоза, щепы, скошенной травы, люцерны и золы. Люцерна с навозом и щепой улучшила pH, объёмную плотность, корневую и надземную биомассу и запас C относительно контроля | Контейнеры 1 × 1 × 1,2 м, а не опыт внутри отвала; только одна зимняя и одна летняя культура; дозы 40 или 132 т/га, компоненты в смесях смешаны; качество воды, загрязнители, местное сообщество и стойкость не проверены | <a href="https://repository.up.ac.za/handle/2263/50925">https://repository.up.ac.za/handle/2263/50925</a> | <a href="#">papers/EXP-003_South_Africa_organic_ameliorants.pdf</a> | Принят как контролируемое доказательство механизма, но не долгосрочный полевой результат |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                             | Тип                                                                    | Объект/география                                | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                     | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                                                                         | Локальная копия                                                        | Статус                                                                    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| HYP-001       | Coaltech Research Association / University of Cape Town (2023), <i>Development of Fabricated Soils from South African Coal Waste</i> | официальный итоговый отчёт; контролируемый горшечный опыт с технозёмом | ультратонкие хвосты флотации угля, Южная Африка | 95% хвостов и 5% солодового остатка инокулировали несколькими микробными консорциумами, выдерживали семь дней и засаживали; ЕМ и компостный чай улучшили ранние показатели растений, а чай из местной шахтной почвы — нет; различия микробной биомассы между вариантами в основном сблизились ко второму циклу выращивания | Самый близкий операционный аналог, но это не зрелый компост, не малое добавление донорской почвы, только семь дней предварительной инкубации, теплица вместо поля, без долгосрочной автономности и водных показателей | <a href="https://coaltech.co.za/wp-content/uploads/2023/08/Project-8.4.4-Fabricated-Soils-from-South-African-Coal-Waste-August-2023-1.pdf">https://coaltech.co.za/wp-content/uploads/2023/08/Project-8.4.4-Fabricated-Soils-from-South-African-Coal-Waste-August-2023-1.pdf</a> | <a href="#">papers/HYP-001_Coaltech_2023_fabricated_coal_soils.pdf</a> | Ключевой близкий аналог и контрпример тезису «любая живая почва помогает» |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                      | Тип                                   | Объект/география                                                                      | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                        | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус                                                                                                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HYP-002       | Asemaninejad et al. (2018), <i>Blended pulp mill, forest humus and mine residual material Technosols for mine reclamation</i> | контролируемый опыт в ростовой камере | пять кислых и нейтральных/щелочных твёрдопородных добычных остатков, Северное Онтарио | Следовой объём лесной подстилки — менее 0, 02% сухой массы осадка — использовали как микробный инокулят вместе с остаточным осадком целлюлозного производства; биомасса растений могла возрасть до четырёх раз, а микробные сообщества смещались к гетеротрофным почвоподобным таксонам | Не уголь; нет полного сравнения В/С/Д/Е и В-time; доступный метод не устанавливает отдельный период вторичного созревания; в некоторых обработанных субстратах выросли растворимые Cu/Ni | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.114">https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.114</a> | —               | Ключевой аналог малого инокулята с оговоркой по металлам                                                                                     |
| HYP-003       | Romero-Estonllo et al. (2023), <i>compost plus PGPR/mycorrhiza on Touro mine soil</i>                                         | контролируемый горшечный опыт         | почва и хвосты медного рудника, Испания                                               | Компост в соотношении 1:10 по массе стабилизировали 15 дней до посадки; затем добавляли PGPR, коммерческую микоризу или оба компонента. PGPR улучшили выживание и рост; микориза отдельно и сочетание не дали универсального дополнительного преимущества                               | Инокулят добавлялся при посадке, без последующего вторичного созревания; сам компост был сильным воздействием; горшечный масштаб и неугольный субстрат                                   | <a href="https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1184070">https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1184070</a>       | —               | Принят как близкий аналог прямой микробной инокуляции D, но не прямое совпадение, и как контрпример зависимости эффекта от состава инокулята |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                     | Тип                                                                 | Объект/география                                         | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                     | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                         | URL/DOI                                                                                                 | Локальная копия | Статус                                                                                      |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| HYP-004       | Li, Zeng, Huang & Tan (2026), <i>Enhancing cow manure composting via staged inoculation of functional microbial consortia</i>                                | контролируемый 50-литровый опыт компостирования + горшечный биотест | коровий навоз и рисовая солома, Китай                    | Специфичные для фаз инокуляты добавляли в мезофильную, термофильную фазы, охлаждение и созревание и сравнивали с однократной инокуляцией и неинокулированными контролем; поэтапная инокуляция изменила сукцессию, TN, гумификацию и показатели зрелости и улучшила биотест с пак-чой | Это не донорская почва, не добычный материал и не готовый зрелый компост с последующей второй фазой созревания; 30-дневный процесс и горшечный биотест не устанавливают полевую стойкость | <a href="https://doi.org/10.3389/fmbi.2026.1855343">https://doi.org/10.3389/fmbi.2026.1855343</a>       | —               | Принят как прямое доказательство того, что время инокуляции может влиять на компостирование |
| HYP-005       | de Gannes, Eudoxie & Hickey (2013), <i>Prokaryotic successions and diversity in composts as revealed by 454-pyrosequencing and companion fungal analysis</i> | первичный временной ряд сообщества компоста                         | несколько рецептов компоста и посттермофильных процессов | Бактериальные и грибные сообщества менялись между термофильной фазой, охлаждением и созреванием; рецепт и посттермофильное управление влияли на итоговое сообщество, поддерживая позднее повторное заселение как проверяемый механизм                                                | Не проверяет донорскую почву, восстановление после добычи, становление растений или E против B/C/D и B-time                                                                               | <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079512">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079512</a> | —               | Принят только для механизма времени                                                         |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                  | Тип                                            | Объект/география                                                                                           | Что подтверждает                                                                                                                                                                                           | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                 | URL/DOI                                                                                                         | Локальная копия | Статус                                                           |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| HYP-006       | Danon et al. (2008), <i>Molecular analysis of bacterial community succession during prolonged compost curing</i>                          | первичный временной ряд длительного созревания | коммерчески зрелый компост из осадков сточных вод                                                          | Микробное сообщество, дыхание, DOC и превращения N продолжали меняться после достижения коммерческой зрелости; снижение лабильного C и рост нитрификации показали, что созревание биологически не статично | Нет внешнего инокулята из донорской почвы, добычного субстрата, растений или полевого опыта                                                       | <a href="https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00537.x">https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00537.x</a> | —               | Принят для механизма вторичного созревания                       |
| HYP-007       | Ngo & Cavagnaro (2018), <i>Interactive effects of compost and pre-planting soil moisture on plant growth and mycorrhizal colonisation</i> | факторный горшечный опыт                       | сельскохозяйственная почва с томатом/пшеницей                                                              | Компост и 40-дневные режимы влажности до посадки изменили NH <sub>4</sub> /NO <sub>3</sub> и ответ растений; компост увеличил питательные элементы/биомассу растений, но снизил колонизацию AMF            | Не добычная земля и не предварительная инокуляция донорской почвой; показывает, что дополнительное плодородие способно подавлять желаемый симбиоз | <a href="https://doi.org/10.1038/s41598-017-18780-2">https://doi.org/10.1038/s41598-017-18780-2</a>             | —               | Ключевой аналог неблагоприятного механизма                       |
| HYP-008       | Tkacz et al. (2015), <i>plant-driven selection from natural soil inoculum in sand and compost</i>                                         | контролируемый многопоколенный микрокосм       | автоклавированный песок или коммерческий компост с 10% инокулята естественной почвы и серийным разведением | Принимающая среда и вид растения сильно отбирали сообщество; почвенный инокулят мог переносить патоген <i>Olpidium brassicae</i> ; компост не гарантировал микоризацию                                     | Растения вводились немедленно, а не после отдельного созревания; искусственный микрокосм и отсутствие добычного субстрата                         | <a href="https://doi.org/10.1038/smej.2015.41">https://doi.org/10.1038/smej.2015.41</a>                         | —               | Принят для фильтрации принимающей средой и риска биобезопасности |

| Идентификатор | Источник                                                                              | Тип                                                     | Объект/география                                                    | Что подтверждает                                                                                                                                                                  | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                                 | Локальная копия | Статус                                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| НУР-009       | Han et al. (2022), <i>Soil inoculum identity and rate jointly steer restoration</i>   | трёхлетний полевой опыт «доза — ответ» с повторностями  | деградированное пастбище                                            | Два донорских сообщества и слои инокулята 1, 3 и 5 см дали траектории, зависящие от дозы и идентичности; большие количества сильнее приближали систему к донору                   | Дозы примерно равны 10, 30 и 50 л/м² и не являются малым импульсом; это не добычное пастбище; минимальная эффективная экологическая доза не установлена  | <a href="https://doi.org/10.1038/s43705-022-00144-1">https://doi.org/10.1038/s43705-022-00144-1</a>                     | —               | Ключевое доказательство зависимости от донора и дозы                     |
| НУР-010       | SARE ONE22-422 (2022–2023), finished compost inoculated with spent mushroom substrate | завершённый фермерский проект, только лабораторная фаза | зрелый компост + богатый грибами отработанный грибной субстрат, США | В зрелый компост на 14 дней вносили 10%, 25% или 50% инокулята; грибная биомасса и отношение грибы:бактерии росли с дозой; были контроли только с компостом и только с инокулятом | Запланированный полевой этап не завершён; высокие доли инокулята, нет добычного субстрата, результатов для растений или воды; «серая» доказательная база | <a href="https://projects.sare.org/project-reports/one22-422/">https://projects.sare.org/project-reports/one22-422/</a> | —               | Ближайший процедурный аналог, но недостаточное доказательство результата |



| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                                                                   | Тип                                                                                     | Объект/география                                                             | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                                                                                                         | URL/DOI                                                                                 | Локальная копия                                                                            | Статус                                                                                                                                                        |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HYP-011       | Choińska-Pulit et al. (2026), <i>Development and Field Evaluation of a Microbially-Inoculated Feather–Straw–Lignite Compost Material for the Reclamation of Post-Mining Soils</i> , published 14 July 2026 | рецензируемое контролируемое исследование компостирования и односезонная полевая оценка | песчаная постдобычная почва, район Конинского бурoughольного разреза, Польша | Смесь перо:солома:лигнит 20:60:20 инокулировали в начале процесса штаммами <i>Bacillus altitudinis</i> 33, <i>Bacillus methylophilus</i> Alk и <i>Streptomyces fulvissimus</i> K59, затем компостировали 41 день в динамическом реакторе 200 дм³. C:N продукта достигло 12,09, NH4-N — 0,03%; 18,3 т/га внесли в полевой опыт с кукурузой 2025 года. Относительно невнесённой делянки уреазы достигла 3,91 UU, P2O5 — 3,4 г/кг, средняя высота побегов — 30,23 против 25,88 см (+15%; t(645) = 6,63, p < 0,001) | Инокуляция проведена в начале, а не после термофильного созревания; в поле были одна обработанная и одна необработанная делянка, не было контроля с тем же зрелым неинокулированным компостом, рандомизированных полевых повторностей, многолетнего наблюдения, фильтрата, стойкости микробиома или проверки автономности | <a href="https://doi.org/10.3390/ma19143035">https://doi.org/10.3390/ma19143035</a>     | — (полный открытый HTML проверен; локальный PDF не загружен из-за недоступности DNS хоста) | Самый близкий аналог полевого применения, но не отвечает на сравнение В с Е-подобным предварительно инокулированным материалом и не различает системы В/С/Д/Е |
| FAIL-001      | Paper mill sludge runoff study (2008)                                                                                                                                                                      | первичный полевой опыт                                                                  | поверхностная угольная разработка; США                                       | Дозы 224 и 672 сухих Мг/га резко снизили поверхностный сток и эрозию                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | При высокой дозе до посадки DO в стоке был не выше 0,4 мг/л, а COD резко вырос: физическая польза не равна безопасности воды                                                                                                                                                                                              | <a href="https://doi.org/10.2134/jeq2007.0648">https://doi.org/10.2134/jeq2007.0648</a> | —                                                                                          | Ключевой контрпример                                                                                                                                          |

| Идентификатор | Источник                                                                                                      | Тип                                               | Объект/география                                             | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                          | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                   | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия | Статус               |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|
| FAIL-002      | Branzini et al. (2014), compost/biochar and As                                                                | первичный горшечный опыт                          | загрязнённая почва добычного объекта                         | Компост снижал растворимость ряда металлов                                                                                                                                                                                                | Компост сильнее всего увеличил растворимость неорганического As; требуется полевой опыт                                                             | <a href="https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.026">https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.026</a>   | —               | Ключевой контрпример |
| FAIL-003      | Element budgets at two afforested mine sites (2001)                                                           | двухлетний полевой мониторинг почвенного раствора | пиритсодержащая и беспиритовая буроугольная отвальная порода | Наглядно показывает зависимость эффекта от субстрата                                                                                                                                                                                      | На пиритсодержащем участке окисление давало потоки до 6 т Fe/га/год и 14 т сульфатной S/га/год: почвенные добавки не отменяли геохимию              | <a href="https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00143-9">https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00143-9</a> | —               | Ключевой контрпример |
| FAIL-004      | Stehouwer et al. (2006), <i>Nutrient and Trace Element Leaching following Mine Reclamation with Biosolids</i> | трёхлетний полевой мониторинг воды                | земля угольной разработки; Пенсильвания, США                 | При 134 Мг/га осадков сточных вод с низким C:N максимум NO <sub>3</sub> в фильтрате достигал примерно 300 мг/л; расчётная потеря неорганического N за первые два года — 2327 кг N/га; одновременно мобилизовались Al, Mn, Cu, Ni, Pb и Zn | Один участок и высокая разрешённая тогда доза не задают универсальный запрет, но показывают необходимость дозирования по N и C:N и мониторинга воды | <a href="https://doi.org/10.2134/eq2005.0134">https://doi.org/10.2134/eq2005.0134</a>                     | —               | Ключевой контрпример |

| Идентификатор | Источник                                                                                                       | Тип                                      | Объект/география                              | Что подтверждает                                                                                                                                                                                        | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                            | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                                                         | Локальная копия | Статус                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| FAIL-005      | Dere et al. (2012), <i>Nutrient leaching and soil retention in mined land reclaimed with stabilized manure</i> | трёхлетний полевой опыт                  | заброшенная угольная земля, Пенсильвания, США | В вариантах с компостом вымылось менее 1% внесённого N; смесь свежего птичьего навоза с осадком целлюлозно-бумажного производства при C:N 29 потеряла 393 кг N/га за три года, при C:N 20 — 107 кг N/га | Это птичий навоз и конкретная целлюлозно-бумажная смесь; результат нельзя переносить на козий, овечий, коровий или конский навоз без анализа | <a href="https://doi.org/10.2134/jeq2012.0036">https://doi.org/10.2134/jeq2012.0036</a>                                                                                                                                                                         | —               | Ключевой сравнительный случай         |
| SAN-001       | US EPA (2025), Draft PFOA/PFOS Risk Assessment for Sewage Sludge                                               | официальный проект оценки риска          | осадки сточных вод; США                       | В ряде сценариев моделируемый риск превышал пороги уже при 1 ppb PFOA/PFOS; риск зависит от дозы, места и пути воздействия                                                                              | Проект не является окончательным регулированием и не описывает все PFAS                                                                      | <a href="https://www.epa.gov/bio-solids/draft-sewage-sludge-risk-assessment-perfluorooctanoic-acid-pfoa-and-perfluorooctane">https://www.epa.gov/bio-solids/draft-sewage-sludge-risk-assessment-perfluorooctanoic-acid-pfoa-and-perfluorooctane</a>             | —               | Обязательный источник по безопасности |
| SAN-002       | US EPA OIG (2018), <i>unregulated pollutants in biosolids</i>                                                  | независимый аудит регулятора             | осадки сточных вод; США                       | EPA идентифицировало 352 загрязнителя, но для многих не смогло провести оценку; среди них фармацевтические вещества, стероиды и антипирены                                                              | Обнаружение не равно доказанному вреду каждого вещества                                                                                      | <a href="https://www.epa.gov/off-ice-inspector-general/report-epa-unable-assess-impact-hundreds-unregulated-pollutants-land">https://www.epa.gov/off-ice-inspector-general/report-epa-unable-assess-impact-hundreds-unregulated-pollutants-land</a>             | —               | Принят                                |
| SAN-003       | EU JRC, phosphorus loop                                                                                        | официальный научно-политический материал | Европейский союз                              | Р можно извлекать из сточных вод, осадков и золы; очистка конечного продукта отличается от внесения всего осадка                                                                                        | Технологическая возможность не доказывает экономику конкретного города                                                                       | <a href="https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities/circular-resource-management/closing-phosphorus-loop_en">https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities/circular-resource-management/closing-phosphorus-loop_en</a> | —               | Принят                                |

| Идентификатор | Источник                                                      | Тип                                                       | Объект/география                            | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                 | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                 | URL/DOI                                                                                                                                                 | Локальная копия                                                | Статус                                |
|---------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| SAN-004       | Huygens et al. / JRC (2022), sewage sludge risk               | официальный научный отчёт по предварительной оценке риска | Европейский союз                            | Осадки несут питательные элементы, но также стойкие органические загрязнители, микропластик, гены устойчивости к противомикробным препаратам и патогены; внесение на землю и другие пути восстановления требуют отдельной оценки | Предварительная оценка не означает одинаковый риск каждой партии; обнаружение генов устойчивости или химических веществ не равно автоматически доказанному ущербу | <a href="https://doi.org/10.2760/541579">https://doi.org/10.2760/541579</a>                                                                             | <a href="#">papers/SAN-004_JRC_2022_sewage_sludge_risk.pdf</a> | Обязательный источник по безопасности |
| REG-001       | EU Regulation 2021/2086 on precipitated phosphate salts       | нормативный акт                                           | Европейский союз                            | Струвит допускается при ограниченном составе сырья, заданных процессах и контроле качества; смешанные муниципальные отходы исключаются                                                                                           | Не является разрешением на любой осадок или струвит любого качества                                                                                               | <a href="https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32021R2086">https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32021R2086</a> | —                                                              | Принят                                |
| PAP-001       | Goossen et al. (2023), PFAS from compostable food serviceware | первичное исследование                                    | коммерческое компостирование; штат Мэн, США | Компост с «компостируемой» посудой содержал значительно больше PFAS, чем отдельно собранные пищевые отходы с травой и подстилкой                                                                                                 | Три партии компоста не дают универсальной оценки всей упаковки                                                                                                    | <a href="https://doi.org/10.1116/6.0002746">https://doi.org/10.1116/6.0002746</a>                                                                       | —                                                              | Ключевой контрпример                  |

| Идентификатор | Источник                                                           | Тип                                              | Объект/география                                                                                                    | Что подтверждает                                                                                                                                                           | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                      | URL/DOI                                                                                                                                                         | Локальная копия | Статус                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|
| PAP-002       | Li et al. (1997), papermill sludge on coal refuse                  | полевое исследование                             | угольные отходы, США                                                                                                | Осадок целлюлозно-бумажного производства действительно применялся как почвенная добавка                                                                                    | Требуется восстановить полный состав, дозы и долговременные показатели воды                                                                                            | <a href="https://www.asrs.us/Publications/Conference-Proceedings/1997/0277-Li.pdf">https://www.asrs.us/Publications/Conference-Proceedings/1997/0277-Li.pdf</a> | —               | На проверке                                            |
| PAP-003       | Shipitalo & Bonta (2008), paper-mill sludge runoff                 | 13-месячный полевой опыт по поверхностному стоку | недавняя поверхностная угольная разработка; Огайо, США                                                              | Осадок состоял из целлюлозных волокон, глины и извести; дозы 224 и 672 сухих Мг/га уменьшили поверхностный сток в 4–6 раз и эрозию с 47 до менее 1 Мг/га                   | До посадки DO в стоке был не выше 0,4 против 8,2 мг/л, а COD — 7229 против 880 мг/л при высокой дозе; исследован один поток целлюлозного производства, а не вся бумага | <a href="https://doi.org/10.2134/eq2007.0648">https://doi.org/10.2134/eq2007.0648</a>                                                                           | —               | Ключевой двусторонний случай                           |
| PAP-004       | Choi et al. (2019), PFAA in municipal organic solid waste composts | первичное аналитическое исследование             | девять коммерческих компостов из органической фракции твёрдых коммунальных отходов и один приусадебный компост; США | Компосты, принимавшие пищевую упаковку, имели общую нагрузку PFAA 28,7–75,9 мкг/кг против 2,38–7,60 мкг/кг без упаковки; разделение упаковки и исходного сырья существенно | Небольшая выборка, не применение на добычном объекте и не оценка риска для каждого PFAS                                                                                | <a href="https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00280">https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00280</a>                                                           | —               | Ключевой довод не смешивать пищевые остатки и упаковку |

| Идентификатор | Источник                                                                           | Тип                                                  | Объект/география                        | Что подтверждает                                                                                                                                    | Что не подтверждает / ограничение                                                                        | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Локальная копия | Статус                        |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| PAP-005       | Kotthoff et al. (2022), PFAS screening of impregnated paper and contaminated soils | первичная целевая и нецелевая предварительная оценка | пропитанная бумага и загрязнённые почвы | Закономерности PFAS поддерживали гипотезу связи загрязнённой почвы с бумажными отходами и осадками, обработанными PFAS                              | Исторический случай загрязнения, а не оценка всей чистой бумаги и картона                                | <a href="https://doi.org/10.1007/s11356-021-17698-1">https://doi.org/10.1007/s11356-021-17698-1</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | —               | Принят с узкой границей       |
| ECO-001       | Reclamation of sulphide tailings with MSW compost                                  | технический экономический отчёт                      | Эллиот-Лейк, Канада                     | Показывает, что при перевозке примерно на 600 км транспорт стоил ориентировочно 30–46 долларов США за тонну и создавал большой транспортный поток   | Исторические цены нельзя переносить в современный Кузбасс без индексации и местных данных                | <a href="https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2251a.pdf">https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2251a.pdf</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | —               | Принят как структура расчёта  |
| ECO-002       | BIOSALIX                                                                           | официальный итог демонстрационного проекта           | угольный разрез; Альберта, Канада       | Проект стоимостью 15,8 млн канадских долларов испытал осадки сточных вод, древесную щепу и иву; сообщено снижение потребности в объёме почвы на 29% | Проверка концепции столкнулась с проблемой коммерческого масштаба; сайт проекта не заменяет полный отчёт | <a href="https://www.eralberta.ca/projects/details/biosalix-mine-reclamation-using-and-organic-residuals-to-augment-soil-quality-and-underpin-a-cleantech-economy-through-short-rotation-willow-feedstock-production/">https://www.eralberta.ca/projects/details/biosalix-mine-reclamation-using-and-organic-residuals-to-augment-soil-quality-and-underpin-a-cleantech-economy-through-short-rotation-willow-feedstock-production/</a> | —               | Приоритетный случай экономики |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                  | Тип                                            | Объект/география                                                                                                                                                                                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                         | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Локальная копия            | Статус                                                                                                    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ECO-003       | Сергей Николаевич (26 сентября 2026), сценарная модель сложного старого угольного отвала площадью 100 га апанасского типа | авторская расчётная модель, а не смета объекта | условный старый угольный отвал площадью 100 га: опасные процессы, земляные работы, минеральная корневая зона, органическая и биологическая стадия, растительность, труд, 20-летний мониторинг и резерв | Задаёт центральный округлённый сценарий 800 млн ₽, диапазоны 400–500 млн ₽ и 1,3–1,8 млрд ₽, структуру затрат, условные 32,3 млн м³ отвальной породы и коэффициент вскрыши 6,1–11,5 м³/т; арифметический пересчёт по курсу ECO-004 даёт 1,8–3,4 доллара США за тонну для центрального и 2,9–7,6 доллара США за тонну для тяжёлого сценария | Не является сметой Апанаса, рыночной ценой, полной экологической ценой угля или инженерным проектом конкретной площадки; диапазон коэффициента вскрыши обосновывается отдельными записями ECO-005–ECO-007 | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | SCENARIO_ECONOMIC_MODEL.md | Принят как предоставленный автором сценарий; итоговая арифметика на тонну приведена в основном тексте PDF |
| ECO-004       | Банк России, официальный курс доллара США на 26 сентября 2026 года                                                        | официальная валютная база                      | пересчёт RUB/USD для сценарной модели ECO-003                                                                                                                                                          | Фиксирует 1 USD = 84,3414 RUB на дату модели и позволяет воспроизводимо перевести рублёвые сценарии в доллары США                                                                                                                                                                                                                          | Валютный пересчёт не превращает сценарные допущения в наблюдавшиеся рыночные затраты                                                                                                                      | <a href="https://www.cbr.ru/currency_base/dynamics/?UniDbQuery.From=01.01.2022&amp;UniDbQuery.Posted=True&amp;UniDbQuery.VAL_NM_RQ=R01235&amp;UniDbQuery.mode=1&amp;UniDbQuery.so=1">https://www.cbr.ru/currency_base/dynamics/?UniDbQuery.From=01.01.2022&amp;UniDbQuery.Posted=True&amp;UniDbQuery.VAL_NM_RQ=R01235&amp;UniDbQuery.mode=1&amp;UniDbQuery.so=1</a> | —                          | Официальный источник курса; проверен точечным поиском 26 сентября 2026 года                               |
| KUZ-001       | Bragina et al. (2014), soils on overburden dumps in Kuzbass                                                               | первичная научная статья                       | лесостепь и горная тайга Кузбасса                                                                                                                                                                      | Сравнивает почвы/породы, микроэлементы и влияние самовозгорания                                                                                                                                                                                                                                                                            | Хроносерия не равна повторному мониторингу одного участка                                                                                                                                                 | <a href="https://doi.org/10.1134/S1064229314050032">https://doi.org/10.1134/S1064229314050032</a>                                                                                                                                                                                                                                                                   | —                          | Приоритетный кейс                                                                                         |



| Идентификатор | Источник                                                                                                        | Тип                              | Объект/география                               | Что подтверждает                                                                                                                                                    | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                  | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Локальная копия                                                         | Статус            |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| KUZ-002       | Gorozhanina et al. (2023), forest vegetation on dumps of different ages                                         | 20-летний ряд полевых наблюдений | Кузнецкий бассейн                              | Топография, плотность субстрата и возраст связаны с разными траекториями лесной растительности                                                                      | Лесная структура не является полной оценкой почвенной функции                                                                      | <a href="https://doi.org/10.1002/ece3.10276">https://doi.org/10.1002/ece3.10276</a>                                                                                                                                                                                                                                                       | —                                                                       | Приоритетный кейс |
| KUZ-003       | Куприянов, Манаков (2016), «Закономерности восстановления растительного покрова на отвалах Кузбасса»            | первичное полевое исследование   | Кузбасс                                        | Выделены восемь техногенных экотопов; сукцессия определяется условиями участка, не календарным возрастом как таковым                                                | Не испытание городских органических потоков                                                                                        | <a href="https://doi.org/10.15372/SJFS20160205">https://doi.org/10.15372/SJFS20160205</a>                                                                                                                                                                                                                                                 | papers/KUZ-003_Sheremet_2016_Kuzbass_vegetation.pdf                     | Приоритетный кейс |
| KUZ-004       | Problems of mine-technical reclamation for stable forest stands                                                 | первичная статья                 | 25–45-летние отвалы Кузбасса                   | Показывает неоднородность потенциально плодородных пород, потери качества при снятии/хранении/нанесении и роль гранулометрии                                        | Наличие нанесённого слоя не доказывает устойчивый лес                                                                              | <a href="https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-gornotekhnicheskogo-etapa-rekultivatsii-otvalov-kuzbassa-v-aspekte-formirovaniya-ustoychivyh-drevesnyh-nasazhdeniy">https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-gornotekhnicheskogo-etapa-rekultivatsii-otvalov-kuzbassa-v-aspekte-formirovaniya-ustoychivyh-drevesnyh-nasazhdeniy</a> | —                                                                       | Приоритетный кейс |
| KUZ-005       | Шипилова, Семина (2016), «Особенности физических свойств почв техногенных ландшафтов лесостепной зоны Кузбасса» | первичное полевое исследование   | двадцатилетние отвалы Бачатского месторождения | Сравнивает технозем, четыре типа эмбриоземов и зональный чернозём; показывает сильную каменистость, неоднородность плотности и порозности и роль технологии отсыпки | Пространственное сравнение участков не является повторным мониторингом одной траектории; возраст сам по себе не объясняет различия | <a href="https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-25-28">https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-25-28</a>                                                                                                                                                                                                                             | papers/KUZ-005_Shipilova_Semina_2016_Bachat sky_physical_properties.pdf | Принят            |

| Идентификатор | Источник                                                                                               | Тип                                                    | Объект/география                                           | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                   | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                                    | URL/DOI                                                                                                                                                           | Локальная копия                                                                   | Статус                        |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| KUZ-006       | Куприянов et al. (2025), «Восстановление степей на отвалах»                                            | научная монография с многолетним полевым экспериментом | Виноградовский разрез и другие отвалы Кузбасса             | Сравнивает голый техногенный элювий, 10-см слой потенциально плодородных суглинков и 10-см плодородный слой почвы при четырёх нормах травяно-семенной смеси и четырёх повторностях; содержит данные 2014/2015–2023                 | Не испытывает городской компост или навоз; часть интерпретаций авторов требует проверки по современным понятиям SOM и единицам таблиц; природоподобная растительность не равна автоматически полной почвенной автономности           | <a href="https://kuzbs.ru/images/stories/pdf/izdania/Rekonstruksiya_na_otvalah.pdf">https://kuzbs.ru/images/stories/pdf/izdania/Rekonstruksiya_na_otvalah.pdf</a> | <a href="#">papers/KUZ-006_Rekonstruktsiya_ekosistem_na_otvalakh_Kuzbassa.pdf</a> | Принят с ограничениями        |
| KUZ-007       | Куприянов et al. (2021), «Реконструкция почвенно-растительного слоя на поверхности отвалов в Кузбассе» | двухлетний полевой опыт                                | разрез «Первомайский» и шахтоуправление «Майское», Кузбасс | 40 см лессовидного суглинка и 20, 40 или 60 см свежего почвенно-растительного слоя; 200 м² на вариант; в 2019–2020 годах отмечено 43–50 видов, средний покров до примерно 80%, меньше рудеральной биомассы, чем при самозарастании | Варианты не имели независимых повторных делянок; десять подвыборок внутри площадки не заменяют повторность; донорский слой снят с лицензированной территории до добычи; два года и биомасса не доказывают долгосрочную функцию почвы | <a href="https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-46-52">https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-46-52</a>                                                     | <a href="#">papers/KUZ-007_Ugol_2021_soil_vegetation_layer.pdf</a>                | Принят с сильным ограничением |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                       | Тип                                             | Объект/география                                            | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                   | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                   | URL/DOI                                                                                       | Локальная копия                                                | Статус                                                                                                      |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KUZ-008       | Протасов, Портола, Серегин (2025), «Влияние сезонных колебаний температуры атмосферы на очаги самовозгорания породных отвалов» | четырёхлетний инструментальный мониторинг       | действующий очаг самовозгорания на породном отвале Кузбасса | На глубинах 0,5–2,5 м температура сохранялась и менялась независимо от сезонной температуры поверхности; максимум достигал 500 °С, а скважины глубиной 2,5 м не определили глубину очага                                           | Один очаг; не сравнивает методы тушения и не означает, что все отвалы горят                                                                                                         | <a href="https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250210">https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250210</a> | papers/KUZ-008_Protasov_2025_spontaneous_combustion.pdf        | Жёсткое основание инженерного допуска: органика исключена до ликвидации очага                               |
| KUZ-009       | Воробьева et al. (2022/2023), «Оценка химических и санитарных показателей грунтов угольных отвалов юга Кузнецкой котловины»    | однократное сравнительное обследование трёх зон | Корчаковский угольный отвал, юг Кузбасса                    | Показало неоднородность pH, влажности, Ва, ферментативной активности, органических загрязнителей и санитарно-бактериологических показателей между зонами 5–30-летнего отвала; отдельные показатели превышали нормативные ориентиры | Зоны различались возрастом, породой и рекультивацией, поэтому это не чистый хроноряд; рекомендация авторов о биопрепаратах не была проверена самим опытом; один сезон и один объект | <a href="https://doi.org/10.23859/estr-220603">https://doi.org/10.23859/estr-220603</a>       | papers/KUZ-009_Vorobieva_2022_chemical_sanitary_indicators.pdf | Принят как доказательство для исходной предварительной оценки, а не как доказательство варианта воздействия |

| Идентификатор | Источник                                                                                                             | Тип                                                                            | Объект/география              | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                             | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                         | URL/DOI                                                                                                                                                                                     | Локальная копия                                                    | Статус                                                   |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| KUZ-010       | Минприроды Кузбасса (2026), доклад о состоянии окружающей среды в 2025 году                                          | официальный региональный доклад                                                | Кемеровская область — Кузбасс | На конец 2025 года учтено 123,634 тыс. га нарушенных земель; за год нарушено 4,620 тыс. га, рекультивировано 1,265 тыс. га; приведён региональный исходный уровень по воде, отходам и землям и перечень текущих исследований | Агрегированные числа не показывают качество восстановления, возраст и тип каждого отвала или причинный эффект технологии                                                                                                  | <a href="https://kuzbassec.ru/docs/klady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/">https://kuzbassec.ru/docs/klady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/</a> | <a href="#">papers/KUZ-010_Kuzbass_environment_report_2025.pdf</a> | Обязательный региональный исходный уровень               |
| FLOW-001      | Газета «Кузбасс» (21 мая 2024), сообщение с экологического форума со ссылкой на министра сельского хозяйства региона | региональная газетная публикация и вторичный пересказ официального выступления | Кемеровская область — Кузбасс | Сообщает порядок величины: не менее 1,7 млн т навоза и помёта в год более чем у 130 хозяйств; 52% приходится на крупный рогатый скот, 35% — на свиней, 12% — на птицу; 580 тыс. т — в Новокузнецком округе                   | Это не первичная статистическая таблица; основа расчёта по влажной или сухой массе, текущее использование, доступный избыток, качество и расстояния до отвалов не установлены; число нельзя принимать как доступную массу | <a href="https://kuzbass85.ru/wp-content/uploads/2024/05/kuzbass-21-maya-2024.pdf">https://kuzbass85.ru/wp-content/uploads/2024/05/kuzbass-21-maya-2024.pdf</a>                             | —                                                                  | Контекст; для баланса массы требуется первичная проверка |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                | Тип                                          | Объект/география                      | Что подтверждает                                                                                                                                            | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                   | URL/DOI                                                                                     | Локальная копия                                                 | Статус                                      |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| EXP-001       | Gann et al. (2019), <i>International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration</i> , 2nd ed.  | международный стандарт практики              | глобально                             | Задаёт референсную экосистему, измеримые характеристики восстановления, мониторинг и различие между восстановлением и простой реабилитацией или озеленением | Стандарт не определяет безопасную дозу почвенной добавки и не доказывает применимость к конкретному отвалу                                                                                          | <a href="https://www.ser.org/page/SERStandards">https://www.ser.org/page/SERStandards</a>   | papers/EXP-001_SER_2019_International_Restoration_Standards.pdf | Принят как система требований к результатам |
| EXP-002       | Laushman et al. (2021), <i>Protocol for Installing and Monitoring a RestoreNet Restoration Field Trial Network Site</i> | официальный воспроизводимый полевой протокол | засушливые деградированные земли, США | Даёт блочную и рандомизированную структуру полевого опыта, стандартизированные измерения делянок, исходный уровень и повторный мониторинг                   | Не предназначен специально для добычных объектов и не испытывает органические почвенные добавки; размеры и повторности нельзя копировать без анализа статистической мощности и ограничений площадки | <a href="https://doi.org/10.3133/tm2A18">https://doi.org/10.3133/tm2A18</a>                 | papers/EXP-002_USGS_RestoreNet_Protocol.pdf                     | Принят как справочник по дизайну опыта      |
| REG-002       | Постановление Правительства РФ № 800 от 10.07.2018, прежние Правила проведения рекультивации и консервации земель       | утративший силу нормативный акт              | Российская Федерация                  | Историческая рамка для проектов, утверждённых до 1 сентября 2025 года, если к ним применимо переходное положение постановления № 781                        | С 1 сентября 2025 года утратил силу; не является текущей исходной нормой для нового проекта                                                                                                         | <a href="https://government.ru/docs/all/117418/">https://government.ru/docs/all/117418/</a> | —                                                               | Только исторический и переходный контекст   |

| Идентификатор | Источник                                                                                                  | Тип                         | Объект/география     | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                                                                             | URL/DOI                                                                                                                             | Локальная копия | Статус                                                                |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| REG-003       | Постановление Правительства РФ № 781 от 29.05.2025, Правила проведения рекультивации и консервации земель | действующий нормативный акт | Российская Федерация | Действует с 1 сентября 2025 до 1 сентября 2031 года; требует проект, целевое качество земель и технические и биологические мероприятия; пункт 9 отдельно регулирует использование некоторых классов отходов и не создаёт общего разрешения для компоста или осадков сточных вод | Не классифицирует автоматически конкретный органический продукт как допустимый; статус отхода или продукта, санитарные требования, экологическая экспертиза и согласование для конкретной площадки требуют отдельного анализа | <a href="https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202505290054">https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202505290054</a> | —               | Текущий правовой исходный уровень; полный правовой путь ещё не закрыт |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                       | Тип                                         | Объект/география                                              | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                         | Локальная копия                             | Статус                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MIC-001       | Dadzie et al. (2024), <i>Inoculating native microorganisms improved soil function and altered the microbial composition of a degraded soil</i> | рецензируемый первичный полевой эксперимент | сильно деградированная постдобычная почва, Пилбара, Австралия | 1 г местной естественной почвы → 25 мл бульона на семь дней → серийный перенос на семь дней → культура в экструдированных гранулах; бактерии увеличили общий N на 75% и SIR на 147%, тогда как бактерии с цианобактериями не улучшили измеренные свойства почвы | Культивируемая фракция, а не весь микробиом; 28 недель; нет носителя из зрелого компоста или данных о долгосрочной стойкости; повторности вариантов объединялись в блоки | <a href="https://doi.org/10.1111/rcc.14025">https://doi.org/10.1111/rcc.14025</a>                               | —; полный авторский текст издателя проверен | Ключевой прямой аналог: малый донор → культивированный инокулят → носитель → постдобычная почва |
| MIC-002       | Wawrik et al. (2005), <i>Effect of Different Carbon Sources on Community Composition of Bacterial Enrichments from Soil</i>                    | рецензируемый первичный опыт обогащения     | четыре почвы, лаборатория                                     | Стандартная культура охватывает малую часть почвенного разнообразия; источник углерода отбирал состав обогащённого сообщества сильнее, чем различия исходных почв                                                                                               | Только бактерии, лаборатория и старый молекулярный метод; показывает смещение отбора, а не результат восстановления                                                      | <a href="https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.6776-6783.2005">https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.6776-6783.2005</a> | —; PubMed/PMC проверены                     | Принят для механизма культивационного смещения                                                  |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                                           | Тип                                              | Объект/география                         | Что подтверждает                                                                                                                                                                                       | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                        | URL/DOI                                                                                                     | Локальная копия        | Статус                                                                                  |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| MIC-003       | Kaminsky et al. (2023), <i>Leveraging microbiome rediversification for the ecological rescue of soil function</i>                                                                  | рецензируемый контролируемый опыт с микрোকосмами | сельскохозяйственные и лесные почвы, США | Добавления цельного сообщества с высоким разнообразием восстановили нитрификацию и связанные таксоны/гены; инокулят с низким разнообразием не сработал; имели значение разведение и соответствие среды | Стерилизованные/повторно заселённые микроекосмы, а не постдобычная почва или поле; одна целевая функция                                  | <a href="https://doi.org/10.1186/s40793-023-00462-4">https://doi.org/10.1186/s40793-023-00462-4</a>         | —; полный PMC проверен | Ключевое доказательство того, что упрощение способно удалить функциональную способность |
| MIC-004       | Douds, Nagahashi & Hepperly (2010), <i>On-farm production of inoculum of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and assessment of diluents of compost for inoculum production</i> | рецензируемый первичный опыт размножения         | фермерское производство AMF, США         | Местный инокулят AMF можно увеличить с растениями-хозяевами в разбавленных средах на основе компоста, уменьшая потребность в массовом изъятии донорской почвы                                          | Сельскохозяйственная система; выход зависит от хозяина, исходных пропагул и субстрата; это не прямой опыт восстановления добычных земель | <a href="https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.071">https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.071</a> | —; PubMed проверен     | Принят как масштабируемый метод для местных AMF                                         |



| Идентификатор | Источник                                                                                                                                         | Тип                                                                             | Объект/география                                                       | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                      | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                               | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия                   | Статус                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| MIC-005       | <i>Inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi in iron ore tailings areas under rehabilitation</i> (2026)                                 | рецензируемый<br>первичный полевой<br>отбор и опыт с<br>ловушечной<br>культурой | восстановление<br>железорудных<br>хвостов Фундау,<br>Мариана, Бразилия | 50 г полевого<br>материала в сосуде<br>объёмом 1000 мл с<br>автоклавированным<br>песком и тремя<br>растениями-<br>хозяевами в<br>течение четырёх<br>месяцев показали<br>размножение AMF<br>при помощи<br>хозяина и<br>позволили оценить<br>восстановление<br>пропагул | Это опыт<br>размножения, а не<br>продукт на гектар<br>или полевое<br>внесение;<br>восстановление<br>AMF оставалось<br>ниже референса и<br>зависело от<br>возраста<br>озеленения | <a href="https://doi.org/10.1590/1413-7054202650014625">https://doi.org/10.1590/1413-7054202650014625</a> | —; полный HTML<br>SciELO проверен | Ключевой аналог<br>масштабирования в<br>добычном<br>контексте            |
| MIC-006       | <i>Soil biological recovery and plant growth under arbuscular mycorrhizal fungi inoculation in iron mining tailings and soil mixtures</i> (2026) | рецензируемый<br>тепличный опыт                                                 | смеси<br>железорудных<br>хвостов/<br>естественной<br>почвы, Бразилия   | Инокуляция<br>спорами AMF<br>увеличила<br>колонизацию<br>корней, но не<br>улучшила<br>активность<br>ферментов или<br>гломалин;<br>последовательные<br>растительные<br>циклы и лабильный<br>органический вход<br>поддержали<br>микробиоту                              | Два 45-дневных<br>цикла кукурузы;<br>смесь естественной<br>почвы и хвостов<br>1:1 ; не зрелый<br>компост и не поле                                                              | <a href="https://doi.org/10.1590/1413-7054202650016325">https://doi.org/10.1590/1413-7054202650016325</a> | —; полный HTML<br>SciELO проверен | Принят как<br>отрицательный/<br>контекстно<br>зависимый<br>результат AMF |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                                   | Тип                                          | Объект/география                   | Что подтверждает                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                     | URL/DOI                                                                                             | Локальная копия                  | Статус                                   |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| MIC-007       | Mallon et al. (2024), <i>Niche availability and competitive loss by facilitation control proliferation of bacterial strains intended for soil microbiome interventions</i> | рецензируемый первичный механистический опыт | бактериальные почвенные инокуляты  | Внесённые штаммы могут не закрепиться не только из-за прямой конкуренции, но и потому, что облегчают рост местных конкурентов; жизнеспособность в культуре не гарантирует закрепления инокулята | Механистическая лабораторная система, не полевой опыт восстановления                  | <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-024-46933-1">https://doi.org/10.1038/s41467-024-46933-1</a> | —; полный PMC проверен           | Принят для механизма риска незакрепления |
| MIC-008       | Crawford, Dice & Clark (2026), <i>Why, when, and how microbes can benefit ecological restorations</i>                                                                      | рецензируемый обзор                          | наземное восстановление, глобально | Сравнивает коммерческие таксоны, консорциумы и цельные почвенные микробиомы; подчёркивает ущерб донорскому участку, совместимость, обращение и необходимость полевой проверки                   | Обзор, а не первичный опыт; использован для карты технологий и поиска первичных работ | <a href="https://doi.org/10.1111/nph.70995">https://doi.org/10.1111/nph.70995</a>                   | —; полный HTML издателя проверен | Принят как источник синтеза и навигации  |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                 | Тип                                                      | Объект/география                 | Что подтверждает                                                                                                                                                                                         | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                               | URL/DOI                                                                                                   | Локальная копия                                     | Статус                                                     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| MIC-009       | <i>Does soil inoculation truly steer the composition of native soil communities?</i> (2026)                                              | рецензируемое первичное полевое исследование             | восстанавливаемое пастбище       | Смещение к донорскому сообществу происходило главным образом в инокулированном слое; находящиеся ниже местные бактерии/нематоды не сближались равномерно, а ответ грибов зависел от происхождения донора | Пастбище, а не добычный субстрат; культивированный инокулят не испытывался                                                                                      | <a href="https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2026.110105">https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2026.110105</a> | —; проверены аннотация/методическая сводка издателя | Принят для ограничения пространственной стойкости          |
| AUTH-001      | Наталья Зубкова, авторская запись о посещении Майминской СЭС зимой 2019 года и предложении использовать овец для контроля растительности | свидетельство участницы и предоставленная автором запись | Майминская СЭС, Республика Алтай | Фиксирует воспоминание Натальи о посещении и высказанном ею предложении; Денис Шакин назван потенциальным свидетелем эпизода                                                                             | Не является независимой записью разговора; свидетельство Дениса Шакина в корпус не получено; причинную связь с последующими действиями Hevel не устанавливает   | —                                                                                                         | —                                                   | Принят только как авторское свидетельство с явной границей |
| AUTH-002      | Видео посещения Натальей Зубковой Майминской СЭС, зима 2019 года                                                                         | визуальная запись, описанная автором                     | Майминская СЭС, Республика Алтай | Подтверждает присутствие Натальи на объекте                                                                                                                                                              | Само предложение об использовании овец на записи не зафиксировано; файл видео не включён в текущий научный архив и в рамках этого пакета повторно не проверялся | —                                                                                                         | не включена в <b>research/soil-restoration</b>      | Принят только для факта посещения по авторскому описанию   |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                 | Тип                                                                                                               | Объект/география                                                                        | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                               | Что не подтверждает / ограничение                                                                                              | URL/DOI                                                                                   | Локальная копия | Статус                                                                       |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| AUTH-003      | «Коммерсантъ Красноярск» (29 июня 2020), <i>В республике Алтай будут пасти овец на площадке солнечной электростанции</i> | идентифицируемая публикация, прямо цитирующая пресс-службу Nevel; исходная страница пресс-релиза Nevel не найдена | Усть-Канская СЭС; возможное расширение на Усть-Коксинскую, Майминскую и Онгудайскую СЭС | Сообщает о стаде из 50 овец на летний сезон и передаёт заявление компании о возможном применении практики на других станциях, включая Майминскую; отдельная публикация МК Барнаул того же дня независимо воспроизводит число 50 и ссылку на пресс-службу Nevel | Это не сохранившийся первичный пресс-релиз Nevel; не устанавливает происхождение идеи и причинную связь с предложением Натальи | <a href="https://www.kommersant.ru/doc/4397338">https://www.kommersant.ru/doc/4397338</a> | —               | Принят как идентифицируемый источник, близкий к первичному, с явной границей |

### Правила идентификаторов

- SUB- — типы субстратов и повреждений;
- CHEM- — химия и биогеохимия;
- BIO- — почвенная биология;
- ORG- — органические потоки и компостирование;
- SAN- — санитарные потоки и загрязнители;
- PAP- — бумага/целлюлоза;
- CASE- — полевой случай;
- FAIL- — неудача или существенный побочный эффект;
- KUZ- — Кузбасс;
- ECO- — экономика и логистика;
- EXP- — дизайн эксперимента;

- **НУР-** — специальные источники по предварительно инокулированному живому субстрату;
- **МИС-** — культивируемый и цельный местный микробиом, носители и масштабирование инокулята;
- **AUTH-** — авторские свидетельства и материалы происхождения идеи, не заменяющие независимый научный источник;
- **REG-** — нормативный документ.

#### Дополнение V1.0: коэффициент вскрыши

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                                   | Тип                                                      | Объект/география                                          | Что подтверждает                                                                                                                                                                                                                                                | Что не подтверждает / ограничение                                                                                                                                      | URL/DOI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Локальная копия | Статус                                                                     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| ECO-005       | ОАО «Кузбасская топливная компания», публикация консолидированной отчётности по МСФО за 2010 год                                                           | первичная корпоративная отчётность                       | открытая добыча группы КТК, Кузбасс; 4 квартал и 2010 год | В таблице производственных показателей приведены коэффициенты вскрыши $6,1 \text{ м}^3/\text{т}$ за IV квартал 2010 года, $7,3 \text{ м}^3/\text{т}$ за 2010 год и $7,1 \text{ м}^3/\text{т}$ за 2009 год; показатель определён как объём вскрыши на тонну угля | Это агрегат компании за период, а не коэффициент конкретного отвала, не универсальная величина для Кузбасса и не характеристика Апанаса                                | <a href="https://ktk.company/press-release/publikatsiya-konsolidirovannoy-finansovoy-otchetnosti-po-standartam-ifs-za-god-okonchivshiysya-31-dekabrya-2010-goda">https://ktk.company/press-release/publikatsiya-konsolidirovannoy-finansovoy-otchetnosti-po-standartam-ifs-za-god-okonchivshiysya-31-dekabrya-2010-goda</a> | —               | Принят как первичная опора нижней границы сценарного диапазона             |
| ECO-006       | Д. С. Костюченко, автореферат диссертации «Обоснование параметров технологии разработки свиты пологих угольных пластов по смешанной системе», КузГТУ, 2017 | академический первичный расчётный документ / автореферат | открытые разработки пологих пластов Центрального Кузбасса | Сообщает фактический диапазон текущего коэффициента вскрыши $9,3\text{--}12,3 \text{ м}^3/\text{т}$ , проектную практику $10\text{--}12 \text{ м}^3/\text{т}$ и принятую для расчётов величину $11,5 \text{ м}^3/\text{т}$                                      | $11,5 \text{ м}^3/\text{т}$ в работе — расчётный граничный параметр для определённого класса разработок, а не универсальный средний коэффициент и не измерение Апанаса | <a href="https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2017/zlo/aut.pdf">https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2017/zlo/aut.pdf</a>                                                                                                                                                     | —               | Принят как опора верхней границы сценарного диапазона с явным ограничением |

| Идентификатор | Источник                                                                                                                                         | Тип                             | Объект/география                                          | Что подтверждает                                                                                                                                                                                   | Что не подтверждает / ограничение                                     | URL/DOI                                                                                                       | Локальная копия | Статус                                                                                                                                          |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ЕСО-007       | А. В. Селюков (2016), «Оценивание земельности угольных разрезов видоизменением системы открытой разработки», <i>Известия УГГУ</i> , 3(43), 82–86 | рецензируемая инженерная статья | зарубежные карьеры и угольные разрезы Кемеровской области | Даёт контекст разброса: Kemmerer 4,6 м³/т, Quintette 3,5–6,4 м³/т, Cerrejón 5–6 м³/т; отдельно предупреждает, что иные горно-геологические и технические условия требуют дополнительных вычислений | Не доказывает границы 6,1–11,5 м³/т сам по себе и не описывает Апанас | <a href="https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-82-86">https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-82-86</a> | —               | Принят как контекст переносимости и вариабельности; ошибочная ссылка на локальную копию другого исследования удалена при контроле качества V1.0 |

# МЕТОД СЛОНА В ЧАШКЕ

## Elephant in a Cup Method

Большой источник — **слон**. Контекст, доступный ИИ, — **чашка**.

Задача метода — передать ИИ не просто фрагмент, а сохранить возможность определить:

- откуда он взят;
- его доказательный статус;
- условия результата;
- ограничения и границы применимости;
- неопределённость;
- что остаётся неизвестным.

Ключевой принцип:

**Кусок слона не должен выдавать себя за всего слона.**

**A piece of the elephant should not pretend to be the whole elephant.**

**Метод слона в чашке** — экспериментальный метод проекта «Эксперимент». Его эффективность пока не доказана и будет проверяться. Абсолютная новизна, первенство и статус установленной дисциплины не заявляются.

Этот PDF — первая реализация **полного режима метода**: строгого структурированного доказательного документа для сценария документ → ИИ → человек.