

Особенности заселения почвенными водорослями отвалов фосфогипса

Почвенные водоросли одними из первых поселяются на различных техногенных субстратах. Являясь эксплерентами, обладая низкой конкурентной мощностью и высокой энергией размножения, они способны быстро осваивать незаселенные среды [1—3]. Вместе с тем особенности водорослевых группировок служат дополнительной характеристикой изменяющегося субстрата, позволяя отследить первичные сукцессионные процессы, лежащие в основе их естественного восстановления.

Гомельский химический завод (ГХЗ) — одно из крупнейших предприятий химической промышленности Беларуси, производит серную и фосфорную кислоты, комплексные азотно-фосфорно-калийные удобрения, гранулированный аммофос, аммонизированный суперфосфат, фтористые соли, фунгициды и т.д. На ГХЗ применяется технология обработки апатитового концентрата, приводящая к образованию твердых фосфогипсовых отходов [4], которых за 45 лет функционирования завода накоплено около 18 млн т.

Целью данной работы было изучение последовательности заселения почвенными водорослями отвалов фосфогипса.

Отбор образцов для исследования проводили в июле 2008 г. по общепринятой в почвенной альгологии методике [5] на отвалах фосфогипса разного возраста, отличающихся друг от друга наличием или отсутствием на поверхности растений:

- I категория — свежие отвалы (I): полное отсутствие высших растений;
- II категория — отвалы среднего возраста: наличие травянистой растительности, всходы древесных растений; отбор проб осуществляли на трех типах участков: без растений (IIa), с наличием мохового покрова (IIб), с травянистыми растениями и мхами (IIв);
- III категория — старые отвалы (III): присутствие травянистых и древесных растений.

Качественный состав водорослей выявляли с помощью чашечных культур со «стеклами обрастания» [3, 5], идентификацию осуществляли с использованием микроскопа Nikon Eclipse 80i, таксономическое положение объектов приведено по системе И.Ю. Костикова [6]. Для каждого представителя определяли сумму баллов обилия на одном стекле обрастания, рассчитывая интегральный показатель развития альгогруппировок (ИПР) [7]. Состав жизненных форм определяли в соответствии с классификацией, разработанной Э.А. Штиной и М.М. Голлербахом [3]. Статистическую обработку данных проводили с применением программы Statistica 6.0.

В ходе проведенных исследований на отвалах фосфогипса были выявлены представители 25 родов почвенных водорослей, относящиеся к 18 семействам, 13 порядкам, 5 классам отделов Cyanophyta, Xanthophyta и Chlorophyta.

Наибольшим флористическим разнообразием характеризовался отдел зеленых водорослей — 62,5% всех видов; сине-зеленых — 34,4%, желто-зеленых — 3,1%. Большинство семейств отличались небольшим количеством представителей (1—2 вида), за исключением семейств Merismopediaceae, Nostocaceae и Chlorellaceae (по 3). Ниже приведен список почвенных водорослей исследуемых субстратов с указанием категорий отвалов, на которых они были выявлены:

Отдел Cyanophyta, класс Cyanophyceae, порядок Chroococcales, семейство Merismopediaceae

1. *Synechocystis salina* Wisl. — IIa, IIв, III.
2. *Merismopedia* Meyen — IIв.
3. *Microcystis* (*Aphanocapsa*) *pulverea* (Wood) Forti in De Toni — IIa, III.

Порядок Oscillatoriales, семейство Phormidiaceae

4. *Phormidium dimorphum* Lemm — III.

Порядок Nostocales, семейство Microchaetaceae

5. *Tolypothrix* Kütz. ex Born. et Flah. — IIa, III.

Семейство Nostocaceae

6. *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flah. — III.
7. *Nostoc punctiforme* (Kütz.) Hariot — III.
8. *Nostoc paludosum* Kütz. — III.

Дополнение к классу Cyanophyceae: Leptolyngbyoideae

9. *Leptolyngbya foveolarum* (Rabenh. ex Gom.) Anagnost. et Kombræk — III.

10. *Leptolyngbya tenuis* (Gom.) Anagnost. et Kombrék — III.

11. *Leptolyngbya molle* (Kütz.) Gom. — III.

Отдел Xanthophyta, класс Xanthophyceae, порядок Mischococcales, семейство Heterococcaceae

12. *Heterococcus* Chod. — IIв, III.

Отдел Chlorophyta, класс Chlorophyceae, порядок Volvocales, семейство Chlamydomonadaceae

13. *Chlamydomonas* Ehr. — I, IIв, III.

14. *Chlamydomonas oblongella* Lund — IIа, IIб, IIв.

Дополнение к семейству Chlamydomonadaceae

15. *Palmellopsis* Korsch. — IIа.

Порядок Chlorococcales, семейство Chlorococcaceae

16. *Chlorococcum* Menegh. — IIв, III.

17. *Tetracystis aggregata* Broun et Bold — IIа, IIб, IIв.

Порядок Protosiphonales, семейство Chlorosarcinaceae

18. *Chlorosarcinopsis* Hernd. — I, IIа, III.

Семейство Neosporangiococcaceae

19. *Neosporangiococcum* Deason — IIв.

Порядок Scenedesmales, семейство Bracteacoccaceae

20. *Bracteacoccus minor* (Chod.) Petrovб — III.

Семейство Oocystaceae

21. *Scotiellopsis rubescens* Vinatz. — I, IIв, III.

Семейство Ankistrodesmaceae

22. *Keratococcus bicaudatus* (A. Braun) B. Petersen — IIб.

Класс Trebouxiophyceae, порядок Microthamniales, семейство Leptosiraceae

23. *Leptosira terricola* (Bristol) Printz — IIв, III.

Семейство Microthamniaceae

24. *Microthamnion kuetzingianum* Ndg. — III.

Порядок Trebouxiales, семейство Myrmeciaceae

25. *Myrmecia bisecta* Reisiigl — I, IIа.

26. *Elliptochloris Tschermak-Woess* — I, IIа.

Порядок Chlorellales, семейство Chlorellaceae

27. *Chlorella minutissima* Fott et Novбковб — IIа, IIб, III.

28. *Chlorella vulgaris* Beijir — I, IIа, IIб, IIв, III.

29. *Chlorella ellipsoidea* Gern — I, IIа.

Семейство Stichococcaceae

30. *Stichococcus bacillaris* Ndg — IIв.

Порядок Choricystidales, семейство Choricystidaceae

31. *Pseudococcomyxa simplex* (Mainx) Fott — I, IIа, IIб, IIв, III.

Класс Ulvophyceae, порядок Chaetopeltidales, дополнение к семейству Hormotiellopsidaceae

32. *Fernandinella alpina* Chod. — IIа.

Особенности изменения состава и степени обилия группировок почвенных водорослей на стеклах обрастания представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, на всех категориях отвалов, кроме старовозрастных, преобладали представители отдела Chlorophyta (76,9—100%). Именно зеленые водоросли чаще всего являются первопоселенцами нарушенных почв и антропогенных безжизненных субстратов [2, 8].

На участках средневозрастных отвалов фосфогипса со мхами наблюдалось резкое уменьшение числа почвенных водорослей, что, возможно, обусловлено их более низкой конкурентной способностью по сравнению с другими растениями, в том числе и мхами. Появление представителей отдела Xanthophyta на участках средневозрастных отвалов с растениями и на старовозрастных отвалах фосфогипса указывает на некоторое улучшение условий существования водорослей [9]. На старых отвалах фосфогипса отмечено усложнение таксономической структуры водорослей, в основном за счет резкого увеличения доли сине-зеленых водорослей в составе альгогруппировок (47,6%). Представители отдела Cyanophyta, отличаясь высокой устойчивостью к действию неблагоприятных факторов, не очень легко адаптируются к условиям среды и постепенно завоевывают свое место на зарастающих антропогенных субстратах. Также следует отметить, что сине-зеленые водоросли предпочитают нейтральную и слабощелочную среду обитания [3], а отвалы фосфогипса характеризуются достаточно низкими значениями pH.

Уровень развития водорослей — интегральный показатель развития альгогруппировок (ИГР) — на всех категориях отвалов фосфогипса изменялся пропорционально с изменением количества выявленных видов. Для оценки сходства видового состава альгогруппировок на отвалах фосфогипса различного возраста использовали метод ранговой корреляции. Предварительно на основании полученных данных провели оценку встречаемости каждого вида

водорослей. Для анализа использовали те из них, встречаемость которых была равна или ниже 80% (все, кроме *Chlorella vulgaris* и *Pseudococcomyxa simplex*) [7]. По расчетам коэффициентов ранговой корреляции выделили 5 основных и 2 переходные группы водорослей (табл. 1), представители которых тесно взаимосвязаны (обнаружение одного вида из группы указывает на присутствие на фосфогипсовом субстрате остальных). Сопоставление выделенных групп со встречаемостью водорослей на отвалах фосфогипса позволило выявить приуроченность данных организмов к отвалам фосфогипса различных категорий (табл. 2).

Так, представители родов *Elliptochloris* sp. и *Chlorosarcinopsis* sp. (группа I, рис. 2А) являлись обязательными обитателями свежих отвалов фосфогипса, где процессы колонизации субстрата находились на ранних стадиях. Эти организмы относятся к Ch-жизненной форме и, следовательно, отличаются устойчивостью к различным экстремальным условиям [3, 10].

Типичными для участков средневозрастных отвалов фосфогипса без растений (IIa) были *Palmellopsis* sp., *Fernandinella alpina* и *Microcystis pulverea* (рис. 2Б), а также *Myrmecia bisecta* (в составе переходной группы между отвалами фосфогипса I и IIa категорий), *Chlamydomonas oblongella* и *Tetracystis aggregata* (в составе переходной группы между отвалами фосфогипса IIa и IIб категорий). Большинство представителей данной группы, включая и переходные виды, способны к образованию слизи, которая не только защищает клетки водорослей от проникновения различных токсикантов, но и способствует склеиванию частиц минерального субстрата. К участкам средневозрастных отвалов фосфогипса со мхами (IIб) были приурочены *Keratococcus bicaudatus* и *Chlorella ellipsoidea* (рис. 2В), а также *Tetracystis aggregata*, который с одинаковой частотой встречаемости отмечен на отвалах фосфогипса IIa и IIб категорий.

Комплекс видов, тяготеющих к средневозрастным отвалам фосфогипса с травянистыми растениями и мхами (IIв), был следующим: *Chlamydomonas* sp., *Chlorococcum* sp., *Scotiellopsis rubescens*, *Merismopedia* sp., *Neospongiococcum* sp., *Stichococcus bacillaris* и *Heterococcus* sp. (рис. 2Г). Перечисленные представители относятся к различным жизненным формам (С-, Ch-, X-, H-) и не имеют четко выраженных общих черт. В целом на средневозрастных отвалах фосфогипса наблюдалась дифференциация групп водорослей в зависимости от особенностей формирования растительного покрова высшими растениями, при этом часто виды групп различных участков средневозрастных отвалов фосфогипса взаимозаменяли друг друга.

Старые отвалы отличались наличием следующих водорослей (группа III): *Leptosira terricola*, *Leptolyngbya molle*, *Leptolyngbya tenuis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Microthamnion kuetzingianum*, *Tolypothrix* sp., *Phormidium dimorphum*, *Bracteacoccus minor*, *Nostoc paludosum*, *Nostoc punctiforme*, *Nostoc linckia* (рис. 2Д). Практически все перечисленные представители, кроме *Bracteacoccus minor*, являются нитчатыми или колониальными водорослями, развитие которых способствует механическому скреплению частиц формирующегося органического вещества, многие способны к образованию слизи, содействующей склеиванию частиц. Экологическая структура альгогруппировок данной категории отвалов расширилась за счет представителей CF- (теневыносливые виды, требовательные к воде, на поверхности почвы развиваются под укрытием высших растений), P- и PF-жизненных форм (устойчивы к засухе благодаря свойствам протопласта, занимают пространства между растениями, оплетая частицы субстрата) [3, 10]. Следует отметить, что на данном этапе заселения фосфогипса водорослями наблюдается появление представителей отдела *Cyanophyta*, способных к фиксации атмосферного азота, что свидетельствует о некотором улучшении условий существования водорослей [5].

Для двух видов водорослей (*Synechocystis salina* и *Chlorella minutissima*) не выявлена значимая корреляционная связь с какой-либо из описанных выше групп. Они могут встречаться спорадически на отвалах разной степени сукцессии.

В ходе проведенных исследований на отвалах фосфогипса были выявлены представители 25 родов почвенных водорослей, относящиеся к 18 семействам, 13 порядкам, 5 классам отделов *Cyanophyta*, *Xanthophyta* и *Chlorophyta*. Статистически установлена приуроченность различных видов водорослей к разновозрастным отвалам фосфогипса. Смена состава водорослей фосфогипсовых субстратов происходит по схеме: *Elliptochloris* sp., *Chlorosarcinopsis* sp. (свежие отвалы) ? *Palmellopsis* sp., *Fernandinella alpina*, *Microcystis pulverea*, *Chlamydomonas oblongella* и *Myrmecia bisecta* (средневозрастные отвалы без растений) ? *Keratococcus bicaudatus*, *Chlorella ellipsoidea* (средневозрастные отвалы со мхами) ? *Chlamydomonas* sp., *Chlorococcum* sp., *Scotiellopsis rubescens*, *Merismopedia* sp., *Neospongiococcum* sp., *Stichococcus bacillaris*, *Heterococcus* sp. (средневозрастные отвалы с травянистыми растениями и мхами) ? *Leptosira terricola*, *Leptolyngbya molle*,

Leptolyngbya tenuis, *Leptolyngbya foveolarum*, *Microthamnion kuetzingianum*, *Tolypothrix* sp., *Phormidium dimorphum*, *Bracteacoccus minor*, *Nostoc paludosum*, *Nostoc punctiforme*, *Nostoc linckia* (старые отвалы).

Последовательно происходит и изменение экологической структуры альгогруппировок различных категорий отвалов фосфогипса: начинают заселение представители Ch-жизненной формы (свежие отвалы), затем наблюдается постепенное расширение состава жизненных форм — C-, Ch-, X-, H-жизненные формы (средневозрастные отвалы), на более поздних этапах сукцессии доминирующее положение занимают представители P-, PF- и CF-жизненных форм (старые отвалы).

Изменение систематической и экологической структуры группировок почвенных водорослей при переходе от свежих отвалов фосфогипса к старовозрастным сопровождается и последовательным увеличением степени развития альгогруппировок (ИПР), что обусловлено в том числе и постепенным расширением таксономического разнообразия водорослей. Выявлены сквозные виды водорослей, способные существовать на всех категориях отвалов: *Chlorella vulgaris* и *Pseudococcomyxa simplex*.

Полученные данные свидетельствуют о том, что по составу почвенных водорослей, обнаруженных на отвалах фосфогипса, можно судить о «возрасте» последних; выявление одного вида какой-либо из выделенных групп водорослей указывает на присутствие на фосфогипсовом субстрате остальных.

Бачура Юлия
Храмченкова Ольга
Цуриков Андрей
Номер 11(81) 2009