



**О BIOTEХНОЛОГИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ КОМПСТИРОВАНИЕМ ШЛАМ-ЛИГНИНА
БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА И ДРУГИХ
ОРГАНИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**

Хайруллин Рам.М.

Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Россия, 450054, Уфа, Проспект Октября 71, E-mail: krm62@mail.ru

Резюме

В работе обсуждается терминология, связанная с обезвреживанием и утилизацией шлам-лигнина Байкальского целлюлозно-бумажного комбината и других органических промышленных отходов с использованием процесса компостирования. Приводится терминология соответствующих ГОСТ, а также принятая зарубежными общественными, государственными и профессиональными организациями в отношении определений «компостирование», «компост», «зрелость» («maturity») и «стабильность» («stability»). Показано наличие противоречий между разными ГОСТ в определении условий компостирования (аэробные или анаэробные), а также несоответствие определения компоста с названиями таких продуктов, как торфоперегнойный, торфосидератный, навозно-земляной и другие компосты, отсутствие в официальных документах Российской Федерации определения зрелости и стабильности компоста. Сделан вывод о необходимости принятия единых определений указанных терминов, а также разработки методов оценки зрелости и стабильности компостов.

Ключевые слова: органические промышленные отходы, шлам-лигнин, компост, компостирование, зрелость и стабильность компоста, термины и определения.

Цитирование: Хайруллин Рам.М. О биотехнологической утилизации компостированием шлам-лигнина Байкальского целлюлозно-бумажного комбината и других органических промышленных отходов // *Biomics*. 2024. V.16(3). P.306-317. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-19

© Автор

**ON BIOTECHNOLOGICAL UTILIZATION BY COMPOSTING OF SLUDGE-LIGNIN FROM
THE BAIKAL PULP AND PAPER MILL AND OTHER ORGANIC INDUSTRIAL WASTE**

Khairullin Ram.M.

Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Russia, Ufa, 450054, 71 Pr. Oktyabrya, E-mail: krm62@mail.ru

Resume

In this paper is discussed terminology related to the neutralization and disposal of sludge-lignin of Baikalsk Pulp and Paper Mill and other organic industrial waste using the composting process. The terminology of the relevant GOST (State standard) is given, as well as those adopted by foreign public, state and professional organizations in relation to the definitions of «composting», «compost», «maturity» and «stability». It is shown that there are contradictions between different GOSTs in determining composting conditions (aerobic or anaerobic), as well as the discrepancy between the definition of compost with the names of products such as «humus-peat», «green manure-peat», «manure-soil» and other composts, the

absence of a definition of maturity and stability of compost in official documents of the Russian Federation. It is concluded that it is necessary to adopt uniform definitions of these terms, as well as to develop methods for assessing the maturity and stability of compost.

Keywords: organic industrial waste, sludge-lignin, compost, composting, compost maturity and stability, terms and definitions

Citation: Khairullin Ram.M. On biotechnological utilization by composting of sludge-lignin from the Baikalsk Pulp and Paper Mill and other organic industrial waste. *Biomics*. 2024. V.16(3). P.306-317. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-19 (In Russian)

© The Author

Основанием для данной публикации явилась обсуждаемая несколько лет проблема обезвреживания шлам-лигнина - уникального по своим свойствам отхода, образовавшегося при производстве сульфатной целлюлозы бывшим Байкальским целлюлозно-бумажным комбинатом (БЦБК) [1]. Предлагается множество различных решений для утилизации подобного отхода: омоноличивание, сжигание, компостирование, вымораживание, обезвоживание с последующим захоронением [2]. Все эти и другие предложения свидетельствуют о возможности их использования для обезвреживания или утилизации шлам-лигнина, вопрос лишь состоит в единстве целесообразностей одновременно в двух аспектах: экологической и экономической.

Сравнивая шлам-лигнин с осадком сточных вод биологических очистных сооружений (ОСВ), так как оба эти отхода являются органическими, экономически целесообразным и экологически безопасным можно считать компостирование шлам-лигнина по аналогии с утилизацией ОСВ с получением удобрения или грунта [3]. Однако уникальные свойства шлам-лигнина заставляют внимательнее рассмотреть сам процесс компостирования вне зависимости от вида субстратов для переработки, а также терминологию с позиции получения обезвреженного продукта – компоста, его готовности для экологически безопасного применения, в том числе с учетом современной тенденции декарбонизации. Иначе говоря, следует определить «точку» завершения процесса компостирования и зрелость компоста, в том числе из шлам-лигнина, попытаться найти показатели, официально принятые для этого в Российской Федерации.

На первый взгляд, кажется, что такая отечественная терминология известна и показатели приняты, так как есть, например, ГОСТ Р 54651-2011 [3] и ГОСТ 33830-2016 [4] для оценки возможности использовать компост как органическое удобрение, полученное из побочных продуктов животноводства – навоза животных, помета птицы, а также ОСВ. Однако есть также ГОСТ Р 57447-2017 [5], предусматривающий возможность компостирования

нефешлама, но нет требований к качеству полученного из него компоста. По аналогии с этим ГОСТ нет официальных документов, в которых бы указывались требования к качеству компоста, полученного из шлам-лигнина или гидролизного лигнина, так как эти отходы являются не природными (естественными в природе), как, например, навоз или помет, а представляют продукт физико-химического воздействия на природный материал, в результате которого происходит жесткая искусственная модификация природных веществ. Определение «природные вещества» четко дает, на наш взгляд, «Руководство пользователя», изданное системой добровольной сертификации некоторых товаров и услуг (ECOLABEL) на территории Европейского Союза (ЕС) [6]: «Природные вещества ... вещества, полученные, например, из растений, микроорганизмов, животных или некоторые неорганические вещества, такие как минералы, при условии, что они не были химически модифицированы».

Еще один факт привлекает внимание при обсуждении поставленных вопросов. Согласно ГОСТ 34103-2017 [7], компостирование это процесс, происходящий в аэробных условиях. Однако некоторые авторы, например, А.А. Теучеж [8] рассматривают и «анаэробное» компостирование с получением «закисшего силоса».

Более того, мы нашли два государственных стандарта, противоречащих друг другу [7, 9], в которых дано определение компостирования. Так если ГОСТ 34103-2017 [7] определяет компостирование (способ получения органических удобрений), как аэробный процесс, то согласно ГОСТ Р 70718-2023 [9], «... В целях производства органических удобрений, питательных грунтов и техногенных грунтов, применяются следующие методы: ... **анаэробное компостирование** ТКО (твердых коммунальных отходов, примечание наше)». Особо выделим, что в самом ГОСТ Р 70718-2023 [9] некоторые термины противоречат друг другу. Так, в пункте 3.11 компостирование определено как процесс

в аэробных условиях (со ссылкой на пункт 67 ГОСТ 34103-2017 [7]), и одновременно в пункте 5.2 указывается возможность **анаэробного компостирования** ТКО, при этом не описывается такая технология. Все эти и другие факты заставляют вновь и вновь возвращаться к терминологии компостирования.

Для оценки возможности компостирования, как способа утилизации или обезвреживания органических отходов, продуктов, веществ, мертвых организмов или их частей, или материалов биогенного происхождения (навоз, помет), либо полученных в результате их переработки или физико-химической обработки, далее назовем всё это одним термином «органика», вначале попытаемся определить сами термины – компост и компостирование. При этом с позиции заключения официальных документов (договоров) на утилизацию или обезвреживание органики компостированием эти термины имеет смысл рассматривать также только с позиции официальных источников.

Одним из таких источников является ГОСТ 34103-2017 [7]. Цитируем: **«компост: Органическое удобрение, полученное в результате разложения органических отходов растительного или животного происхождения».**

Заметим, что компостировать и получать компост можно не только из таких отходов, но и из ОСВ, содержащих ил - продукт микробиологического происхождения. Этот же ГОСТ [7] определяет термин «торфосидератный компост». Торф и сидераты не относятся к отходам. В настоящее время компостировать можно и искусственные полимерные материалы [10]. Определение «разложение» [7] не указывает на условия протекания этого процесса, который может быть как в аэробной, так и анаэробной средах (под водой или под землей, отступая от строгой терминологии – гниение). Это же замечание можно отнести к ГОСТ Р 57226-2016 [10]: «компост: Органическое удобрение, полученное путем биоразложения смеси, состоящей в основном из различных растительных остатков, иногда с другими органическими материалами, и содержащее ограниченное количество минеральных веществ».

ГОСТ 34103-2017 [7] определяет также **биокомпост: «... Компост, полученный в результате переработки органических отходов ускоренным методом в специальных камерах-ферментерах».** В сущности, компост можно получить и при компостировании органики в аэрируемых буртах с периодическим ворошением на открытых площадках, и в закрытых ангарах. Использование ангара ускорит процесс компостирования в сравнении с компостированием на открытой площадке, а использование камеры-ферментера ускорит указанный

процесс в сравнении с проведением его в ангарах. Из данного определения нельзя понять отличается ли по составу компост и биокомпост и какой должен быть срок компостирования, чтобы отнести его к ускоренному. Здесь же уместно задать вопрос: если компост получается с участием микроорганизмов (т. е. в результате биологического процесса), то чем отличается биокомпост, осуществляемый в камерах-ферментерах с участием также микроорганизмов? Т.е. можно предположить, если существует биокомпост, то существует иной компост, «химический» и т. п.

В указанном ГОСТ [7] приводятся следующие термины. **«...навозно-земляной компост: Компост на основе навоза и земли».** В данном термине не понятно, что относится к земле. Возможно, авторы этого документа подразумевали почву.

«...торфоперегнойный компост: Компост на основе торфа и перегноя». Определение «перегной» означает перегнившую органическую массу. Энциклопедический словарь [11] процесс гниения определяет как разложение органических веществ. Компост также является продуктом разложения органики. Возникает вопрос – чем отличается перегной от компоста?

«...растительный компост: Компост на основе растений и их остатков». Растения не являются отходами, что относится также и к термину торфосидератный компост, т.к. сидераты – это не отходы.

«...вермикомпост: Органическое удобрение, полученное в результате переработки органических отходов дождевыми червями». Уточним, что органические вещества, попадая в кишечник червей или копрофагов (термин «зоокомпост»), подвергаются воздействию не только ферментов этих организмов, но и микроорганизмов, населяющих кишечник. Несомненно, состав веществ вермикомпоста и зоокомпоста (более же подходит термин не компост, а экскременты), должен отличаться от традиционного компоста, полученного, например, ворошением и аэрацией буртов навоза или помета. Эти же два термина не укладываются в рассматриваемый нами термин «компостирование», если не учитывать воздействие микроорганизмов кишечника червей и копрофагов. Процесс трансформации органических веществ в кишечнике не укладывается также в определение компостирования как биотермического процесса (о чем будет сказано далее), поскольку в кишечнике червей температура вряд ли повышается при поступлении в него органических материалов.

Наконец, сам термин компостирование: **«... компостирование: Биотермический процесс минерализации и гумификации органических отходов, происходящий в аэробных условиях под**

воздействием микроорганизмов». Еще один ГОСТ [10] определяет компостирование, как аэробный процесс, в результате которого «образуется компост ... путем биоразложения».

На наш взгляд, определения «биотермический» и «в аэробных условиях» отражают условия протекания биохимических процессов, которые отличают компостирование от, так называемого, «анаэробного компостирования» [9]. Теоретически можно предположить, что деструкция (трансформация) органических соединений с использованием комплекса только ферментов микроорганизмов, либо сред их культивирования, содержащих определенные ферменты, может на первоначальных этапах в аэробных условиях привести к экзотермическим реакциям. Активация деструкции органики с помощью пула определенных ферментов в стерильных условиях (т.е. без участия микроорганизмов) в присутствии кислорода воздуха, вероятно, может быть достигнута повышением температуры. В этих случаях определение «под воздействием микроорганизмов» выделяет первопричину биотермических процессов. Следует лишь добавить, что такие процессы должны быть экзотермическими.

Приведем здесь определения «компост» и «компостирование» зарубежными организациями. Так, Совет по компостированию США (US Composting Council) [12] определил компост как продукт, получаемый посредством контролируемого аэробного, биологического разложения биоразлагаемых материалов, прошедший воздействие температуры мезофильной и термофильной стадий. Определение «биоразлагаемых» позволяет отнести к компостируемым веществам и нефтепродукты, что согласуется с ГОСТ 57447-2017 [5].

Агентство по охране окружающей среды США (US Environmental Protection Agency) [13] определяет компостирование как контролируемое, аэробное (требующее кислорода) биологическое разложение органических материалов микроорганизмами. Компост представляет собой ... «биологически стабильную почвенную добавку, полученную путем аэробного разложения органических материалов». Отметим, как и в цитируемых российских ГОСТ, так в документе США нет четкого единого определения компостирования.

Согласно Канадскому агентству по контролю за продуктами питания (Canadian Food Inspection Agency) [14], компост – твердый зрелый продукт, полученный в результате компостирования (управляемый процесс биоокисления твердого гетерогенного органического субстрата, включающий термофильную фазу). Европейское агентство по окружающей среде (European Environment Agency) [15] определяет

компостирование как контролируемое биологическое разложение органического материала в присутствии воздуха с образованием гумусоподобного материала. Стандарт AS 4454-2003 Австралии [16] определяет компост как «... органический продукт, прошедший контролируемую аэробную и термофильную биологическую трансформацию через процесс компостирования для достижения пастеризации и уменьшения или разрушения фитотоксичных компонентов, а также достижения специфического уровня зрелости. Компостирование - процесс, при котором органические материалы подвергаются микробиологической трансформации, как правило, в аэробных условиях, для достижения пастеризации и определенного уровня зрелости. Зрелый компостный продукт – компост, обладающий высокой степенью биологической стабильности и демонстрирующий относительное отсутствие фитотоксичности при оценке роста растений». Согласно Протоколу агентства Северной Ирландии по окружающей среде [17] «компост: твердый гранулированный материал, полученный в результате компостирования, прошедший санитарную обработку и стабилизированный, который оказывает благотворное воздействие при добавлении в почву, используется в качестве компонента питательной среды или иным образом в сочетании с другими удобрениями в отношении с растениями. Компостирование: процесс биологического разложения биоразлагаемых материалов в контролируемых условиях, которые являются преимущественно аэробными и позволяют развивать термофильную температуру в результате биологически вырабатываемого тепла». В этом термине важно отметить определение источника повышения температуры.

Европейская компостная сеть (European Compost Network, ECN) называет компост как «богатый питательными веществами материал в виде твердых частиц, который образуется в результате контролируемого разложения биоразлагаемых органических веществ и проходит санитарную обработку и стабилизацию» [18]. Этот процесс разложения протекает в аэробной среде и поддерживается микроорганизмами.

Согласно канадской организации по компостированию «The Compost Council of Canada» [19], «компостируемый» и «биоразлагаемый» не являются эквивалентами понятиями, также как и «дезинтеграция» не может быть взаимозаменяемой с этими терминами. Далее даны определения. «Биодеградация: деградация, вызванная биологической активностью в особенности действием ферментов, приводящая к значительному изменению химической структуры материала. Компостируемый: относится к тому, что способно подвергаться

биологическому разложению на компостном участке таким образом, что материал становится визуально однородным и распадается на углекислый газ, воду, неорганические соединения и биомассу ...». Т. е. компостирование - это не только биодеградация, биоразложение или разложение, но и изменение «химической структуры материала».

Формальный подход к определению компостирования как к процессу биоразложения действительно позволяет считать, что такой процесс может происходить в анаэробных условиях. При этом ГОСТ Р 70718-2023 [9] определяет это как «анаэробное разложение», «биогазификация» или «анаэробное сбраживание». Отметим, что биоокисление, указываемое в некоторых определениях «компостирование», может происходить и в анаэробных условиях, превращая метан, образующийся при биоразложении органики, в углекислый газ в присутствии сульфат- и нитрит ионов благодаря, например, активности микроорганизма *Methanospirillum hungatei* [20]. Таким образом, биоокисление может происходить и в аэробных, и в анаэробных условиях.

Для всех перечисленных выше терминов «компост» и «компостирование» общим является определение условий - аэробные («в присутствии воздуха», «аэробное разложение»). Термин «анаэробное компостирование», встречающийся в российском официальном документе [9], в отечественных [8] и зарубежных [21] научных работах не укладывается в преобладающее в официальных документах многих государств и научно-технической литературе определение компостирования, как процесса в аэробных условиях. Компост по указанным выше определениям не может быть получен в анаэробных условиях.

Итак, принципиальным отличием компостирования от других видов (био)разложения, биоокисления органики, следует считать аэробные условия, т.е. процессы в присутствии кислорода воздуха. Составную часть «био» следует уточнить как «микробиологическое», так как разложение или изменение химической структуры органических веществ может происходить с участием только ферментов без присутствия живых микроорганизмов.

Вернемся к термину по ГОСТ 34103-2017 [7] «... **компостирование: Биотермический процесс минерализации и гумификации органических отходов, происходящий в аэробных условиях под воздействием микроорганизмов**». Следует отметить, что в этом ГОСТ между терминами «компост» и «компостирование» существует различие в определении процессов: компост обозначен как продукт разложения, а компостирование – как минерализация и гумификация. Если оценивать

завершенность компостирования и готовность (зрелость) компоста, минерализация и гумификация органики являются конкретизацией процессов разложения и биоокисления (трансформации) веществ и отражают суть и результат конечного процесса (получить минералы и гумусовые вещества), что подтверждается описываемыми нами далее методами, разработанными в США и в европейских странах для оценки завершения компостирования и качества компоста.

Рассмотрим дополнительно термины «минерализация» и «гумификация». Согласно ГОСТ 20432-83 [22], минерализация органических веществ почвы - это «разложение органических веществ почвы с образованием минеральных соединений», под которыми без указания следует понимать углекислый газ, оксиды азота, серы, а также и соли металлов (нитраты, фосфаты, карбонаты и другие). При завершении процесса минерализации, или компостирования, согласно ГОСТ 34103-2017 [7], очевидно должно прекратиться появление минеральных соединений, в частности углекислого газа как продукта биоокисления органики, либо стабилизироваться уровень продукции CO₂ (удельная продукция за единицу времени из единицы массы органики при установленных контролируемых условиях). Что касается выделения оксидов азота или серы, их количество зависит от вида органики и в случаях минимального содержания этих элементов в органических веществах компостируемой массы может затруднить анализ продуктов минерализации таких веществ.

Второй термин – гумификация. По нашему мнению, определить окончательную гумификацию, или завершение компостирования по этому показателю, вероятно, невозможно, так как не существует стандартного гумуса в виде органической молекулы, как, например, CO₂, или набора установленного числа молекул с четко определенной структурой (формулой), подобно молекуле углекислого газа. Это подтверждает, например ГОСТ 23740-2016 [23], согласно которому, «**гумус: ...гетерогенная полидисперсная система высокомолекулярных азотсодержащих соединений: гуминовые и фульвокислоты, негидролизуемый остаток (гумин)**». Сама гумификация - биохимический процесс трансформации органических остатков в гетерогенную полидисперсную систему высокомолекулярных азотсодержащих соединений: гуминовые и фульвокислоты, негидролизуемый остаток (гумин). Особо выделим уточнение процесса гумификации - «трансформация» органических остатков, но не разложение.

Подтверждением отсутствия четкого определения завершения процесса гумификации

органического вещества, т.е. образования гумуса наряду с минеральными веществами является также ГОСТ 27593-88 [24]. «Гумус: Часть органического вещества почвы, представленная совокупностью специфических и **неспецифических органических веществ** почвы, за исключением соединений, входящих в состав живых организмов и их остатков». Так как гумус содержит неспецифические вещества, то при строгом подходе невозможно отнести образец принадлежащим к какому-то специфическому продукту, в данном случае к компосту.

Заметим, согласно ГОСТ 26213-2021 [25], существует оценка степени гумификации органического вещества почвы. Она определяется как «отношение количества углерода гумусовых кислот к общему количеству органического углерода почвы, выраженное в массовых долях». Но учитывая, что согласно ГОСТ 27593-88 [24], гумус - группа (т.е. несколько специфических) веществ, в том числе и неспецифических, приходим к мнению, что определить полную степень гумификации по стандартному веществу (молекуле(ах)) невозможно. Если все же принять содержание гумуса, как показатель зрелости компоста и завершения процесса компостирования, нет ясности - какое количество гумуса должно быть в компосте, чтобы признать его зрелым.

Относительно объекта наших исследований - шлам-лигнина, рассмотрим также термин «специфические вещества гумуса: Темноокрашенные органические соединения...». Согласно этому определению, потемнение растительных остатков при компостировании может быть следствием гумификации. Особо отметим, шлам-лигнин в глубоких слоях карт его хранения изначально светло-коричневого цвета, а после его выемки и сушки на воздухе за короткое время наблюдается потемнение до коричневого и даже темно-коричневого, почти черного цвета. Этот потемнение, по нашему мнению, нельзя отнести к гумификации.

Итак, в основе методов оценки завершения процесса компостирования и готовности (зрелости) компоста должны лежать не процессы гумификации, а процессы минерализации, в качестве одного из основных конечных продуктов которой, учитывая, что компостирование это, в том числе, и микробиологическое окисление, следует рассматривать углекислый газ. Этот процесс биоокисления, как потребление кислорода и выделение углекислого газа, лежит в основе нескольких методик, принятых в европейских странах для оценки завершения процессов компостирования и качества компоста.

Мы считаем, что сам термин **компостирование** можно определить, как **контролируемый**

микробиологический твердофазный биотермический аэробный процесс окисления и трансформации органических материалов и веществ, приводящий, в том числе, к образованию гуминовых соединений. В этом термине органические вещества мы не характеризуем как биоразлагаемые, так как определение «микробиологический» уже подразумевает способность к биотрансформации. Мы не уточняем вещества как биогенные, природные, модифицированные, синтетические, сложные по структуре (полимерные) или составу, так как в настоящее время показана возможность синтеза многих природных органических веществ и компостирование некоторых синтетических полимеров [10].

В отличие от оценок качества компоста во всех официальных документах Российской Федерации, сводящихся только к физико-химическим и санитарно-гигиеническим характеристикам продукта, в других странах приняты такие показатели, как стабильность (stability) и зрелость (maturity) компоста, которые определяют завершение компостирования. Завершение (активной) минерализации органики, как процесса компостирования, оценивается в странах ЕС, Канады, Австралии по удельной скорости выделения углекислого газа или соответствующего потребления кислорода воздуха и определяется показателем стабильность (stability). Согласно Протоколу Агентства по окружающей среде Северной Ирландии [17] компост является стабильным, когда «степень переработки и биоразложения, при которой скорость биологической активности снижается до приемлемо низкого и стабильного уровня и не будет значительно повышаться при благоприятных, измененных условиях».

Для определения стабильности компоста во многих странах используются три основных показателя, из которых два являются унифицированными и используют четко идентифицируемые вещества: скорость поглощения кислорода и скорость выделяемого CO_2 -эквивалента. Третий показатель – стадия по шкале Роттеград (Rottegrad), на наш взгляд в меньшей степени поддается унификации. Рассмотрим показатели подробнее.

Согласно Регламенту ЕС [26], стабильный компост должен соответствовать, по крайней мере, одному из следующих критериев стабильности: (а) коэффициент поглощения кислорода не более 25 ммоль O_2 /кг органического вещества в час; или (б) коэффициент самонагревания: показатель степени (уровня) разложения биоразлагаемых органических веществ, минимальная степень разложения III по шкале Rottegrad, принятой добровольной немецкой

схемой качества, управляемой Bundesgütegemeinschaft Kompost E.V. (БК). Показатели шкалы или теста Rottegrad приведены в ГОСТ Р 57226-2016 [10]. Схематично шкала в виде графика представлена в работе М. Dimambro [27].

Согласно «Руководству пользователя» [6] почвоулучшители (в том числе и компост, примечание наше) делятся на две группы. Для почвоулучшителей и мульчи при непрофессиональном применении и питательных сред, предназначенных для всех видов применения максимальная интенсивность дыхания (respirometric index) должна быть 15 мМ О₂/кг органического вещества в час, минимальная Роттеград-фаза IV (температура саморазогрева компоста не превышает температуру окружающей

среды более чем на 20°C). Стабильность компоста для профессионального применения должна характеризоваться, соответственно, показателями 25 мМ О₂/кг органического вещества в час, минимальная Роттеград-фаза III (температура саморазогрева компоста не превышает температуру окружающей среды более чем на 30°C). В различных государствах показатели интенсивности дыхания (respirometric index) отличаются, так же, как и методики их определения. Отметим, что для температуры окружающей среды должны быть установлены определенные значения.

Kowalska с соавт. [28] приводит следующие оценки стабильности компоста по данным различных источников (табл. 1-2).

Таблица 1. Оценка стабильности компоста по индексу дыхания (respirometric index) [28]

Категория компоста	Скорость поглощения кислорода, мМ О ₂ /кг×час	Скорость поглощения кислорода, мг О ₂ /кг×час	Скорость выделяемого СО ₂ – эквивалента, мг СО ₂ /кг×день
Очень нестабильный	> 30	> 960	> 32
Нестабильный	15-30	480-960	16-32
Стабильный	5-15	160-480	5-16
Очень стабильный	< 5	< 160	< 5

Table 1. Characteristics of respiratory sensitivity (respirometric index) [28]

Compost category	Oxygen uptake rate (mmol O ₂ / kg VS / hour)	Oxygen uptake rate (mg O ₂ / kg VS / hour)	Equivalent CO ₂ evolution rate (mg CO ₂ / kg VS / day)
Very unstable	> 30	> 960	> 32
Unstable	15-30	480-960	16-32
Stable	5-15	160-480	5-16
Very stable	< 5	< 160	< 5

Таблица 2 Стабильность компоста по показателю Rottegrad [28]

Превышение температуры в сравнении с окружающей средой, °С	Официальный класс стабильности	Дескрипторы класса или групп	Преобладающая группа
< 10	V	Очень стабильный, полностью зрелый компост	Финишная
10-20	IV	Средне стабильный, консервирующийся компост	
20-30	III	Все еще разлагающийся, активный компост	Активная
30-40	II	Незрелый, молодой или очень активный компост	Свежая
> 40	I	Свежий, необработанный компост, только что смешанные ингредиенты	

Table 2. Compost stability according to Rottegrad index [28]

Temperature rise above ambient temperature (°C)	Official class of stability	Descriptors of class or group	Major compost group
< 10	V	Very stable, well-aged compost	Finished
10-20	IV	Moderately stable, curing compost	
20-30	III	Still decomposing, active compost	Active
30-40	II	Immature, young or very active compost	Fresh
> 40	I	Immature, young or very active compost	

Регламент ЕС [26] при этом сообщает, что метод оценки стабильности компоста по индексу дыхания не подходит для материалов с содержанием более 20% частиц размером более 10 мм. Несмотря на наличие общеевропейских стандартов и методик ЕС для определения стабильности компоста и других его показателей, для маркировки экопродукции в отдельных странах могут применяться свои стандарты и методики, если европейский компетентный орган признает их эквивалентность общеевропейским.

Возвращаясь к теме оценки завершения процесса компостирования таких отходов как шлам-лигнин, гидролизный лигнин, нефтяной шлам и других природных веществ и материалов, подвергшихся химической трансформации, рассмотрим интересующую нас оценку зрелости компоста, которая определяется в различных странах мира одноименным показателем (maturity). Wichuk и Mccartne [29] отмечают, что термины «стабильность» и «зрелость» на первый взгляд могут казаться взаимозаменяемыми, но, по мнению многих исследователей, эти показатели относятся к различным свойствам компоста. **Стабильность (stability) компоста используется для обозначения степени разложения органических веществ, их устойчивости к дальнейшей микробиологической трансформации.** Определяется, как правило, с использованием показателя активности дыхания (потребление кислорода и/или выделение углекислого газа). При этом следует учесть, что в нестабильном компосте микроорганизмы при внесении в почву способны также усваивать почвенный азот, уменьшая его доступность для растений и замедляя их рост [30].

Зрелым считается компост, не вызывающий побочных эффектов при использовании в качестве субстрата для выращивания растений и не содержащий фитотоксичные вещества. **Термин «зрелость» (maturity) используется для обозначения компоста, готового к конкретному конечному использованию и определяется с помощью биологических тестов, оценивающих прорастание семян и рост определенных видов**

растений [29]. При использовании зрелого компоста в качестве среды для выращивания растений всхожесть и жизнеспособность семян должна быть не менее 80% по сравнению с положительным контролем. **Степень зрелости указывает на степень завершенности процесса компостирования** [30].

Mahapatra с соавт. [31] также отмечают, что степень зрелости указывает на степень завершенности процесса компостирования, а стабильность относится к определенному состоянию, определенной стадии (компостирования, примечание наше) или составу компоста. Согласно документу Агентства по охране окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) [32] зрелость компоста не определяется каким-либо одним свойством, и поэтому ее лучше всего оценивать по двум или более характеристикам.

В завершении обсуждения терминов добавим, что для оценки этих двух показателей в различных странах приняты стандартные методики. Например, DIN EN 16087-1-2020 Улучшители почвы и среда выращивания. Определение аэробной биологической активности. Часть 1. Скорость усвоения кислорода (OUR). Немецкая версия EN 16087-1:2020 [33].

В Российской Федерации для выявления степени полной минерализации или определения стабильности компоста в качестве прототипа метода можно привести определение степени минерализации сапропеля [34]. В основе анализа лежит определение CO₂, выделившегося при разложении этого органоминерального образования. Из метода следует, что если при воздействии микроорганизмов в определенных условиях на органические вещества сапропеля не происходит дальнейшего выделения углекислого газа, то можно говорить о его полной микробиологической минерализации. В отношении применения такого метода к компостированию можно утверждать, что если на мезофильной стадии после саморазогрева органики удельное образование углекислого газа единицей массы за единицу времени (так же как потребление кислорода) будет минимальным и относительно постоянным в

установленной тест-системе, то можно считать процесс трансформации веществ завершённым, а компост - стабильным.

Одним из официальных документов в котором сделана попытка определить завершение процесса компостирования различных отходов является Постановление Правительства Москвы от 17 июня 2008 г. № 514-ПП [35]. Для оценки готовности компоста (биокомпоста) из навоза крупного рогатого скота, листьев древесных культур, опилок, их смесей, а также в смеси с торфом) рекомендуется использовать содержание органического вещества (не менее 20%) и долю гуминовых веществ – не менее 15% от общего содержания органического вещества. Для оценки готовности компоста (биокомпоста) из ОСВ предлагается использовать «... падение температуры в смеси до 25-30°C, которая контролируется при помощи термодатчиков». При этом такой компост делится на 4 группы качества по содержанию тяжелых металлов и мышьяка. Групповая принадлежность биокомпоста определяется по элементу, содержание которого в наибольшей степени превышает допустимый его уровень в компосте, соответствующий уровню группы. Для биокомпостов на основе древесных опилок и отходов овощехранилищ компостирование считается завершённым, «когда процесс разогревания прекращается, стабилизируется температура, снижается выделение углекислого газа и содержание клетчатки, а соотношение C:N становится 25 и ниже. При этом основным критерием спелости компоста является полное отсутствие резких запахов исходных компонентов». Как следует из документа, в отношении компостов из ОСВ или отходов овощей нет конкретных показателей оценки степени готовности (зрелости) компоста.

К приведенным выше данным следует добавить, что как в России, так и за рубежом качество компоста оценивается и по другим показателям, характеризующим содержание макроэлементов, тяжелых металлов, пестицидов, наличие патогенных микроорганизмов, личинок паразитов и т.д. Но эти показатели не позволяют определить сам процесс завершения компостирования и готовность, зрелость компоста.

Таким образом, можно заключить, что в России нет официальных документов, позволяющих определить завершение компостирования не только таких органических отходов промышленности, как шлам-лигнин, гидролизный лигнин, нефтешлам, но и побочных продуктов животноводства, птицеводства, растительных остатков, ОСВ. Нет методических рекомендаций, регламентов методов оценки стабильности и готовности или зрелости компоста. Физико-химические и санитарно-гигиенические

показатели соответствующих ГОСТ не могут использоваться для оценки таких зарубежных показателей, как стабильность и зрелость компоста, и позволяют определить лишь его относительную безопасность для человека и окружающей среды.

Возвращаясь к интересующему нас объекту – шлам-лигнину следует учесть, что этот органический отход получен в результате физико-химической деструкции (разложения) и жесткого химического окисления. Поэтому можно полагать, что **при компостировании только шлам-лигнина или гидролизного лигнина удельная скорость выделения углекислого газа (потребления кислорода) не может быть сопоставимой с аналогичными показателями компостирования отходов животноводства, растениеводства, ОСВ или ТКО. По нашему мнению, этот показатель должен быть минимальным, что может привести к ошибочному мнению завершения процесса компостирования так же, как и потемнение шлам-лигнина при сушке на воздухе не может свидетельствовать о его гумификации. Обезвреживание шлам-лигнина вымораживанием при отсутствии фитотоксичности у полученном продукте [2] не позволяют также использовать только такой тест для оценки степени зрелости компоста из указанного отхода.**

Для оценки завершения процесса компостирования, стабильности и зрелости компоста не только из шлам-лигнина, гидролизного лигнина, нефтешламов, но и из «традиционных» органических отходов следует разработать соответствующие методики и утвердить нормативные показатели для использования на территории Российской Федерации.

Литература

1. Короткий Л.М. БЦБК: экологический сериал // Экономика и организация промышленного производства. 2012. № 3 (453). С. 105-122.
2. Шатрова А.С., Богданов А.В., Шкрабо А.И., Алексева О.В. Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 153-162
3. ГОСТ Р 54651-2011 Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2012. 18 с.
4. ГОСТ 33830-2016 Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2020. 12 с.
5. ГОСТ Р 57447-2017 Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

- Основные положения. М.: Стандартинформ. 2019. 32 с.
6. User Manual. Growing media, Soil improvers and Mulch. August 2017, Version 1.4. [Электронный ресурс]: European Commission [сайт]. URL: https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/gmsim/user_manual.pdf (дата обращения 09.10.2024).
7. ГОСТ Удобрения органические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 20 с.
8. Теучеж А.А. Способы приготовления различных компостов // Сб. статей по материалам Международной научной экологической конференции «Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности». Краснодар, 27–29 марта 2018 г. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. 2018. С. 239-243.
9. ГОСТ Р 70718-2023 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Методические рекомендации по утилизации органических фракций твердых коммунальных отходов с применением методов компостирования. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 24 с.
10. ГОСТ 57226-2016 (ISO 16929:2013) Пластмассы. Определение степени разложения в установленных условиях компостирования в процессе пробных испытаний (ISO 16929:2013, MOD). М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.
11. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона [Электронный ресурс]: <https://gufo.me/dict/brockhaus/Гниение> (дата обращения 09.10.2024).
12. Compost Definition [Электронный ресурс] // US Composting Council: [сайт]. URL: <https://www.compostingcouncil.org/page/CompostDefinition> (дата обращения 09.10.2024).
13. Composting [Электронный ресурс] // US Environmental Protection Agency : [сайт]. URL: <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/composting#definitions> (дата обращения 09.10.2024).
14. T-4-120–Regulation of compost under the Fertilizers Act and Regulations [Электронный ресурс] // Government of Canada Inspection: [сайт]. URL: <https://inspection.canada.ca/en/plant-health/fertilizers/trade-memoranda/t-4-120> (дата обращения 09.10.2024).
15. Term. Composting [Электронный ресурс] // European Environment Agency: [сайт]. URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/composting> (дата обращения 09.10.2024).
16. Information Sheet No.3-10. Manufacturing Quality Products from Compost Introduction to Australian Standard AS 4419 (2003) soils for landscaping and garden use [Электронный ресурс]: 2012. URL: <https://www.catchmentsolutions.com.au/files/2014/11/IS3-10.pdf> (дата обращения 09.10.2024).
17. Quality Protocol. Compost. End of waste criteria for the production and use of quality compost from source-segregated biodegradable waste [Электронный ресурс]: Oxon: The Old Academy, 2012. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c0761ed915d01ba1cab0f/gho0812bwpl-e-e.pdf> (дата обращения 09.10.2024).
18. Walk S., Gambini R. Life Biobest D3.3 - Guideline on quality compost and digestate // https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/Jun24_240618_LIFE-BIOBEST_WP3_D3.3_Guideline_QualityCompost_Submitted.pdf (дата обращения 09.10.2024).
19. Compostable // The Compost Council of Canada: URL: <http://www.compostable.info/compostable.htm> (дата обращения 09.10.2024).
20. Deutzmann J.S., Schink B. Anaerobic Oxidation of Methane in Sediments of Lake Constance, an Oligotrophic Freshwater Lake // Applied Environmental Microbiology. 2011. V. 77(13). P. 4429-4436. DOI: 10.1128/AEM.00340-11
21. Mehta C. M. SirariK. Comparative study of aerobic and anaerobic composting for better understanding of organic waste management: A mini review // Plant Archives. 2018. V. 18(1). P. 44-48.
22. ГОСТ 20432-83 Удобрения. Термины и определения. М.: Издательство стандартов. 1992. 19 с.
23. ГОСТ 23740-2016 Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ. 2017. 12 с.
24. ГОСТ 27593-88 Почвы. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2008. 11 с.
25. ГОСТ 26213-2021 Почвы. Методы определения органического веществ. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 11 с.
26. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019. [Электронный ресурс]: Official Journal of the European Union. 25.6.2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009> (дата обращения 09.10.2024).
27. Dimambro M., Steiner H.J., Rayns F., Wallace P. Literature review: Compost stability – impact and assessment // Technical Report. July 2019. DOI:10.13140/RG.2.2.15076.58248
28. Kowalska M.A., Delre A., Wolf O. EU Ecolabel criteria for growing media and soil improvers // Technical Report. October 2021. DOI: 10.2760/748007
29. Wichuk K.M., McCartney D. Compost stability and maturity evaluation: A literature review // Canadian Journal of Civil Engineering. 2010. V.37(11). 1505-1523. DOI: 10.1139/L10-101

30. Compost and stormwater management [Электронный ресурс]: Minnesota Stormwater Manual. 2021. URL: https://stormwater.pca.state.mn.us/images/e/ea/Compost_and_stormwater_management_-_Minnesota_Stormwater_Manual.pdf (дата обращения 09.10.2024).
31. Mahapatra S., Ali Md.H., Samal K. Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin // *Energy Nexus*. 2022. V. 6. 100062. DOI: 10.1016/j.nexus.2022.100062
32. Compost specification for soil incorporation [Электронный ресурс]: USA EPA archive document. URL: <https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/highwy4.pdf> (дата обращения 09.10.2024).
33. DIN EN 16087-1:2020-04. Soil improvers and growing media - Determination of the aerobic biological activity - Part 1: Oxygen uptake rate (OUR); German version EN 16087-1:2020. 15 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.standards.ru/document/6489144.aspx> (дата обращения 09.10.2024)
34. Иванова Т., Павлов Н., Керечанина Е. Анализ минерализации и трансформации органических веществ, в том числе сапротелей // *Аналитика*. 2014. №6(19). С. 62-73.
35. Постановление Правительства Москвы от 17 июня 2008 №514-ПП «Об утверждении Методических рекомендаций и требований по производству компостов и почвогрунтов, используемых в городе Москве» [Электронный ресурс]: Департамент жилищно-коммунального хозяйства города Москвы [сайт]. 2024. URL: <https://www.mos.ru/dgkh/documents/deistvuiushchie-normativnye-pravovye-akty/view/40184220> (дата обращения 09.10.2024).
6. User Manual. Growing media, Soil improvers and Mulch. August 2017, Version 1.4.: European Commission. URL: https://ec.europa.eu/environment/ecolabel/documents/gms_im/user_manual.pdf (accessed: 09.10.2024).
7. GOST 34103-2017 Organic fertilizers. Terms and definitions. M.: Standartinform. 2019. 32 s. (In Russian)
8. Teuchezh A.A. Methods of preparing various composts. *Proceedings of International scientific ecological conference «Environmental problems of development of agrolandscapes and ways of increase in their efficiency»*. Krasnodar, 27-29 Marz 2018. Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. 2018. S. 239-243. (In Russian)
9. GOST R 70718-2023 Resources saving. Waste management. Guidelines for the disposal of organic fractions of municipal solid waste using composting methods. M.: Rossijskij institute standartizacii. 2023. 24 s. (In Russian)
10. GOST 57226-2016 Plastics. Determination of the degree of disintegration under defined composting conditions in a pilot-scale test. M.: Standartinform. 2016. 11 s. (In Russian)
11. The Brockhaus and Efron Encyclopaedic Dictionary. <https://gufo.me/dict/brockhaus/Гниение> (accessed: 09.10.2024).
12. Compost Definition. *US Composting Council*. URL: <https://www.compostingcouncil.org/page/CompostDefinition> (accessed: 09.10.2024).
13. Composting. *US Environmental Protection Agency*. URL: <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/composting#definitions> (accessed: 09.10.2024).
14. T-4-120—Regulation of compost under the Fertilizers Act and Regulations. *Government of Canada Inspection*. URL: <https://inspection.canada.ca/en/plant-health/fertilizers/trade-memoranda/t-4-120> (accessed: 09.10.2024).
15. Term. Composting. *European Environment Agency*. URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/composting> (accessed: 09.10.2024).
16. Information Sheet No. 3-10. Manufacturing Quality Products from Compost Introduction to Australian Standard AS 4419 (2003) soils for landscaping and garden use. 2012. URL: <https://www.catchmentsolutions.com.au/files/2014/11/IS3-10.pdf> (accessed: 09.10.2024).
17. Quality Protocol. Compost. End of waste criteria for the production and use of quality compost from source-segregated biodegradable waste: Oxon: The Old Academy, 2012. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c0761ed915d01ba1cab0f/gho0812bwpl-e-e.pdf> (accessed: 09.10.2024).
18. Walk S., Gambini R. Life Biobest D3.3 - Guideline on quality compost and digestate.

References

1. Korytnyj L.M. BZBK: ecologicheskij serial. *Èkonomika I organizaciâ promyšlennogo proizvodstva*. 2012. No 3 (453). S. 105-122. (In Russian)
2. Shatrova A.S., Bogdanov A.V., Shkrabo A.I. Alekseeva O.V. Technology for processing waste of the pulp and paper industry into soil ground using natural processe. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. V. 333. 8. S. 153-162. (In Russian)
3. GOST R 54651-2011 Organic fertilizers on the basis of sewage sludge. Specifications. M.: Standartinform. 2012. 18 s. (In Russian)
4. GOST 33830-2016 Organic fertilizers on basis of waste of stock-raising. Specifications. M.: Standartinform. 2020. 12 s. (In Russian)
5. GOST R 57447-2017 Best available techniques. Reclamation of lands contaminated with oil and oil products. Basis principles. M.: Standartinform. 2019. 32 s. (In Russian)

- https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/Jun24_240618_LIFE-BIOBEST_WP3_D3.3_Guideline_QualityCompost_Submitted.pdf (accessed: 09.10.2024).
19. Compostable. *The Compost Council of Canada*. URL: <http://www.compostable.info/compostable.htm> (accessed: 09.10.2024).
20. Deutzmann J.S., Schink B. Anaerobic Oxidation of Methane in Sediments of Lake Constance, an Oligotrophic Freshwater Lake. *Applied Environmental Microbiology*. 2011. V. 77(13). P. 4429-4436. DOI: 10.1128/AEM.00340-11
21. Mehta C. M. Sirari K. Comparative study of aerobic and anaerobic composting for better understanding of organic waste management: A mini review. *Plant Archives*. 2018. V. 18(1). P. 44-48.
22. GOST 20423-83 Fertilizers. Terms and definitions. M.: Izdatel'stvo standartov. 1992. 19 s. (In Russian)
23. GOST 23740-2016 Soils. Methods of laboratory determination of organic composition. M.: Standartinform. 2017. 12 s. (In Russian)
24. GOST 27593-88 Soils. Terms and definitions. M.: Standartinform. 2008. 11 s.
25. GOST 26213-2021 Soils. Methods for determination of organic matter. M.: Rossijskij institute standartizacii. 2021. 11 s. (In Russian)
26. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019. *Official Journal of the European Union*. 25.6.2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009> (accessed: 09.10.2024).
27. Dimambro M., Steiner H.J., Rayns F., Wallace P. Literature review: Compost stability – impact and assessment. *Technical Report*. July 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.15076.58248
28. Kowalska M.A., Delre A., Wolf O. EU Ecolabel criteria for growing media and soil improvers. *Technical Report*. October 2021. DOI: 10.2760/748007
29. Wichuk K.M., McCartney D. Compost stability and maturity evaluation - a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010. 37(11). 1505-1523. DOI: 10.1139/L10-101
30. Compost and stormwater management. *Minnesota Stormwater Manual*. 2021. URL: https://stormwater.pca.state.mn.us/images/e/ea/Compost_and_stormwater_management_-_Minnesota_Stormwater_Manual.pdf (accessed: 09.10.2024).
31. Mahapatra S., Ali Md. H., Samal K. Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin. *Energy Nexus*. 2022. V. 6. 100062. DOI: 10.1016/j.nexus.2022.100062
32. Compost specification for soil incorporation: USA EPA archive document. URL: <https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/highwy4.pdf> (accessed: 09.10.2024).
33. DIN EN 16087-1:2020-04. Soil improvers and growing media - Determination of the aerobic biological activity - Part 1: Oxygen uptake rate (OUR); German version EN 16087-1:2020. 15 s. URL: <https://www.standards.ru/document/6489144.aspx> (accessed: 09.10.2024)
34. Ivanova T., Pavlov N., Kerechanina E. The analyses of mineralization and transformation of substances including sapropels. *Analitika*. 2014. No 6(19). S. 62-73. (In Russian)
35. Postanovlenie Pravitel'stva Moskvy ot 17 iyunja 2008 No 514-PP «Ob utverzhenii Metodicheskikh rekomendacij i trebovanij po proizvodstvu kompostov i pochvogruntov, ispol'nsuemyh v gorode Moskve». Departament jilishno-kommunal'nogo hosajstva goroda Moskvy: URL: <https://www.mos.ru/dgkh/documents/deistvuiushchie-normativnye-pravovye-akty/view/40184220> (accessed: 09.10.2024). (In Russian)