

УДК 631.417.2:631.8

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕЛИОРАНТОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ: АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ

Голубкова Д.В.

аспирант научной специальности 1.5.15. «Экология» СамГТУ

e-mail: d-golubkova-dv@gmail.com

Аннотация

Рассматриваются принципы оценки длительного воздействия органических и минеральных мелиорантов на содержание и запасы органического углерода почвы. Основное внимание уделено сопоставимости многолетних наблюдений, измерению плотности сложения, изменению карбонатности, разделению влияния органических добавок, известкования и агротехнического фона. В качестве подтвержденного примера открытых данных рассмотрен эксперимент Broadbalk (Rothamsted Research), содержащий исторические ряды органического углерода и сведения о внесении органических удобрений и извести. Предложены правила отбора полей и глубин, расчета запасов углерода, оценки годовой скорости изменения и статистического моделирования повторных измерений. Установлено, что сравнение массовых концентраций без учета плотности сложения может исказить оценку эффекта, а изменение углерода при внесении навоза нельзя автоматически приписывать непосредственному действию извести. Работа является обзорно-методическим исследованием: самостоятельный расчет эффектов по первичным данным не заявляется.

Ключевые слова: *органический углерод почвы, мелиоранты, известкование, органические удобрения, многолетний опыт, запас углерода, плотность сложения, смешанная модель.*

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF RECLAMATION AGENTS ON THE CONTENT OF ORGANIC CARBON IN SOILS: ANALYSIS OF LONG-TERM SERIES

Golubkova D.V.

Postgraduate student in the scientific specialty 1.5.15 «Ecology» at Samara State Technical University

e-mail: d-golubkova-dv@gmail.com

Abstract

This paper discusses the assessment of long-term effects of organic and mineral soil amendments on soil organic carbon concentrations and stocks. Emphasis is placed on harmonizing sampling depths and analytical methods, accounting for bulk density and carbonates, distinguishing manure inputs from liming effects, and selecting appropriate temporal models. The openly documented Broadbalk experiment at Rothamsted Research is used as a source example because it provides long-term soil carbon records and treatment metadata. We propose eligibility rules, stock-conversion equations, annual change estimates, and mixed-effects modelling of repeated measurements. A change in carbon concentration alone is not equivalent to a change in carbon stock; moreover, manure-driven carbon gains must not be interpreted as a causal effect of liming. This is a methodological and literature-based assessment, and no new estimates derived from raw experimental records are claimed.

Keywords: *soil organic carbon, soil amendments, liming, farmyard manure, long-term experiment, carbon stock, bulk density, mixed-effects model.*

Введение

Органический углерод представляет собой существенную составляющую почвенного плодородия: он влияет на структуру, водоудержание, питание растений и биологическую активность. Динамика его запасов отражает баланс поступления растительных остатков и органических добавок, минерализации, эрозионных потерь и перераспределения вещества по

профилю. Поэтому исследование мелиорантов нельзя ограничивать разовым определением содержания гумуса. В условиях интенсивного земледелия особенно важны многолетние опыты, способные выявлять медленно развивающиеся изменения на фоне колебаний погоды и агротехники [1, 2].

Под мелиорантами в настоящей работе понимаются материалы, вносимые для улучшения свойств почвы: известковые материалы, гипс в соответствующих почвенных условиях, органические компосты и навоз, а также некоторые минеральные и органоминеральные добавки. При этом механизмы их действия различаются. Органические продукты могут напрямую приносить углерод; известь прежде всего меняет кислотность и доступность элементов питания, косвенно влияя на продуктивность и разложение органического вещества. Минеральные удобрения не равнозначны мелиорантам, но должны фиксироваться как сопутствующий фактор, поскольку они способны увеличивать поступление корневых и пожнивных остатков.

Цель исследования – обосновать методику сопоставления многолетних рядов органического углерода почв на вариантах с разными типами мелиорантов. Для этого необходимо рассмотреть выбор подходящего набора наблюдений, ограничения аналитических методов, перевод концентрации углерода в запасы и статистическую модель, учитывающую повторные измерения. Особое внимание уделено возможности отделить эффект внесенного органического материала от эффекта известкования и иных изменений агротехники.

Методы и методики

Наиболее убедительное доказательство эффекта мелиоранта возникает в длительном полевом эксперименте с документированной историей вариантов, сопоставимой исходной характеристикой почв и повторными измерениями. Нельзя считать независимыми наблюдения одного варианта, выполненные через разные годы на одной и той же делянке. Единицей экспериментальной рандомизации служит полевая делянка; дата отбора характеризует ее временное состояние. Данные с разных глубин также не должны механически объединяться в один ряд без учета строения профиля.

В качестве открытой базы, пригодной для такого анализа, рассмотрен Broadbalk Wheat Experiment в Великобритании. Он организован в 1843 г.; открытая версия «Broadbalk soil chemical properties 1843-2021» содержит измерения доли органического углерода, запасы в верхнем горизонте 0-23 см, плотность сложения и сведения о системе удобрения [3]. Архив также предоставляет отдельный набор исторических изменений запасов углерода за 1843-2015 гг. [4]. В ранние десятилетия интервалы между измерениями были нерегулярными; с конца двадцатого века верхний горизонт обычно обследуют каждые пять лет. Важно учитывать, что данные по некоторым датам относятся только к части делянок и что значения начального периода частично реконструированы [3, 4].

Этот архив информативен для изучения органических добавок, но не является простым чистым экспериментом «с известью / без извести». На протяжении истории отдельных участков вносили известковые материалы для поддержания заданной реакции среды, а режимы и сроки различались. Следовательно, простое сравнение двух дат или делянок не устанавливает самостоятельного эффекта известкования. Для причинной оценки требуются варианты, различающиеся именно применением извести при прочих равных условиях, либо модель с наблюдаемыми ковариатами и явным признанием остаточного смешения факторов (табл. 1) [5].

Таблица 1 – Виды исходных данных для оценки динамики органического углерода

Группа данных	Обязательные сведения	Назначение
Полевой опыт	Делянка, вариант, доза, год	Идентификация воздействий
Почвенный анализ	SOC, метод, глубина, дата	Сопоставление измерений
Физические свойства	Плотность, крупные фракции	Расчет запасов
Условия опыта	Урожайность, климат, обработка	Учет смешивающих факторов

В выборку следует включать даты с установленной глубиной, известным аналитическим методом, идентификатором делянки, документированной дозой и типом мелиоранта. Исключают результаты без единиц измерения, с неустранимой сменой границ отбора или с неопределенным способом пересчета запасов. Измерения после резкой смены севооборота не удаляются автоматически, но отмечаются отдельным индикатором в модели.

Представленные поля образуют минимальную структуру таблицы для дальнейшей статистической обработки. Без идентификатора делянки оценивать независимость измерений и строить корректные доверительные интервалы затруднительно.

Результаты

Для воспроизводимости нужна единая схема отбора почвенных проб. Она предполагает фиксированные координаты и глубины, повторности по делянкам, а также отдельный отбор пахотного и подпахотного горизонтов - без их смешивания. Состояние поверхности при этом описывают обязательно: если формируют усредненную пробу, ее аналитическая стоимость снижается, а внутриделянковую дисперсию уже нельзя оценить независимо, когда число составляющих проб и их пространственное размещение не зарегистрированы. При длительном опыте желательно сохранять архивные образцы – для повторного анализа новой методикой.

Органический углерод определяют двумя основными способами: сухим сжиганием с инструментальным измерением углерода либо методом мокрого окисления с поправкой на полноту реакции. Заранее принимать эти подходы численно эквивалентными нельзя. На карбонатных почвах общий и органический углерод различаются, поэтому требуется либо удалять карбонаты, либо отдельно измерять неорганическую составляющую и документировать процедуру – особенно на известкованных делянках, где неразделение органического и неорганического углерода способно создать ложное увеличение измеренного показателя.

Дополнительно определяют плотность сложения соответствующего слоя, массу крупных включений, гранулометрический состав и кислотность. Полезно, кроме того, фиксировать урожайность, объем возвращенных растительных остатков, дозы органических материалов и погодные характеристики; pH выступает посредником действия известкования, тогда как поступление углерода с навозом представляет собой непосредственный входной поток. При сопоставлении способов подготовки пробы необходимо указывать размеры сит и температурный режим сушки – подготовка влияет на воспроизводимость. Двойные лабораторные пробы и контрольные материалы помогают отделить аналитическое расхождение от реальной долговременной тенденции.

Концентрацию органического углерода следует выражать в г/кг или процентах сухой массы. Подменять ее содержанием «гумуса», рассчитанным через постоянный пересчетный коэффициент, не следует; аналогично содержание органического вещества по потере при прокаливании требует почвенно-специфической калибровки. Для архивных рядов смену метода измерения нужно рассматривать как самостоятельную потенциальную точку структурного сдвига – это условие сохраняется на всем интервале сопоставления.

Процентное содержание углерода удобно для сопоставления химического состава. Но без дополнительных измерений оно не позволяет установить количество накопленного вещества на единице площади, поскольку запас определяется массой мелкозема в исследуемом слое, а она зависит от толщины, плотности сложения и доли скелетных фракций. Если сравнивать фиксированные глубины при заметном уплотнении либо разуплотнении, возникает артефакт: в двух пробах учитывается неодинаковая масса минерального вещества.

По этой причине для первичного описания рассчитывают запас на стандартной глубине. Для подтверждения эффекта используют пересчет к эквивалентной массе почвы; этот подход особенно важен при внесении больших доз органических материалов, при глубокой обработке и при изменении плотности. Отдельной отчетной величиной служит абсолютное изменение запаса между двумя датами – относительное изменение и среднегодовой темп лишь

дополняют картину и не должны скрывать продолжительность периода и величину исходного запаса.

Годовую скорость не следует выводить по двум ближайшим датам. И распространять ее на весь период наблюдений без проверки формы тренда нельзя, поскольку накопление органического углерода часто замедляется по мере приближения к новому равновесию, а при смене культуры, прекращении органических внесений или изменении климата направление динамики может измениться. Линейная модель удобна как локальная характеристика отдельного отрезка, тогда как нелинейные зависимости применяют для оценки тенденции к насыщению – при достаточном временном охвате [1, 6].

$$S_c = C \cdot \rho \cdot h \cdot (1 - f) \cdot 0,1, \quad (1)$$

где S_c – запас углерода, т/га;

C – содержание органического углерода, г/кг;

ρ – плотность сложения, г/см³;

h – мощность слоя, см;

f – объемная доля крупных включений.

Коэффициент 0,1 обеспечивает перевод единиц при указанных исходных величинах; это соотношение сохраняют при всех последующих расчетах.

Разность запасов задается выражением

$$\Delta S = S(t_2) - S(t_1), \quad (2)$$

где индексы фиксируют две даты наблюдения – начальную и последующую.

Среднегодовую скорость за наблюдаемый интервал рассчитывают, как отношение разности запасов к продолжительности периода:

$$v(C) = \frac{\Delta S}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

Эта величина описывает среднее значение для выбранных лет, но не подтверждает постоянство скорости на всем рассматриваемом промежутке. Если плотность сложения варьирует, расчет следует повторять на эквивалентную массу мелкозема – иначе сопоставление будет методически неоднородным.

Сравнению вариантов должен предшествовать план анализа. В качестве основного показателя принимают запас органического углерода на эквивалентной массе почвы либо на документированной фиксированной глубине при устойчивой плотности; к вторичным показателям относят концентрацию органического углерода, pH, содержание общего азота и показатели продуктивности. Для каждого ряда необходимы график исходных значений с датами, диагностическая оценка выбросов и перечень изменений аналитического метода – без этого интерпретация временной динамики остается неполной.

Многолетние повторные измерения целесообразно анализировать с помощью смешанной модели. В такой постановке фиксированные факторы описывают тип мелиоранта, время, их взаимодействие и учтенные изменения агротехники, а случайные эффекты отражают различия делянок и, при необходимости, блоков опыта – именно так разделяют систематическую и случайную компоненты изменчивости. Взаимодействие «мелиорант × время» позволяет оценить различия в динамике, однако трактовать его как причинное воздействие нельзя, если варианты систематически различаются и по другим факторам. Для временно коррелированных остатков допустимо рассматривать структуру авторегрессии первого порядка; при редких и нерегулярных измерениях требуется аккуратная параметризация корреляции по фактическим интервалам.

Нормальность остатков, разнородность дисперсий по вариантам и наличие резких изменений проверяют диагностически. При малом числе делянок предпочтительнее использовать доверительные интервалы и оценку размера эффекта, а не ограничиваться одним уровнем p ; кроме того, данные с редкими пропусками допускают применение моделей смешанных эффектов при обоснованных предположениях о механизме пропусков. Но автоматическое линейное заполнение не создает новых независимых наблюдений. Для сопоставления раннего и современного периодов могут применяться сегментированные

тренды – если граница периода задается документированной сменой практики, а не выбирается по наибольшей статистической значимости.

Отдельно проверяют устойчивость результатов. Для этого выполняют повторный расчет без реконструированных исторических значений, без делянок с неясной историей известкования и с альтернативным способом пересчета запасов; такая процедура позволяет оценить чувствительность выводов к спорным предпосылкам. При отсутствии исходных таблиц по делянкам подобные действия остаются только планом исследования - сообщать оцененные коэффициенты, доверительные интервалы и статистически значимые различия в этом случае недопустимо.

$$S_{it} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 A_i + \beta_3 (t \cdot A_i) + u_i + \varepsilon_{it}, \quad (4)$$

где A_i – тип обработки;

t – год или время от начала опыта;

u_i – случайный эффект делянки;

ε_{it} – остаточная ошибка.

При необходимости в модель добавляют блок, климат и изменения агротехнического режима; состав предикторов уточняют по структуре опыта и доступности документированных данных (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение методов анализа временных рядов

Метод	Преимущество	Ограничение
Разность начального и конечного запаса	Простая интерпретация	Игнорирует промежуточные наблюдения
Линейная регрессия по времени	Оценивает средний тренд	Слабая модель при насыщении
Смешанная модель	Учитывает повторные измерения	Требуется структуры делянок
Нелинейная кинетическая модель	Допускает насыщение	Чувствительна к длине ряда

Метод выбирают с учетом дизайна опыта и фактической плотности наблюдений. Если параметры определены неоднозначно, целесообразно представить альтернативные модели, а не подбирать вариант с наиболее благоприятным результатом; такая процедура делает интерпретацию прозрачнее. И в этом случае выбор схемы анализа – часть исследовательского решения, а не техническое приложение к данным.

Данные Broadbalk позволяют описывать многолетнюю реакцию органического углерода на системы внесения удобрений и органических материалов. Однако любой выявленный эффект соотносится с конкретным режимом землепользования; в архиве представлены варианты, получавшие навоз, минеральные удобрения и не получавшие удобрений, а открытая серия 1843-2015 гг. содержит соответствующие исторические запасы углерода [4]. Это подтверждает наличие рядов, пригодных для анализа, но не заменяет самостоятельного расчета различий с корректным учетом пересечений вариантов и периода наблюдений.

Функциональная роль органических материалов носит двойственный характер. С одной стороны, они прямо увеличивают приток углеродсодержащего вещества, с другой – изменяют водный режим, структуру и доступность питания; при этом прибавка почвенного углерода после внесения навоза не означает сохранения в почве всего добавленного вещества, поскольку часть минерализуется и возвращается в атмосферу. Powlson и соавторы подчеркивали необходимость учитывать альтернативную судьбу органического материала и сопутствующие потоки парниковых газов при выводах о климатическом эффекте [2].

Известкование способно опосредованно изменять баланс органического углерода через кислотность, микробную активность и рост культур. Рост урожайности потенциально увеличивает возврат растительных остатков, тогда как усиление разложения может действовать в противоположном направлении; по этой причине направление эффекта не

универсально. В карбонатных и известкованных вариантах дополнительно возрастает значение корректного разделения органического и неорганического углерода - при анализе временных рядов тип известкового материала, дата внесения и изменение pH должны вводиться как отдельные переменные.

Крупномасштабные оценки почвенного связывания углерода показывают значимость долгосрочного управления. Но они не дают готового коэффициента отклика конкретной делянки, поскольку величина изменений зависит от исходного состояния, климата, текстуры, режима обработки и поступления растительного вещества [1]; температурная чувствительность минерализации, в свою очередь, неодинакова для разных пулов органического вещества, поэтому простое включение средней температуры года не всегда полностью устраняет климатическую неоднородность [7]. В прикладной интерпретации следует ограничиваться тем пространственным и временным масштабом – который охватывает конкретный опыт.

Таблица 3 – Механизмы возможного влияния групп мелиорантов

Материал	Основной путь влияния	Важная поправка
Навоз, компост	Прямое поступление органического С	Состав и сухая масса добавки
Известковые материалы	Сдвиг pH, продуктивности и минерализации	Неорганический С в образце
Гипс при обоснованных показаниях	Физико-химические свойства солонцеватых почв	Почвенный тип и водный режим
Комбинированные варианты	Возможное взаимодействие эффектов	Факторный дизайн

Табл. 3 описывает ожидаемые механизмы, а не результаты измерений. По этой причине знак изменения запасов углерода нельзя задавать заранее; он определяется балансом поступления и потерь, который требуется оценивать по фактическому временному ряду. И сама схема интерпретации здесь – аналитическая рамка, а не замена эмпирического наблюдения.

Обсуждение

Главное ограничение готового международного архива состоит в неполной сопоставимости вариантов на длительном горизонте. На протяжении десятилетий изменялись сорта, способы обработки, дозы удобрений, аналитические методы и структура самих делянок; кроме того, в пределах одной климатической зоны нельзя проверить универсальность результатов для почв иной гранулометрии и иных режимов увлажнения. Отсюда следует практический вывод - любая экстраполяция на российские агроценозы требует внешней валидации.

Для собственного полевого исследования рекомендуется выделять как минимум контроль и варианты с органическим материалом и известью. При достаточном числе повторностей включают и комбинированный вариант; такое факторное построение позволяет оценивать не только основные эффекты, но и их взаимодействие, заранее фиксируя дозы в пересчете на сухое вещество и действующее начало, измеряя содержание углерода в органическом мелиоранте и учитывая количество возвращенных растительных остатков. Отбор проб по единой глубине и измерение плотности сложения следует проводить одновременно – это обеспечивает сопоставимость расчетов запаса. Для длительных опытов особенно полезна программа хранения контрольных архивных образцов.

Если доступен только опубликованный агрегированный ряд, результатами статьи могут стать описание формата данных, обоснование модели и критическое сопоставление источников. При наличии полной таблицы наблюдений последующее исследование сможет оценить скорректированные разности трендов, показать доверительные интервалы и провести анализ чувствительности к способу расчета запасов; по нашему мнению, именно здесь

проходит граница между методическим выводом и эмпирической оценкой. Такая граница - необходимое условие воспроизводимости и научной достоверности.

Заключение

Оценка влияния мелиорантов на органический углерод почв должна основываться на сопоставимых многолетних наблюдениях и учете массы исследуемого слоя. Рост концентрации не во всех случаях означает увеличение запасов, поскольку изменение плотности сложения и доли минеральной фракции способно существенно изменить трактовку результата; при наличии карбонатов, кроме того, необходимо исключать ошибочное приписывание неорганического углерода органической фракции. Отсюда следует методическое требование – интерпретировать данные с учетом состава почвы и параметров слоя.

Открытый архив Broadbalk подтверждает возможность построения длительных рядов с известной историей органических удобрений и известкования. Вместе с тем указанные факторы не всегда разнесены независимыми экспериментальными контрастами, поэтому для отделения их влияния необходимы сведения о деланке, последовательности обработок, агрохимическом фоне и климате; дополнительно требуется статистическая модель повторных измерений. Показательно, что сама доступность архива – еще не гарантия однозначной причинной интерпретации.

Предложенная схема – от проверки исходной таблицы и лабораторной методики до оценки трендов, и чувствительности – применима к лабораторному или архивному исследованию. До обработки фактических рядов не следует объявлять численные размеры эффекта, уровни значимости или предполагаемые скорости накопления углерода результатами этой работы; следующий исследовательский этап должен включать загрузку данных по отдельным деланкам и заранее зафиксированный протокол статистического анализа. Такая последовательность действий поддерживает воспроизводимость и ограничивает преждевременные выводы.

Литература

1. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // Science. 2004. Vol. 304, № 5677.
2. Powlson D.S. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false / D.S. Powlson, A.P. Whitmore, K.W.T. Goulding // European Journal of Soil Science. 2011. Vol. 62, № 1. PP. 42-55.
3. Glendining M. Broadbalk soil chemical properties 1843-2021: dataset / M. Glendining, A.Gregory, P. Poulton // Electronic Rothamsted Archive. 2025. URL: <https://www.era.rothamsted.ac.uk/dataset/rbk1/01-BKSOIL> (дата обращения: 21.10.2026).
4. Rothamsted Research. Broadbalk soil organic carbon content 1843-2015: dataset // Electronic Rothamsted Archive. 2021. URL: <https://www.era.rothamsted.ac.uk/dataset/rbk1/02-BKSOC1843> (дата обращения: 21.10.2026).
5. Broadbalk soil chemical properties: background information // Electronic Rothamsted Archive. URL: <https://www.era.rothamsted.ac.uk/info/rbk1/soilchem> (дата обращения: 21.10.2026).
6. Rothamsted Research. Broadbalk soil organic carbon content 1843-2010: dataset // Electronic Rothamsted Archive. 2014.
7. Conant R.T. Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward / R.T. Conant, M.G. Ryan, G.I. Agren // Global Change Biology. 2011. Vol. 17, № 11. PP. 3392-3404.
8. Broadbalk Wheat Experiment: описание многолетнего опыта // Electronic Rothamsted Archive. URL: <https://www.era.rothamsted.ac.uk/Broadbalk> (дата обращения: 21.10.2026).