

Л. Б. НЕГАНОВА, Р. И. ЛАНИНА

РАЗВИТИЕ ВОДОРОСЛЕЙ НА ОТВАЛАХ СОКОЛОВСКО-САРБАЙСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В КАЧЕСТВЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ СВОЙСТВ СУБСТРАТА

Открытые горные разработки полезных ископаемых приводят к необратимым нарушениям растительного и почвенного покрова на больших площадях, на месте которых возникают обширные «индустриальные пустыни» — промышленные отвалы. Возможность вторичного использования этих площадей в народном хозяйстве осложняется тем, что поверхность их, как правило, сформирована минеральными субстратами, не затронутыми процессами выветривания и почвообразования, зачастую фитотоксичными и малопригодными для развития высших растений (Моторина с соавт., 1969; Бекаревич с соавт., 1971; Терехова, Ланина, Фоменко, 1974 и др.). Естественное зарастание их идет медленно.

Отвалы Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината (ССГОК) находятся в подзоне засушливых разнотравно-ковыльных степей Северо-Западного Казахстана (г. Рудный, Кустанайская обл.) на южных суглинистых и супесчаных черноземах. Климат района засушлив и резко континентален. В значительной степени эти свойства усугубляет напряженность микроклиматических процессов на отвалах, особенно на границе сред «атмосфера — субстрат», куда в первую очередь попадают семена и споры растений (Ланина, Терехова, 1971).

Отвалы ССГОК представлены разновозрастными отсыпками, поверхность которых сформирована породами различного геологического возраста: четвертичного (супесчано-суглинистые образования), третичного (чеганские глины, кремнистые и глинистые опоки) и мелового (кварцевые пески). Породы третичного и мелового возраста из-за неблагоприятных физико-химических и механических свойств их грунтов и, главным образом, из-за отсутствия азота и других элементов питания, как правило, не зарастают вовсе или встречающиеся на них растения единичны. В целом рас-

Таблица 1
Состав водорослей (число видов) на участках отвалов, лишенных высших растений

Субстрат. Категория пригодности для биологической рекультивации*	Сине-зеленые		Зеленые	Желто-зеленые	Диатомовые	Всего	Виды, доминанты и субдоминанты
	всего	в том числе осцилляторных					
Четвертичные супеси. Потенциально плодородный, пригодный	8	5	2	2	2	14	<i>Phormidium molle</i> , <i>Plectonema nostocorum</i> , <i>Oscillatoria brevis</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Ph. tenuissimum</i> , <i>Chlorococcum humicola</i>
Глауконитово-кварцевый песок (супесь). Потенциально плодородный, пригодный	3	3	4	1	2	10	<i>Plectonema nostocorum</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Ph. foveolatum</i>
Неогеновый кварцевый песок. Малоприводный	5	5	2	1	1	9	<i>Plectonema nostocorum</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Ph. jadinianum</i> , <i>Chlorella minutissima</i>
Чеганская глина (средний су-глинок). Неприводный	—	—	2	—	—	2	<i>Chlorococcum humicola</i> , <i>Chlorella minutissima</i>
Глинистая опока (средний су-глинок). Неприводный	—	—	1	—	—	1	<i>Chlorella minutissima</i>
Меловой кварцевый песок. Неприводный	—	—	—	—	—	—	Нет водорослей
Опока—меловой песок—четвертичные супеси. Приводный	7	7	3	—	2	12	<i>Phormidium uncinatum</i> , <i>Ph. coarctatum</i> , <i>Microcoleus vaginatus</i> , <i>Chlorococcum humicola</i>

* Категория пригодности субстратов в табл. 1 и 3 приведена по данным: Э. Б. Терехова, Р. И. Ланина (1972), С. Я. Левит (1972).

ительность отвалов ССГОК представлена отдельными группировками, весьма неустойчивыми и несформированными, имеющими ограниченный видовой состав и незначительную степень покрытия. В зарастании отвалов четко выражена приуроченность растительных группировок к определенным грунтам. Аналогичная зависимость обнаруживается и в распространении почвенных водорослей, изучение состава которых проведено на отвалах Соколовского железорудного карьера ССГОК в 1972—1973 гг.

Состав водорослей изучался методом водных и чашечных культур или прямым микроскопированием прежде всего на субстратах участков отвала, сложенных разными породами, но лишенных высших растений (табл. 1). Быстрее всего водоросли осваивают участки с четвертичными грунтами (суглинки и супеси). По числу встречаемых видов они сходны с участками, заросшими высшими растениями. Слабее осваиваются водорослями неогеновые пески, малообеспеченные элементами питания и вследствие легкого механического состава подверженные водной и ветровой эрозии. Поэтому здесь развиваются немногие виды водорослей, главным образом осцилляториевые, способные выдерживать недостаток влаги и элементов питания. Хуже всего развитие водорослей идет на третичных и меловых грунтах, характеризующихся сильнокислой реакцией среды (рН 2,5—3,0), неблагоприятной для формирования водорослевых группировок. Поэтому меловые пески совсем не заселены водорослями, а на чеганской глине и глинистой опоке развивались только убиквисты из одноклеточных зеленых и желто-зеленых. Незначительная примесь четвертичных отложений улучшает физико-химические свойства грунтосмеси из пород третичного и мелового возраста, что проявляется в обогащении видового состава водорослевых группировок.

На зарастание отвалов в степной зоне Казахстана и распределение формирующихся растительных сообществ существенно влияет и ветровой режим (Терехова, Ланина, Фоменко, 1974). Ветры, достигающие большой силы, усиливают испарение с поверхности отвала, ожесточая и без того напряженный водный режим. Поэтому отвалы зарастают специфическими, экологически выносливыми видами высших растений, различными в зависимости от эдафических свойств грунтосмесей и форм мезорельефа. Наиболее распространены на отвалах полынь Маршалла с донником белым и желтым, вейник наземный, астрагал датский, элимус гигантский, в корнеобитаемой зоне которых изучались развивающиеся группировки водорослей.

Наблюдения в культурах и прямое микроскопирование позволили обнаружить на всех изученных участках 37 видов водорослей. Особенностью их группировок является преобладание осцилляториевых (19 видов), особенно рода *Phormidium*. Доминантами водорослевых группировок повсеместно являются *Phormidium foveolatum* и *Plectonema postocorum*. По видовому разнообразию несколько выделяются участки с доминированием полыни Маршалла

Таблица 2
Количество видов водорослей на зарастающих участках отвала Соколовского железорудного карьера

Доминант растительных ассоциаций	Сине-зеленые		Зеленые	Желто-зеленые	Диатомовые	Всего	Виды доминанты и субдоминанты
	всего	в том числе осцилляториевых					
Польна Маршалла (<i>Artemisia marschalliana</i>)	11	9	2	1	1	15	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Ph. uncinatum</i> Lyngbya aergineocerulea, <i>Microcoleus vaginatus</i> f. <i>polytrichoides</i> , <i>Plectonema nostocorum</i>
Донник желтый (<i>Melilotus officinalis</i>)	8	7	2	—	1	11	<i>Phormidium foveolarum</i> , <i>Plectonema nostocorum</i>
Вейник наземный (<i>Calamagrostis epigeios</i>)	10	8	3	—	3	16	<i>Calothrix elenkinii</i> , <i>Phormidium dimorphum</i> , <i>Ph. foveolarum</i> , <i>Ph. molle</i>
Польна эстрагон (<i>Artemisia dracunculus</i>)	3	3	2	—	3	8	<i>Phormidium foveolarum</i> , <i>Plectonema nostocorum</i> , <i>Navicula mitica</i> , <i>Navicula mitica</i> f. <i>nivalis</i>
Элимус гигантский (<i>Elymus giganteus</i>)	10	6	1	—	2	13	<i>Phormidium foveolarum</i> , <i>Plectonema nostocorum</i> , <i>Navicula mitica</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i>
Астрагал датский (<i>Astragalus danicus</i>)	10	9	1	—	1	12	<i>Phormidium foveolarum</i> , <i>Plectonema nostocorum</i> , <i>Oscillatoria brevis</i>
Вершина откоса, незаросшее место	3	2	2	1	—	6	<i>Nodularia harveyana</i> , <i>Chlorella minutissima</i> , <i>Botrydopsis arhiza</i>

и вейника наземного (табл. 2). На участках под вейником, заросли которого обычно сосредоточены в небольших понижениях, в числе субдоминантов водорослевых группировок встречается азотфиксирующая водоросль — *Calothrix elenkinii*. Под полынью Маршалла и астрагалом среди субдоминантов обнаружен *Microcoleus vaginatus*, который в массе встречается на такырах и многих пустынных и засоленных почвах Средней Азии и Западной Сибири (Базилевич, Голлербах и др., 1953; Штина и Большев, 1960; Пивоварова, 1967) и часто является пионером при освоении минеральных, особенно глинистых субстратов (Голлербах, Штина, 1969). Виды рода *Phormidium* (*Phormidium tenue*, *Ph. subfuscum*, *Ph. cogium*, *Ph. interrotum*, *Ph. jadinianum* распространены на разных участках отвала. Редкими видами среди обнаруженных водорослей являются *Gloeocapsa minor* и *Oscillatoria tenuis*, встреченные под полынью Маршалла, *Pseudoanabaena catenata* — под донником, *Schizotrix lardacea* и *Sch. lenormandiana* — под астрагалом. Сине-зеленые водоросли из порядка *Nostocales* распространены в небольшом количестве почти повсеместно и в основном представлены одним видом *Nostoc punctiforme*. Лишь на участке под элимусом встречены разнообразные ностоки, а в ризосфере полыни Маршалла — *Nostoc muscorum*. Слабое развитие представителей *Nostocales*, возможно, связано с недостаточным увлажнением отвалов, расположенных в засушливой зоне. Зеленые и желто-зеленые водоросли на исследованных участках занимают второстепенное положение и в основном представлены одноклеточными формами. Слабое развитие их, характерное для почв аридного климата (Голлербах, Штина, 1969), очевидно, можно объяснить высокими температурами, достигающими на поверхности субстрата отвалов 50° С и более (Терехова и др., 1974). Мелкоклеточные диатомовые развивались в культурах из проб со всех участков отвалов, кроме вершины откоса, повсеместно обнаружена лишь *Navicula mutica*. Таким образом, наиболее богатые группировки водорослей развивались на участках под вейником и полынью Маршалла, т. е. под растениями, количественно преобладающими в травостое отвала (Терехова, Ланина, Фоменко, 1974). Эти растения обладают наибольшим средообразующим влиянием, под развитым травостоем их формируются группировки истинно почвенных водорослей (эдафон). На откосах отвала, где травостой изрежен и сильнее выражены явления водной и ветровой эрозии (выдувание и вымывание мелкозема из поверхностного слоя грунта), развиваются только убиквисты.

При количественном учете водорослей на участке под полынью Маршалла обнаружено 243—367 тыс. клеток в 1 г грунта (в слое 0—1 см). Незарастающие участки бедны водорослями (10 тыс. клеток в 1 г грунта), а на токсичных третичных грунтах водоросли вообще не обнаружены методом прямого счета. Сравнительный анализ видового состава водорослей отвалов и окружающих их целинных степных участков показывает, что харак-

терной чертой водорослевых группировок отвалов является преобладание сине-зеленых и, особенно, осцилляториевых водорослей (51,3%). Более того, почти все виды, обнаруженные в степной почве (кроме *Oscillatoria geminata*, *Phormidium fragile* — из сине-зеленых и *Normidium nitens*, *N. flaccidum*, *Coccomyxa sologinae* — из зеленых, встречены на том или ином из изученных участков отвала. Это свидетельствует о заносе водорослей на отвал с окружающих степных участков.

Обнаруженная зависимость развития водорослей от свойств субстрата и сходство их по способам питания с высшими растениями позволяют использовать водоросли как биоиндикаторы при определении категории пригодности грунтов отвалов для биологической рекультивации. С этой целью были испытаны некоторые породы, взятые из разреза Сарбайского карьера. По механическому составу они близки и представлены песками, супесями и суглинками (табл. 3). Более существенны их различия по химическим свойствам, в частности по реакции почвенного раствора. Если рН неогеновых и глауконитовых песков нейтральны 6,1, то для чеганской глины и глинистой опоки, как уже указывалось, характерна сильная кислотность (соответственно 2,5 и 3,0). Это способствует вовлечению в активный почвенный раствор избыточных количеств алюминия, придающих субстратам фитотоксичные свойства. Так, в чеганской глине обнаружено 43,7 мг/экв алюминия на 100 г грунта, а в глинистой опоке — 40,3. В качестве контроля служили грунтосмеси, хорошо зарастающие высшими растениями, и черноземная степная почва с прилегающих к отвалу участков.

В литературе (Полянский, 1956) имеются данные об изменении морфологических признаков у водорослей в связи с изменением среды и физиологических функций. Примером такой морфологической изменчивости могут быть отклонения в форме клеток у видов *Scenedesmus* (образование несвойственных им круглых изолированных клеток или отсутствие остей) под влиянием избытка основных питательных солей (Schröder — Traub, 1954, цит. по: Успенская, 1966; Трапиг, 1969). Показателем неблагоприятных условий питания может быть и величина клеток, так как факторы, вызывающие задержку делений клеток, приводят к резкому увеличению их размера (Пиневич и др., 1961; Галкина, 1966). Следовательно, целям индикации могут служить водоросли, склонные к морфологическим изменениям.

В качестве тест-объектов в наших опытах были взяты водоросли *Scenedesmus quadricauda*, *Normidium flaccidum* и *Pleurochloris* sp., показавшие хорошую отзывчивость на изменения свойств субстратов.

Лучший (табл. 3) рост водорослей был на грунтосмеси и черноземе, несколько худший — на четвертичных супесях и глауконитовом песке, близких по питательным свойствам. Слабый рост отмечен для неогеновых песков. На чеганской же глине и глини-

Реакция водорослей на состав субстратов

Субстрат. Категория пригодности для биологической рекультивации	Количество клеток водорослей (млн./л фильтр)		
	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Normidium flaccidum</i>	<i>Pleurochloris</i> sp.
Чернозём. Плодородный, пригодный . .	29,92±0,46	8,16±0,18	8,8±0,7
Грунтосмесь с преобладанием четвертичных грунтов под польню Маршалла. Потенциально плодородный, пригодный	30,08±0,56	8,17±0,34	8,8±0,17
Четвертичные супеси. Потенциально плодородный, пригодный	19,04±0,83	7,29±0,28	7,21±0,13
Глауконитово-кварцевый песок (супесь). Потенциально плодородный, пригодный	19,04±0,83	6,95±0,20	5,82±0,19
Неогеновый кварцевый песок. Малоприспособный	13,2±0,87	3,3±0,29	5,78±0,07
Чеганская глина (средний суглинок). Непригодный	13,2±0,87	5,05±0,49	5,42±0,16
Глинистая опока (средний суглинок). Непригодный	13,2±0,87	5,42±0,37	5,42±0,16

стой опоке наблюдалось угнетение *Scenedesmus* и *Normidium*, по-видимому, в связи с сильной кислотностью данных субстратов и высоким содержанием алюминия. На них отмечался ненормальный рост водоросли *Scenedesmus quadricauda*, клетки которой имели буроватый цвет, а при микроскопировании обнаруживались пониженными остями или без остей. Морфологические изменения наблюдались в этих вариантах и у *Normidium flaccidum*: распадение нитей и образование апланоспор (Starmach, 1972). У *Pleurochloris* хороший рост наблюдался лишь в варианте с четвертичными грунтами, являющимися почвообразующей породой и поэтому отличающимися большей степенью выветренности, чем аналогичные по категории пригодности для биологической рекультивации глауконитовые пески.

Можно предполагать, что подбор соответствующих видов, наиболее сильно реагирующих на состояние субстрата, позволит использовать водоросли как индикационные организмы при оценке пригодности субстрата для роста растений и последующей биологической рекультивации.

Грунты отвалов ССГОК оказывают неодинаковое влияние на развитие водорослевых группировок. Наиболее богаты по видовому составу и количеству водорослей четвертичные отложения, относящиеся к категории пригодных для биологической рекультивации. На фитотоксичных чеганской глине и глинистой опоке водоросли отсутствовали или встречались единично виды-убиквисты.

В формирующихся альгоценозах наблюдается характерное для аридных районов преобладание сине-зеленых водорослей, особенно осцилляториевых.

Высокая чувствительность водорослей к изменениям условий среды позволяет использовать их как биоиндикаторы тех или иных свойств субстратов. Так, на потенциально плодородных грунтах продуктивность *Scenedesmus quadricauda* достигает значительных величин (от 19,04 до 30,08 млн. клеток на 1 фильтр). На фитотоксичных же чеганской глине и глинистой опоке наблюдается слабый рост и морфологические изменения клеток *Scenedesmus quadricauda* и *Hormidium flaccidum*.

ЛИТЕРАТУРА

- Базилевич Н. И., Голлербах М. М., Литвинов М. А., Родин Л. Е., Штейнберг Д. М., 1953. О роли биологических факторов в образовании такыров на трассе Главного Туркменского канала. «Ботанич. журн.», 38, № 1.
- Бекаревич Н. Е., Горобец Н. Д., Колбасин А. А., Масюк Н. Т., Пистунов Н. И., Сидорович Л. Т., Узбек И. Х., 1971. О рекультивации земель в степи Украины. Днепропетровск.
- Галкина Т. Б., 1966. Влияние некоторых условий окультуривания хлореллы на морфологические особенности ее клеток. В сб. «Управляемый биосинтез». М.
- Голлербах М. М., Штина Э. А., 1969. Почвенные водоросли. Л.
- Ланина Р. И., Терехова Э. Б., 1971. Микроклимат отвалов Соколовского карьера. В сб. «Растения и промышленная среда». Киев.
- Левит С. Я., 1972. Определение степени пригодности пород вскрыши Сарбайского карьера для целей биологической рекультивации. Отчет по научно-исследовательской теме. Свердловск (Уральск. ун-т, рукопись).
- Моторина Л. В., Зайцев Г. А., Ижевская Т. И., Савич А. И., Чеклина В. Н., 1969. Рекомендации и методические указания к сельскохозяйственному и лесохозяйственному восстановлению отвалов в Подмосковном бассейне. М.
- Пивоварова Ж. Ф., 1967. Количество водорослей в солончаково-солонцовом комплексе почв Барабинской лесостепи. В сб. «Современное состояние и перспективы изучения почвенных водорослей в СССР». Киров.
- Пиневиц В. В., Верзилина Н. Н., Маслов Ю. И., 1961. Влияние различных источников азота на рост и накопление массы у *Chlorella*. «Вестн. Ленингр. ун-та. Серия биол.». № 9.
- Полянский В. И., 1956. О виде у низших водорослей. М.—Л.
- Терехова Э. Б., Ланина Р. И., 1972. Испытание древесно-кустарниковых пород и многолетних травянистых растений для установления ассортимента видов, пригодных для озеленения склонов и поверхности юго-восточного отвала Соколовского рудника. Отчет по научно-исследовательской теме. Свердловск (Уральск. ун-т, рукопись).
- Терехова Э. Б., Ланина Р. И., Фоменко Л. В., 1974. Естественное зарастание отвалов Соколовского железорудного карьера. В сб. «Растения и промышленная среда», вып. № 3. Свердловск.
- Успенская В. И., 1966. Экология и физиология пресноводных водорослей.
- Штина Э. А., Большев Н. Н., 1960. Водоросли солонцов. «Ботанич. журн.», 45, № 11.
- Starmach K., 1972. Flora słodkowodna, Polski, m. 10. Warszawa-Krakow.
- Trainor F. R., 1969. *Scenedesmus* morphogenesis. Trace elements and spine formation. «Journ. Phycol.», v. 5, N 3.