

# ЕКОЛОГІЯ ТА ЕКОНОМІКА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 628:504.054

## ЭКОЛОГО-СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССУ НАКОПЛЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ИЛОВЫХ ОСАДКОВ

Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю.

Сумской государственный университет  
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, г. Сумы  
e-mail: info@ecolog.sumdu.edu.ua  
e-mail: liza\_chernish@mail.ru

Предложен синергетический подход к решению проблемы накопления иловых осадков. Сделан анализ и экспериментально изучены качественные преобразования в системе анаэробной микробиологической деструкции стоков и их осадков на основе автокатализа и эффекта синергизма. Исследована синергия биохимических трансформаций иловых осадков и их влияние на производство экологически безопасного продукта обработки. *Ключевые слова:* синергетика, анаэробная микробиологическая деструкция, иловые осадки

**Еколого-синергетичний підхід до процесу накопичення та утилізації мулових осадків.** Пляцук Л. Д., Черниш Е. Ю. Запропоновано синергетичний підхід до розв'язання проблеми накопичення мулових осадків. Здійснено аналіз і експериментально вивчено якісні перетворення у системі анаеробної микробиологічної деструкції стоків та їх осадків основі автокаталізу та ефекту синергізму. Досліджено синергію біохімічних трансформацій мулових осадків та їх вплив на виробництво екологічно безпечного продукту обробки. *Ключові слова:* синергетика, анаеробна микробиологічна деструкція, мулові осадки

**Ecologo-synergetic approach to the process of accumulation and utilization of sewage sludge.** Plyatsuk Leonid, Chernish Elizabeth. The article focused on the synergetic approach to the problem of sewage sludge accumulation. The analysis and experimental study of synergistic changes in the anaerobic microbial degradation of wastewater and sludge were carried out. They were based on autocatalytic processes and synergies. There was also studied the synergy of the sludge qualitative biochemical transformations and its impact on the sludge mineral structure and ecological safety of the obtained product. *Keywords:* synergetics, anaerobic microbial degradation, sewage sludge.

Синергетика – это синтетическая наука, которая основана на единой концепции самоорганизации динамических систем различной природы. Ее идеи не являются простой со-  
вокупностью физических теорий и математических методов, что является новым концептуальным взглядом на науку. Однако в синергетике еще не сформирована целостная теория

самоорганизации, которую можно одинаково справедливо применить ко всем системам физического мира, как к природным так и техническим. Поэтому в зависимости от конкретных свойств той или иной отрасли науки синергетический подход трансформирует свои отличительные особенности и содержание. Не исключено стало и применение этого подхода к экологическим процессам, как интегральной совокупности химических, биологических, геологических, гидрологических, техногенных и других процессов, которые протекают в экосистемах разного уровня организации и являются по существу открытыми системами. Одной из прикладных экологических задач, которая требует решения, является проблема накопления и утилизации разного вида отходов, в том числе стоки и их иловые осадки. В этом направлении, на наш взгляд, использование синергетического подхода является очень важным. На основе оценки синергизма и автокатализа природных систем можно проанализировать действие на их процессов образования, складирования иловых осадков на иловых картах и дальнейшую их трансформацию, разрабатывать такие технологические процессы, которые учитывали бы эти трансформации с учетом возможности перестройки взаимодействия с окружающей природной средой на экологически безопасный уровень.

### Анализ публикаций и постановка проблемы

В настоящее время основная масса иловых осадков (ИО) городских сточных вод складывается на пере-

полненных иловых картах очистных сооружениях городских станций аэрации. Условия складирования и хранения осадков, как правило, не исключают загрязнения ими поверхностных и подземных вод, почв, растительности. Нарушение норм безопасности на станциях аэрации может привести к чрезвычайным экологическим последствиям для многих городов и нарушению естественных гидрологических экосистем. Известно, что ИО являются источником наиболее опасных форм тяжелых металлов (ТМ) в почвах - металлоорганических соединений. Поэтому подготовка ИО к попаданию их в почву также влияет на накопление в ней металлов. Металлоорганические соединения ТМ легче включаются в пищевые цепи, чем их неорганические соединения, и поэтому являются наиболее опасными формами ТМ. Образование растворимых органических комплексов соединений ТМ ведет к снижению их адсорбции в почвах [1]. Даже при концентрациях металлов в ИО ниже установленных ПДК необходимо учитывать процесс биоаккумуляции микроэлементов. Кроме того, не решена задача удаления биогенных элементов из сточных вод и их осадков, в частности, соединений фосфора, которые вызывают процессы эвтрофикации водоемов, интенсивное размножение водорослей, цианобактерий и в процессе биологического развития уменьшают содержание кислорода в воде, образуют аноксигенные зоны и токсичные метаболиты, что вызывает массовую гибель представителей гидрофауны. Накопление фосфора в биомассе активного ила является одной из причин его вспухания, и, соответствен-

но, нарушения работы очистных сооружений. Одновременно влияние ТМ на компоненты биогеоценозов существенно обусловлено и их влиянием на энергетические потоки в системе, на изменение свободной энергии ( $\Delta G$ ), энтальпии ( $\Delta H$ ) и энтропии ( $\Delta S$ ) в протекающих реакциях метаболизма, ионного обмена, комплексообразования [2]. Так, свинец образует достаточно стабильные хелаты с органическими лигандами, содержащими донорные атомы S, N, O, стабильные комплексы с гуминовыми и фульвокислотами. Это определяет более вероятные конкурирующие комплексообразования в почвах и растениях, а следовательно, изменение  $\Delta G$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta S$  в протекающих реакциях в связи с взаимозаменяемостью биологической активности у большинства металлов.

Распределение ТМ по почвенному профилю является функцией двух процессов - вымывания (инфильтрации, просачивания с водами через профили почв) и биоаккумуляции (связывания ионов ТМ в почвенно-поглощающем комплексе при взаимодействии растений с микробиотой). Поэтому в процессе накопления ИО на иловых картах происходит накопление ТМ в верхних почвенных горизонтах [3-5]. Концентрируясь в осадках и в активном иле, они делают их экологически небезопасными, что ограничивает возможность использования их в сельском хозяйстве. Такая ситуация имеет место в большинстве городов Украины, включая Киев, Харьков, Днепрпетровск, Донецк, Макеевку и другие, где иловые площадки превратились в илонакопители.

В то же время ИО содержат значительное количество элементов ми-

нерального питания растений и по своему составу близки к навозу. В пересчете на сухое вещество они содержат почти одинаковое количество органического углерода и общего азота, значительно больше фосфора и в 10 раз меньше калия. ИО, как и навоз, содержат биофильные микроэлементы, необходимые для роста и развития растений. По эффективности многие виды ИО не уступают традиционным органическим удобрениям [6].

На сегодня разрабатываются новые эффективные методы детоксикации иловых осадков городских сточных вод с последующей их утилизацией [7-11]. Это направление чрезвычайно важно не только для Украины, но и для других стран СНГ и всего мира. Многие исследователи ищут способы относительно недорогого извлечения ТМ из ИО или же их иммобилизации в неактивные формы с возможностью дальнейшего использования органических осадков в качестве удобрений. Каждый из известных способов обезвреживания ИО вызывает дискуссии и требует детального регламентирования.

Таким образом, утилизация осадков сточных вод на сегодня – актуальная проблема на всей территории Украины, решение которой является первоочередной задачей. При отсутствии механического обезвреживания ИО ежегодная потребность в иловых площадках для размещения создаваемого осадка составляет для всей Украины 120 га в год. Это создает условия для вертикальной и горизонтальной миграции металлов.

В целом при использовании ИО в качестве почвоулучшающей добавки целесообразно проводить их обезва-

раживание и обезвреживание для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

### Цель и задачи исследования

Цель исследования – обоснование возможности применения синергетического подхода к управлению отходами и разработке экологически безопасных биотехнологических систем. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- теоретическое обоснование синергетического подхода к проблеме накопления иловых осадков;
- экспериментальное изучение и анализ синергетических преобразований в системе анаэробной микробиологической деструкции стоков и их осадков.

### Материалы и методы исследований

Методы исследования базируются на системном анализе и биохимическом моделировании изучаемых процессов и концепции самоорганизации систем, лежащей в основе синергетического подхода.

Анализ структуры образцов ИО и внеклеточных образований жизнедеятельности микроорганизмов проводили рентгендифракционным методом с использованием автоматизированного дифрактометра ДРОН-4-07 (НПП „Буревестник”, Санкт-Петербург, Россия). Система автоматизации ДРОН-4-07 включает микропроцессорный контроль для обеспечения управления гониометром ГУР-9 и передачи данных в цифровом виде на ПК. Исследования проводили с помощью микроскопа-микрoанализатора растрового элек-

тронного РЭММА-102 (ОАО «СЕЛМИ», Сумы, Украина) ТУ047.99336.025-97, оснащенного многоканальным рентгеновским спектрометром с волновой дисперсией и дисперсией по энергиям, а также рентгено-флуоресцентном спектрометре ElvaX Light SDD (ООО "ЭЛВАТЕХ", Киев, Украина) для выявления примесей тяжелых металлов в легкой матрице не хуже 1 ppm.

При культивировании микроорганизмов использовали физический метод создания анаэробных условий и применяли механический метод посева. Окраску микробных препаратов осуществляли по методу Грамма и Циль-Нильсена. Микрофотографии микробных препаратов обрабатывали с помощью цифровой системы вывода изображения «SEO Scan ICX 285 AK-F IEE-1394» и морфометрической программы «SEO Image Lab 2.0» (Сумы, Украина).

Контроль pH проводили с интервалом в сутки с помощью рХ-метр рХ-150 (ионметр, Беларусь) с электродом стеклянным комбинированным «ЭКС-10603».

### Теоретическое обоснование синергетического подхода к проблеме накопления иловых осадков

Применение ИО как органоминерального удобрения в сельском хозяйстве возможно только при условиях их предварительной обработки для предупреждения процесса биоаккумуляции ТМ в агроценозах. Следовательно, можно утверждать, что процессы биохимической трансформации ИО в окружающей среде ведут к изменениям подсистем экосистемы,

которые могут иметь как точечный характер, так и системный. Эти закономерности были заложены в основу синергетического подхода к изучению проблемы, что представлено в виде блок-схемы (рис.1).

Характер воздействия ИО на различные экосистемные уровни зави-

сит от качественных и количественных характеристик ИО (их состава и свойств), а также от других параметров, характеризующих состояние природных объектов (экологических элементов), на которые влияют ИО.

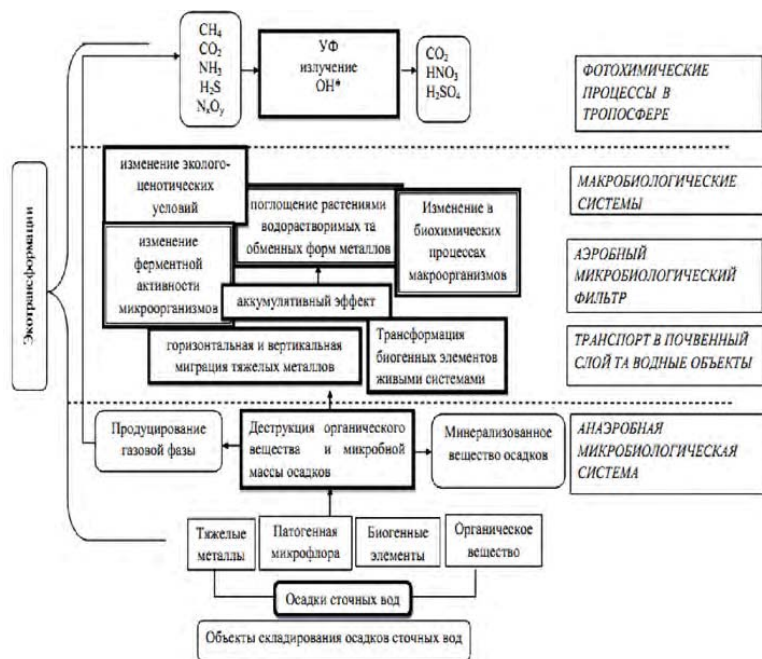


Рис.1. Биохимический цикл трансформации иловых осадков сточных вод в экосистеме

В нижних уплотненных слоях ИО на иловых картах происходит поглощение кислорода аэробной микрофлорой и начинается деятельность анаэробных микроорганизмов, которые активно участвуют в процессе образования органического вещества из CO<sub>2</sub> за счет энергии, получаемой при окислении неорганических со-

единений, в частности, водорода (хемосинтез). Восстановленный в результате этого метан выделяется в газовой форме. Образованные биогенные газы диффундируют в верхние слои ИО, т.е. в область, где присутствует O<sub>2</sub>, и становятся доступными для окисления аэробами. В верхнем слое ИО происходит актив-

ный газообмен с атмосферным воздухом в результате суточных и сезонных колебаний температуры, изменения атмосферного давления, диффузии газов, потребления и выделения газов микроорганизмами и корневой системой растений. При этом водорастворимые формы ТМ испаряются и поступают в воздушную среду с транспирацией из растений. Их концентрация в продуктах испарения и транспирации составляет порядка 10<sup>-8</sup> – 10<sup>-9</sup> моль/л, увеличиваясь с ростом загрязнения почв ТМ [2].

При дальнейшей трансформации биогенных газов совместно с другими газообразными веществами наблюдается эффект суммации, что вносит определенный вклад в баланс углерода, азота, кислорода и серы в тропосфере.

Как продуценты, потребители и транспортирующие агенты в ИО микроорганизмы оказываются включенными в потоки энергии и круговорот химических элементов. Патогенная микробная составляющая ИО предварительно обеззараженных путем аэробных и/или анаэробных процессов или выдержки на иловых картах не оказывает существенного влияния на ухудшение функционирования почвенной биоты [12-14]. Отметим, что хранение осадка менее года недостаточно для его обеззараживания, поскольку сальмонелла, например, сохраняется в осадке, а яйца гельминтов не теряют способность к заражению более двух лет.

Даже незначительные изменения энергоэлементного состояния окружающей среды (за счет энергетической составляющей) способны изменять внутреннее энергоэлементное

состояние системы путем водовода и элементов 2, 3 периода IV-VII групп, т.е. таких как С, О, Р, Si и т.д., что частично изучено [15]. В аспекте влияния процесса накопления ОСВ на энергоэлементное состояние гидросферы, литосферы и атмосферы выше изложенное утверждение, на наш взгляд, является также корректным.

Отметим, что с изменением равновесного состояния рассматриваемой подсистемы изменяется и состояние всей экологической системы, которая с точки зрения физико-биологических процессов, протекающих в ней, является энергоэлементной системой.

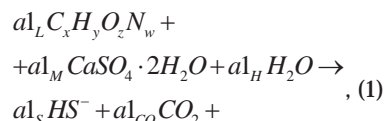
Как ранее отмечалось, биологические системы по своей природе являются синергетическими. Поэтому возможность воздействия на такие системы необходимо рассматривать с учетом законов синергетики, а использование биотехнологических процессов в системе управления экологической безопасностью должно основываться на анализе возможных путей развития синергетических систем для эффективного снижения уровня техногенной нагрузки на окружающую среду.

### Синергетические преобразования в системах анаэробной микробиологической деструкции стоков и их осадков (результаты и их обсуждение)

**Синергетическая характеристика иловых осадков в процессе АМД.** С целью подготовки к культивированию в условиях отсутствия аэрации иловые осадки сбрасывали в емкости без доступа воздуха в тече-



нии 14 суток при температуре 36°C. В конце этого периода хлопья ила приобрели черную окраску и характерный запах разложившихся органических остатков. При микроскопических исследованиях сброженного ила активных простейших не обнаружено, в иле присутствуют единичные цисты. В дальнейшем ил поместили в два реактора: контрольный (без минерального субстрата, источника акцепторов электронов для сульфатредукторов) и опытный с добавкой фосфогипса (не менее 10 г/л, исходя из первичной активности сульфатредукторов). Исходная концентрация биомассы в реакторах (доза ила) составляла 6,5 г/л. Мониторинг состояния анаэробного ила показал, что в биохимической системе наблюдалось включение полупрозрачных мелких частиц кристаллической структуры в хлопья анаэробного ила (рис. 2), образовавшихся при введении в органическое вещество ила фосфогипса с последующей его трансформацией:



где  $a_1 L, a_1 M, a_1 H, a_1 S, a_1 CO, a_1 C, a_1 N, a_1 Ca$  — стехиометрические коэффициенты.

При этом образовались новые минеральные структуры (табл. 1).

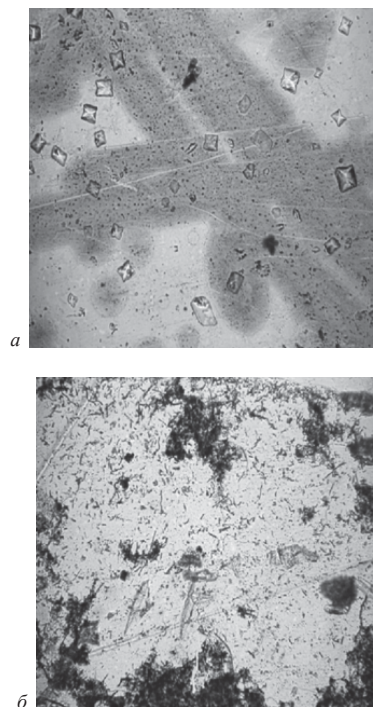


Рис. 2. Формирование кристаллических структур в бактериальном матриксе в условиях сульфидогенеза. Световая микроскопия. Окраска по методу Грамма: а – Ув. x40; б – Ув. x100.

В ассоциации микроорганизмов доминируют ацетатотрофы (рис.3), что связано с неполным окислением органического вещества до ацетатов. Следовательно, первостепенное значение для стабильной работы системы имеет удаление летучих жирных кислот (ЛЖК), в первую очередь, ацетатов. В ином случае происходит закисание среды и снижение pH до 5,0.

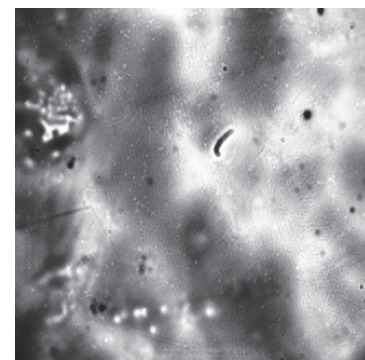


Рис. 3. Кислотоустойчивая спорообразующая бактерия сульфидогенной ассоциации микроорганизмов. Световая микроскопия. Окраска по методу Циль-Нильсона. Ув. x100

На рис. 4 видно формирующиеся и распадающиеся агрегаты микроорганизмов анаэробного ИО. Существенно больше мелких минеральных частиц находится в хлопьях ила из пилотного реактора, по сравнению с контрольным образцом, что отразилось и на седиментационных свойствах ила, т.е. на биофлукуляции. Следует отметить, что на этапе дезинтеграции иловый индекс экспериментального активного ила составлял 70...90 мл/г, в то время как на контрольной линии он достигал 250 мл/г.

На рис. 5 схематически представлен процесс гидролиза полимерных соединений хлопьев ИО. Этот процесс имеет первостепенное значение для дальнейшего развития сульфатредукторов. Кроме того, в данной схеме отображен процесс извлечения ТМ из органических комплексов и осаждения ионов металлов в сульфидной форме.



Рис. 4. Формирование агрегатов бактерий в условиях сульфидогенеза. Световая микроскопия. Окраска по методу Грамма. Ув. x100

Одним из важных процессов является агрегация частиц с расширением поверхности контакта между органической оставляющей субстрата, отмершей микробной биомассы и гидролизующими микроорганизмами. С другой стороны, их максимальный диаметр был ограничен дезинтеграцией больших агрегатов. В результате этого относительное положение индивидуальных бактерий в агрегатах непрерывно изменяется.

Характеристики компонентов микробной системы иловых осадков меняются в зависимости от двух процессов: адаптации вида микроорганизма или адаптивной динамики со сменой видов в функциональной группировке. Важно, что сообщество микроорганизмов функционирует как единое целое с кооперативными трофическими связями, определяющими план химических взаимодействий. Происходит саморегуляция микробиологической системы и влиять на эту саморегуляцию искусственно необходимо обдуманно, к тому же такой контроль нельзя считать регуляторным по отношению к определен-

ным видам бактерий в системе. Рассуждая таким образом, необходимо рассматривать не локальную герметичную систему типа лабораторного культиватора, а промышленные масштабы, например, переработка осадков и активного ила на очистных сооружениях больших городов. Обеспечение увеличения выхода биогаза

проводят путем улучшения условий метаногенеза – понижая значение pH и т.д., но это посредственно будет влиять на видовой состав самих метаногенов (гидрогенотрофных и ацетокластичных) и смежных с ними по трофическим связям групп микроорганизмов (гомоацетогенов, сульфатредукторов, денитрификаторов).

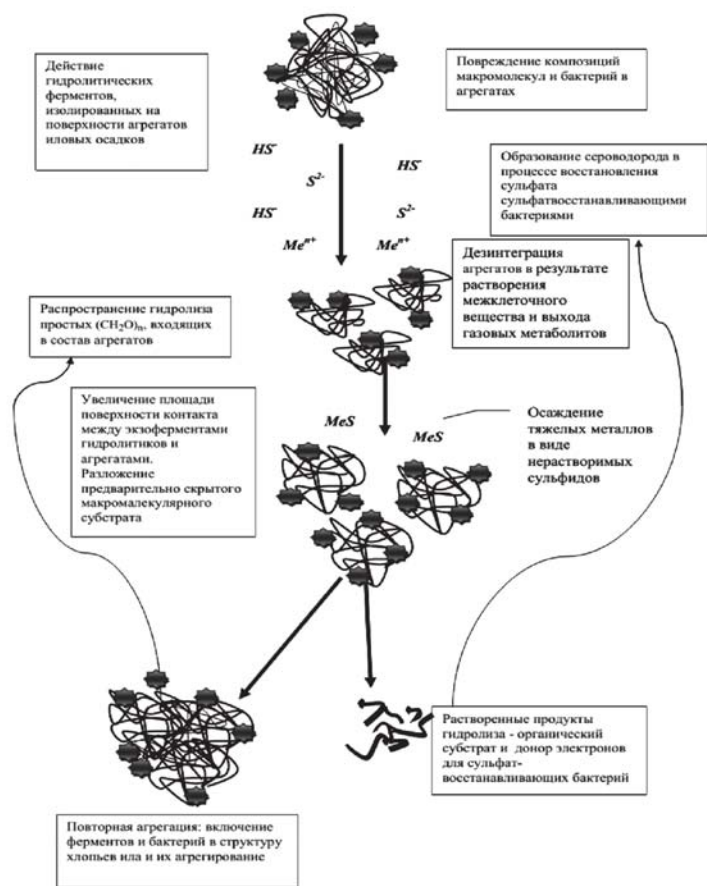


Рис.5. Обобщенная схема факторов, вовлеченных в процесс на стадии гидролиза иловых осадков в условиях сульфидогенеза

Микробное сообщество схематически можно представить как динамическую систему (рис. 6) с входными и выходными параметрами. Изменение этой системы зависит от действия на нее внешних факторов (температура, поступление питательных веществ и т.п.) и ответных реакций системы – качественные (видовое) и количественные (биомассы) изменения, выделение определенных

продуктов биосинтеза и т.п. Кроме того, такая биологическая система будет иметь ряд подсистем на уровне групп микроорганизмов или отдельных их видов со своей динамикой развития, которая входит в общий процесс функционирования системы. Соответственно эти подсистемы определяют внутренние параметры системы.

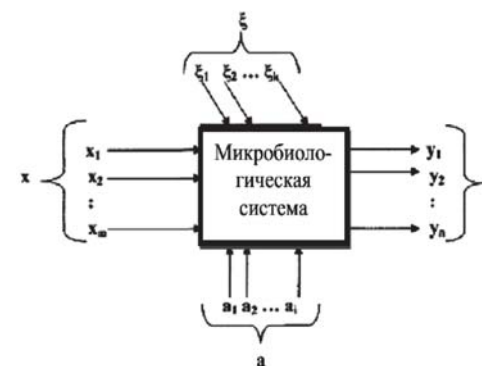


Рис. 6. Структурная схема микробиологической системы

В данном случае внутренние параметры системы  $a=(a_1, a_2, \dots, a_i)$  - кинетические характеристики подсистем. Между подсистемами есть связи, так как выходные параметры одной подсистемы входят в состав входных параметров другой подсистемы. Изменение состояния подсистемы- $m$  в данный момент времени  $t_2$  зависит от изменения состояния подсистемы- $n$  в определенный момент времени  $t_1$ . Микробиоценоз структурно изменяется в пространстве и времени – это процесс сукцессии. Эта динамика заложена в «подрядную» структуру трофических взаимоотношений между популяциями

разных микроорганизмов (подсистем), которую можно представить системой биохимических реакций и соответствующей «сопряженной» кинетикой. А параметры неопределенности  $\xi=(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ , т.е. часть входных переменных  $x=(x_1, x_2, \dots, x_m)$  и внутренних параметров системы играют важную роль в точке бифуркации при переходе сообщества на другой уровень организации, например, изменения доминирующих видов микроорганизмов при внесении новых акцепторов электронов в систему. В свою очередь, изменяется вектор выходных параметров  $y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

**Синергетика качественных биохимических трансформаций иловых осадков в процессе АМД.** В процессе АМД в условиях жизнедеятельности сульфатредукторов органические вещества (углеводы, органические кислоты) подвергаются дегидрогенизации, водород переносится на сульфаты, сульфиты или тиосульфаты, которые восстанавливаются в сероводород. Сероводород активно взаимодействует как с твердой фазой осадков, так и с имеющимися в жидкой фазе катионами. В процессе анаэробной микробиологической деструкции происходит минерализация органической составляющей иловых осадков и трансформация хеллатокомплексов с ТМ в растворимые органические соединения. Происходит

увеличение подвижности ТМ и они переходят в жидкую фракцию ИО с последующим осаждением в виде нерастворимых сульфидов, что может существенно влиять на свойства иловых осадков. Кроме того, ТМ, образуя соли с соединениями органической составляющей ИО, обмениваются на ионы кальция по механизму ионного обмена на поверхности фосфогипса. Таким образом, в процессе АМД органические хеллатокомплексы с ТМ разрушаются и образуются комплексные изоморфные соединения сульфидов металлов: сульфиды железа (марказиты), цинка (сфалерит), никеля и т.д. Сравнительные элементный и фазовый анализы образцов иловых осадков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав образца твердой фазы иловых осадков после АМД

Элементный состав		Фазовый состав Рентгеновская дифракция
Рентгенофлуоресцентный анализ	Микроанализ	
1	2	3
Si P S Ca	Si	JCPDS 74-1433 (гипс)
Cr Mn Fe	S	JCPDS 77-1060 (кварц)
Ni Cu Zn Pb	Ca	JCPDS 37-475, 74-1051 (сульфиды железа)
		JCPDS 11-293 (брушит)
		JCPDS 87-952 (оксид фосфора (V))
		JCPDS 86-2342 (кальцит)
		JCPDS 40-660 (маскагнит)
		JCPDS 79-43 (сульфид цинка)
		JCPDS 26-1116, 65-3928 (сульфиды меди)
		JCPDS 15-783 (сульфид свинца)
		JCPDS 65-395 (сульфид никеля)
		JCPDS 10-345 (сульфид хрома)

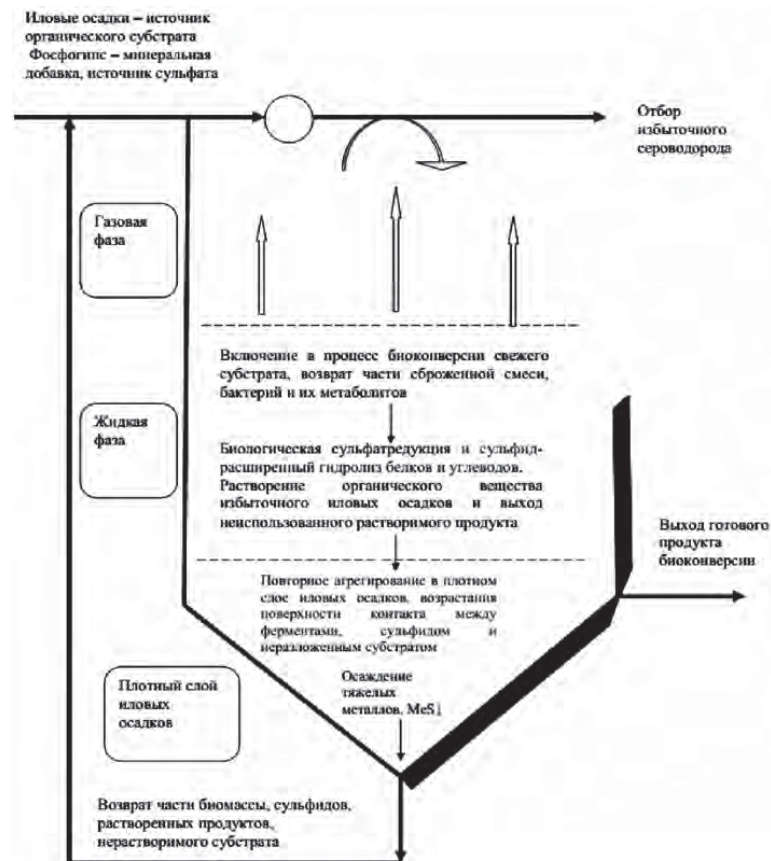


Рис. 7. Блок-схема пространственного распределения в биореакторе при биохимической детоксикации ИО в условиях биосульфидогенеза

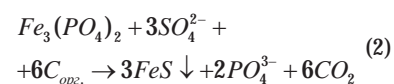
Осаждение ТМ в форме сульфидов является важным для стабильного функционирования самого сульфидогенного сообщества в биореакторе. Этот фактор нужно учитывать при разработке биотехнологических систем. На рис. 7 схематически представлены основные вещественные потоки, связанные с процессом де-

токсикации ИО совместно с гипсовыми отходами.

Они характеризуют динамику развития сульфидогенного сообщества в пространстве биореактора с учётом процесса возврата части сброженного субстрата в технологическую систему и протекания флокуляционных процессов в биомассе ИО.

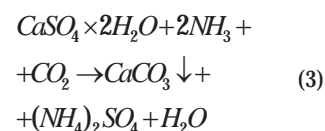


Вследствие АМД фосфаты железа разрушаются и происходит образование сульфида железа. Освободившиеся фосфат-ионы химически связываются с кальцием, а также образуются оксиды фосфора. Жидкая фаза иловых осадков обогащается легко усвояемой растениями формой фосфора. Можно выделить следующие механизмы извлечения фосфатов из стоков и иловых осадков: в анаэробной среде и, особенно, при отсутствии конкурирующих денитрификаторов, фосфораккумулирующие бактерии иловых осадков способны к изъятию органики (затрачиваемая при этом энергия вырабатывается в результате распада внутриклеточных полифосфатов и выделения во внешнюю среду ортофосфатов) замещение металлокомплексов в микробных клетках на  $Ca^{2+}$  фосфогипса по механизму ионного обмена стимулирует активность экзополифосфатазы, вследствие чего высвобождающийся ортофосфат образует с катионами  $Ca^{2+}$  комплексы, которые «выбрасываются» из клетки в окружающую среду посредством транспортных систем; в процессе метаболизма сульфатредукторов происходит выделение сероводорода, который влияет на активность ферментных систем клеток активного ила, вследствие чего происходит выделение металлфосфатных комплексов и осаждение ионов ТМ с сероводородом в форме сульфидов:



При этом фосфат-ионы выделяются в жидкую фазу. Было установ-

лено, что формирующийся в процессе карбонатного дыхания микроорганизмами углекислый газ связывался с кальцием в карбонат кальция (кальцит) (табл. 1). При этом аммиак, который выделится при разложении соединений белковой природы, взаимодействует с ионами сульфата с образованием сульфата аммония (маскагнит) (табл.1). В общем виде эти процессы можно представить в виде следующей химической реакции:



Следует отметить, что для неорганических соединений четко соблюдается термодинамическая последовательность окислительно-восстановительных потенциалов как предпочитаемых акцепторов. Поэтому последовательность использования акцепторов электронов включает: восстановление нитратов или денитрификацию → восстановление соединений серы в сероводород или сульфидогенез, что сопряжено с процессом выделения фосфора из клеток фосфатаккумулирующих микроорганизмов ила → восстановление углекислоты в метан или метаногенез. Для лучшего прохождения процесса сульфидогенеза необходимо предварительно проводить денитрификацию стоков и их осадков в отдельном блоке биоочистки.

Анализ всех проходящие во время АМД процессов с точки зрения их простой суммации является ошибочным. Они определяют новый уровень самоорганизации системы с приобре-

тением новых качественных характеристик, которые обуславливают экологическую безопасность продукта обработки иловых осадков, его обезвреживание и улучшение качественных характеристик с точки зрения применения в аграрном комплексе. В этом и заключается синергизм как эффект «2+2=5», что означает стремление достигчь

таких результатов, которые не являются «нулевой суммой слагаемых». И каждая биохимическая реакция протекает во взаимодействии с различными факторами и другими реакциями (химическими, физическими, биологическими) в системе, обуславливая и предопределяя друг друга, формирует наиболее оптимальный вариант развития системы.

### Выводы

В результате процесса накопления ИО на иловых картах и при их непосредственном внесении в почву без предварительной обработки необходимо рассматривать комплексное воздействие компонентов ИО на подсистемы экологической системы. Основными токсикантами, которые входят в состав ИО являются ТМ. В результате миграции и аккумуляции ТМ в системе «ИО - почва - водные объекты - биота» на длительном промежутке времени может происходить нарушение энергоэлементных потоков. Для разработки биотехнологии обезвреживания ИО использованы происходящие в природе процессы микробиологического восстанов-

ления сульфатов с образованием сероводорода. В процессе биосульфидной обработки органические хелато-комплексы с ТМ разрушаются и образуются устойчивые соединения сульфидов металлов. Так происходит связывание ТМ в недоступную для растений форму, поскольку перенос по корневой системе характерен для водорастворимой и обменной форм металлов. В процессе АМД в условиях сульфидогенеза при сосаждении сероводорода и ионов ТМ происходит биологическое восстановление фосфатов. Значительная часть освободившихся фосфат-ионов переходит в жидкую фазу иловых осадков с удалением из биотехнологической системы. Актуальным является дальнейшее развитие синергетической теории управления сложными природно-техногенными системами. При этом свойства экосистемы, ее синергетические характеристики проявляются при взаимодействии с факторами внешней среды, которая рассматривается как интегральная совокупность сопредельных сред. Антропогенный фактор (техносреда) рассматривается как одна из сопредельных сред с флуктуационными процессами, которые в ней протекают. Следует отметить, что невозможно провести границу между сопредельными средами и экосистемой. Следовательно, следующим этапом становления синергетики экологических процессов является формирование синергии проектирования экобезопасных технологических процессов.

### Литература

1. Малахова С. Д. Агроэкологическое обоснование почвенного пути утилизации осадков городских сточных вод: на примере г. Калуги: дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.00.16 «Экология» / С. Д. Малахова. – Калуга, 2007. – 279 с.

## ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН КУЯЛЬНИЦЬКОГО ЛИМАНУ Й НЕОБХІДІСТЬ ЙОГО ПОПОВНЕННЯ МОРСЬКОЮ ВОДОЮ

Лозовицький П.С.<sup>1</sup>, Томахін М.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління,  
м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп.. 2

<sup>2</sup>Міністерство екології та природних ресурсів України,  
м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35

Наведено історичне та сучасне значення основних параметрів екологічного стану Куяльницького лиману (коливання рівня води відносно моря з 1860 р., зміна хімічного складу пелітів і ропи, порівняння антропогенного забруднення ропи лиману, води Одеської затоки Чорного моря й річки Великий Куяльник за трофо-сапробіологічними показниками). Показано незадовільний екологічний стан Куяльницького лиману на сьогодні, обґрунтовано необхідність підвищення рівня ропи в лимані за рахунок морської води.

**Экологическое состояние Куяльницкого лимана и необходимость его пополнения морской водой. Лозовицкий П.С., Томахин М.Л.** Изложены историческое и современное значения основных параметров экологического состояния Куяльницкого лимана (колебания уровня воды относительно моря с 1860 г., изменение химического состава пелитов и рассола, сравнение антропогенного загрязнения рассола лимана, воды Одесского залива Черного моря и реки Большой Куяльник по трофо-сапробіологическим показателям). Показано неудовлетворительное экологическое состояние Куяльницкого лимана на сегодня и обоснована необходимость повышения уровня рассола в лимане за счет морской воды.

**Ecological condition Kuyal'nitskogo estuary and the need to replenish the salt water. Lozovitsky P.S., Tomahyn M.L.** Outlines the historical and contemporary values of the basic parameters of environmental status Kuyal'nitskogo estuary (water level fluctuations with respect to the sea since 1860, changing the chemical composition of pelites and brine, brine comparison of anthropogenic pollution of the estuary, water Odessa Bay of the Black Sea and the river Big Kuyalnik trophy-saprobіological indicators). Shown poor ecological condition Kuyal'nitskogo whether Mans today and the necessity of increasing the level of brine in the estuary due to sea water.

**Куяльницький** (від крим. *Kuyalnik* — *густий*) або **Андріївський** — лиман на північно-західному узбережжі Чорного моря, розташований на північ від Одеси: площа 52 км<sup>2</sup> проти 60 у 1970 р., довжина — 28 км, ширина — 3 км, середня глибина — близько 1 м (у минулому 3 м), максимальна — 2,8 м. Лиман відокремлений від моря піщаним пересипом до 3 км завширшки і довжи-

ною 2,5 км. Це лиман впадає річка Великий Куяльник найнижча точка України: 6 метрів нижче рівня моря.

У минулому на місці Куяльницького лиману було гирло річки Великий Куяльник, яке з часом перетворилося на затоку Чорного моря і поступово через відкладення річкового й морського піску тут сформувалася пересип, а затока перетворилася на лиман. Відділення від моря відбулося

- Савич В.И. Влияние тяжелых металлов на процессы деградации почв / В.И. Савич, В.А. Раскатов, В.А. Седых, А.К. Саидов // *Арго XXI*. – 2011. – № 10–12. – с. 46 – 48.
- Манская С. М. Геохимия органического вещества / С. М. Манская, Г. В. Дроздова. – М.: Наука, 1964. – 314 с.
- Антонова Г. Г. Содержание подвижных форм микроэлементов в освоенных торфяных почвах урочища «чисть» Псковской области / Г. Г. Антонова, Н. П. Вардья, Р. И. Дрель, Р. И. Курбатова [и др.]. – В кн: Микроэлементы в почве. Ленинград: Пушкин, 1974. – С. 23 – 29.
- Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д. С. Орлов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. – 325 с.
- Воробьева Р. П. Использование осадков сточных вод / Р. П. Воробьева, А. С. Давыдов, Л. Ф. Новикова, Е. А. Пивень [и др.] // *Агрехимический вестник*. 2000. – № 6. – С. 36–37.
- Исследование глубокой минерализации осадка сточных вод Донецких очистных сооружений / В. Н. Чернышев, В. И. Нейздойминов, В. Ф. Кизаев [и др.] // *Вестник ДонНАСА*. – Макеевка : ДонНАСА, 2010. – Вып. 6 (86). – С. 163–170.
- Благодарная Г. И. Развитие технологии анаэробной обработки осадков как источник альтернативной энергии на муниципальных очистных сооружениях / Г. И. Благодарная, А. А. Шевченко // *Коммунальное хозяйство городов : научно-технический сборник*. – Харьков : ХНАГХ, 2009. – № 88. – С. 117–122.
- Kim Jongmin. Combined anaerobic/aerobic digestion: effect of aerobic retention time on nitrogen and solids removal / Jongmin Kim, John T. Novak // *Infilco Degremont Inc., Richmond, VA 23059, USA. Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation Water Environ Res.* – 2012. – № 84 (9). – P. 753–760.
- Полетаева Т. Н. Утилизация осадков сточных вод малых очистных сооружений / Т. Н. Полетаева // *Коммунальное хозяйство городов : научно-технический сборник*. – Харьков : ХНАГХ, 2006. – № 72. – С. 151–154.
- Vermicomposting of wastewater sludge from paper-pulp industry with nitrogen rich materials / C. Elvira, L. Sampedro, J. Dominguez [et al.] // *Soil Biol. Biochem.* – United Kingdom : Elsevier Limited, 1997. – Vol. 29, № 314. – P. 759–762.
- Лукиных Н. А. Проблема обработки осадков городских сточных вод / Н. А. Лукиных, И. С. Туровский // *Городская канализация (обработка осадков городских сточных вод)*. – М. : ОНТИ АКХ, 1970. – С. 3–13.
- Ушаков Д. И. Научное обоснование гигиенических принципов и критериев безопасного использования осадков сточных вод : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. мед. наук : спец. 14.00.07 «Гигиена» / Д. И. Ушаков. – Москва, 2009. – 24 с.
- Гончарук В. И. Санитарная охрана почвы от загрязнения химическими веществами / В. И. Гончарук. – К: «Здоров'я», 1977. – С. 83–94.
- Бобух Л. В. Развитие теоретических основ процессов изменения энергоэлементного состояния физических и биологических систем / Л. В. Бобух, К. А. Бобух, Т. А. Бобух // *Инженерная экология*. – М. : ГУП ППП Типография «Наука» АИЦ РАН, 2004. – № 3. – С. 56–60.