

УДК 631.465:631.445.11(571.121)

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ НА ТАЗОВСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ¹

© 2020 г. В. Н. Башкин¹, Р. В. Галиулин^{2,*}

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

² Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: galiulin-rauf@rambler.ru

Поступила в редакцию 02.11.2019 г.

После доработки 19.11.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Рекультивацию нарушенных тундровых почв на Тазовском полуострове (Ямало-Ненецкий автономный округ) проводили путем внесения в них местного торфа, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав и использования гумата калия, как стимулятора роста и развития растений, полученного из того же торфа. Текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв осуществляли, анализируя активность почвенного фермента дегидрогеназы. При этом активность дегидрогеназы рекультивированной почвы сопоставляли с активностью фермента нарушенной почвы на момент начала рекультивации, взятой из базы данных, хранящейся в лаборатории, контролирующей процесс рекультивации. Это было основанием для выводов об эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв.

Ключевые слова: Тазовский полуостров, нарушенные тундровые почвы, рекультивация, текущий контроль эффективности рекультивации, активность фермента дегидрогеназы.

DOI: 10.31857/S0002188120030047

ВВЕДЕНИЕ

При проведении геологоразведочных работ, обустройстве и разработке газоконденсатных месторождений в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) (67°15' с.ш., 74°40' в.д.) происходит механическое воздействие на почвенно-растительный покров, связанное главным образом с проездом техники. В результате тундровые почвы частично или полностью лишаются растительности и органогенного слоя с выходом минеральных горизонтов на дневную поверхность. В различных природно-климатических условиях это обычно приводит к нарушению биогеохимических циклов химических элементов на 3-х различных уровнях: микроорганизмов (бактерии, актиномицеты, грибы, дрожжи), низших беспозвоночных организмов (простейшие, черви, моллюски, тихоходки, членистоногие) и травянистых и лесных фитоценозов [1, 2]. Известно, что роль микроорганизмов заключается в том, что

они производят минерализацию органических остатков в почве, а отмирая, высвобождают от своей массы различные химические элементы, которые вступают в новые биогеохимические циклы. Что касается низших беспозвоночных организмов, то они перерабатывают органические остатки в почве, аккумулируют гумус в ней и оказывают влияние на состав почвенного воздуха. И, наконец, травянистые фитоценозы в отличие от лесных фитоценозов характеризуются более быстрой оборачиваемостью химических элементов, т.е. значительно коротким их биогеохимическим циклом в системе почва–растение.

Между тем, в условиях тундры в результате нарушения почвенно-растительного покрова может начаться развитие термоэрозии, т.е. эрозии, характерной для многолетней (вечной) мерзлоты, приводящее к оврагообразованию и песчаным обнажениям, и, как следствие, к геологической нестабильности газопроводов и других технических сооружений, что создает опасность возникновения различных аварийных ситуаций. Хотя почва обладает самовосстановлением, приводящим к регенерации почвенно-растительного по-

¹ Работа выполнена в рамках темы Министерства науки и высшего образования РФ “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно загрязненных почвах”, № 0191-2019-0049.



Рис. 1. Карта-схема территории функционирования объектов ООО «Газпром добыча Ямбург» (ЯНАО; 67°15' с.ш., 74°40' в.д.): 1 – п-ов Ямал, 2 – Тазовский п-ов, 3 – междуречье р. Пур и Таз, 4 – Гыданский п-ов, 5 – участок № 1, 6 – участок № 2; а – реки, б – озера, в – болота.

крова, однако этот процесс может занимать десятки лет. В этой связи становится чрезвычайно актуальной своевременная рекультивация (восстановление плодородия), связанная с возобновлением различных уровней биогеохимических циклов химических элементов нарушенных тундровых почв.

Анализ литературы свидетельствует об отсутствии достаточно эффективных способов рекультивации нарушенных тундровых почв, которые были бы, во-первых, адаптированными к природным условиям ЯНАО, во-вторых, приемлемость этих способов первоначально определяли бы по эффективности регенерации нарушенных биогеохимических циклов химических элементов на уровне микроорганизмов и в-третьих, были бы не сложными и экономически доступными для практической реализации.

Использованная в данной работе технология рекультивации нарушенных тундровых почв практически отвечает всем этим требованиям в сравнении с известными технологиями, предложенными или реализуемыми разными авторами на полуострове Ямал (71° с.ш., 70° в.д.; ЯНАО), в районе расположения Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения [3–8]. Эти технологии отличаются применением разнообразных, главным образом привозных искусственно созданных средств рекультивации для восстановления нарушенных тундровых почв. В числе таких средств, в частности, используют минеральные и органические удобрения, вносимые в почву как отдельно, так и в виде их комбинаций; гранулы в комплексе с минеральными и органически-

ми удобрениями и семенами многолетних злаковых трав; биоматы (специальные геотекстильные полотна), представляющие собой композиции, состоящие из 2-х и более слоев, с частично, из-за синтетической армирующей основы, или полностью биodeградируемой основой, с закрепленными в этих слоях минеральными и органическими удобрениями, семенами многолетних злаковых трав, стимуляторами роста и развития растений, штаммами почвенных микроорганизмов, влагоудерживающими и другими компонентами. При этом эффективность данных технологий оценивают на уровне травянистых фитоценозов методом проективного покрытия, путем учета количества и плотности растений, высоты и массы растений и степенью развитости их корневой системы.

Апробация одной из подобных технологий на полуострове Ямал [4, 5] показала, что, при использовании, например, биоматов растения испытывали затруднения при прорастании семян первого поколения сквозь полотно, а синтетическая армирующая основа этих композиций существенно препятствовала развитию корневой системы растений и прорастанию семян последующих поколений растений в почве. Однако полный отказ от синтетической армирующей основы биоматов снижал их противозерозионные свойства в отношении почвы. Кроме того, было отмечено, что аномально жаркое и сухое лето (>30°C), наблюдавшееся в 2016 г. в ЯНАО, весьма негативно отразилось на росте и развитии растений на рекультивируемых участках.

В настоящее время на Тазовском полуострове (68°09' с.ш., 76°02' в.д.; ЯНАО), в импактных зонах газовой промышленности реализуется созданная авторами так называемая инновационная биогеохимическая технология рекультивации нарушенных тундровых почв (рис. 1) [9]. Ее суть состоит во внесении местного торфа в нарушенные тундровые почвы с учетом их гранулометрического состава или полной влагоемкости в зависимости от рельефа местности, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав с использованием полученного из того же торфа гумата калия, как стимулятора роста и развития растений. Критерием оценки эффективности данной технологии является определение активности дегидрогеназы почвы – фермента, катализирующего реакцию дегидрирования, т.е. отщепления водорода органических веществ почвы (углеводов, спиртов, кислот и др.) [10]. При этом активность дегидрогеназы почвы является активностью дегидрогеназы микроорганизмов почвы [11].

Таблица 1. Активность фермента дегидрогеназы в почвах двух участков на территории Тазовского полуострова (68°09' с.ш., 76°02' в.д.)

Почва	Активность фермента дегидрогеназы, мкг C ₁₉ H ₁₆ N ₄ /г сут	Почва	Активность фермента дегидрогеназы, мкг C ₁₉ H ₁₆ N ₄ /г сут
Нарушенная почва участка № 1	5.6 ± 0	Нарушенная почва участка № 2	5.3 ± 0
Рекультивированная почва участка № 1	320 ± 31	Рекультивированная, но повторно нарушенная почва участка № 2	7.1 ± 2.7

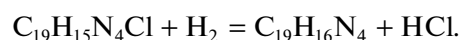
Цель работы – показать, как посредством анализа активности дегидрогеназы осуществлялся текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв на отдельных участках территории Тазовского полуострова, в районе функционирования объектов ООО “Газпром добыча Ямбург” – дочерней компании ПАО “Газпром”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рекультивацию нарушенных тундровых почв, полностью лишенных растительности и органического слоя, проводили в 2016 г. на двух участках (№ 1 и № 2) территории Тазовского полуострова. Восстановление утраченного плодородия почв данных участков было выполнено путем внесения в них местного торфа в количествах, рассчитанных с учетом полной влагоемкости почв, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав (овсяницы красной, *Festuca rubra*; овсяницы луговой, *Festuca pratensis*; мятлики лугового, *Poa pratensis*; райграса пастбищного, *Lolium perenne*; тимофеевки луговой, *Phleum pratense*) и применения гумата калия, используемого для замачивания семян перед посевом, корневой подкормки и некорневой подкормки (опрыскивания), способами, подробно описанными в работе [9]. Спустя 2 года на этих участках отбирали репрезентативные усредненные образцы почвы методом конверта, т.е. путем смешивания 5-ти отдельных проб, взятых из 5-ти точек. Затем осуществляли предварительную подготовку образца почвы посредством ее воздушного высушивания до рассыпчатого состояния при комнатной температуре, очистки от твердых включений (камней и корней), измельчения и просеивания через сито диаметром ячеек 2 мм и отбора проб почвы в шестикратной повторности для биохимического анализа.

Текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв выполняли путем анализа активности дегидрогеназы в различных пробах почвы, используя один из спектро-

фотометрических методов, описанных в работе [10]. Результаты анализа активности дегидрогеназы выражали в мкг C₁₉H₁₆N₄/г|сут, т.е. 2,3,5-трифенилформазана, образуемого из 2,3,5-трифенилтетразолийхлорида (C₁₉H₁₅N₄Cl) по реакции:



Статистическую обработку экспериментальных данных производили по методике [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показало, что в почве участка № 1 активность фермента дегидрогеназы повысилась в среднем в 57 раз, что свидетельствовало о начале восстановления нарушенных биогеохимических циклов химических элементов на уровне микроорганизмов (табл. 1). В то время как на участке № 2 активность фермента дегидрогеназы практически не изменилась. Впоследствии выяснилось, что в год осуществления рекультивации нарушенной тундровой почвы участка № 2 произошло непредвиденное прохождение через него техники с целью оперативного устранения аварийной ситуации на одном из объектов добычи природного газа. Это вызвало повторное нарушение почвенно-растительного покрова, и поэтому на участке № 2 возникла необходимость повторной рекультивации почвы с применением изначальной технологии, т.е. путем внесения местного торфа, посева и выращивания многолетних злаковых трав и использования гумата калия, как стимулятора роста и развития растений [9].

Статистическая обработка результатов анализа активности дегидрогеназы почв 2-х участков путем оценки существенности разности выборочных средних по *t*-критерию, показала следующее. На участке № 1, при числе степеней свободы $\nu = n_1 + n_2 - 2 = 6 + 6 - 2 = 10$, где n_1 и n_2 – пробы почвы, взятые для анализа в 6-кратной повторности, $t_{\text{теор}}$ при t_{05} был равен 2.2, $t_{01} - 3.2$ и $t_{001} - 4.6$, в то время как $t_{\text{факт}}$ составил 10.1, т.е. был больше $t_{\text{теор}}$. Это доказало эффективность рекультивации

Таблица 2. Оценка существенности разности выборочных средних по *t*-критерию активности дегидрогеназы (мкг C₁₉H₁₆N₄/гсут) почв участков № 1 и № 2 на Тазовском полуострове

Вариант	\bar{x}_n – средняя арифметическая; $s_{\bar{x}_n}$ – ошибка средней арифметической
1. Нарушенная почва на момент начала рекультивации участка № 1	$\bar{x}_1 \pm s_{\bar{x}_1} = 5.6 \pm 0$
2. Рекультивированная почва участка № 1	$\bar{x}_2 \pm s_{\bar{x}_2} = 320.4 \pm 31.3$
3. Нарушенная почва на момент начала рекультивации участка № 2	$\bar{x}_3 \pm s_{\bar{x}_3} = 5.3 \pm 0$
Рекультивированная, но повторно нарушенная почва участка № 2	$\bar{x}_4 \pm s_{\bar{x}_4} = 7.1 \pm 2.7$

Таблица 3. Содержание различных видов углерода в гуминовых кислотах торфа ЯНАО и ХМАО (62°15' с.ш., 70°10' в.д.)

Млн. доля	Вид углерода	ЯНАО [14], %	ХМАО [13], %
0–65	Алифатический	37.9–54.0	42.2–47.1
65–90	Полисахаридный	23.1–26.8	5.5–13.3
90–160	Ароматический	14.1–23.2	36.3–42.1
160–200	Карбоксильный	7.9–10.1	4.7–8.8

нарушенной почвы по фактической величине *t*-критерия и позволило считать участок № 1 как рекультивированный (табл. 2).

Для участка № 2 при числе степеней свободы $v = n_3 + n_4 - 2 = 6 + 6 - 2 = 10$, где n_3 и n_4 – пробы почвы, взятые для анализа в 6-кратной повторности, $t_{теор}$ при t_{05} был равен 2.2, $t_{01} = 3.2$ и $t_{001} = 4.6$, в то время как $t_{факт}$ составил 0.67, т.е. был меньше $t_{теор}$. Это не доказало эффективность рекультивации нарушенной почвы по фактической величине *t*-критерия и позволило считать участок № 2 как не рекультивированный.

Между тем факт положительного действия местного торфа при восстановлении плодородия нарушенной тундровой почвы участка № 1 можно объяснить специфическим для данного региона содержанием различных видов углерода в торфе, что ранее было установлено в сравнительных исследованиях методом ЯМР-¹³C-спектроскопии его образцов, взятых в 2-х регионах (табл. 3) [9, 13,

14]. Например, в торфе ЯНАО по сравнению с торфом из смежного Ханты-Мансийского автономного округа, (ХМАО) (62°15' с.ш., 70°10' в.д.) содержание алифатического углерода было больше (в 2.3–2.7 раза), чем ароматического. Однако содержание последнего в торфе ЯНАО было меньше (в 1.8–2.6 раза), чем в торфе из ХМАО, в то время как количество полисахаридного углерода было соответственно больше (в 2.0–4.2 раза). В целом это свидетельствовало об относительно низкой ароматичности гуминовых кислот в торфе ЯНАО и большей роли полисахаридов в их формировании. В результате были установлены отличительные признаки гуминовых кислот торфа ЯНАО, характеризующие их специфические региональные особенности, которые послужили основанием не только для использования местного торфа для рекультивации нарушенных тундровых почв, но и получения из него гумата калия, как стимулятора роста и развития многолетних злаковых трав [9]. Это подчеркнуло, с одной стороны, адаптированность использованной технологии рекультивации нарушенных тундровых почв к природным условиям ЯНАО, с другой стороны, несложность ее исполнения и экономическую доступность для практической реализации.

Как уже отмечали, для оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв была использована активность фермента дегидрогеназы, как показатель восстановления биогеохимических циклов на уровне микроорганизмов, что не случайно. Теоретические основы для применения этого показателя при оценке эффективности рекультивации нарушенных почв представлены в ряде работ различных авторов [15–19]. В частности, считается, что дегидрогеназа действует как внутриклеточный фермент, и ее активность служит мерой интенсивности микробного метаболизма в почве. Это подтверждает ранее высказанный тезис о том, что под выражением активность дегидрогеназы почвы следует понимать активность дегидрогеназы микроорганизмов почвы [11]. Кроме того, дегидрогеназа является не только одним из наиболее чувствительных биоиндикаторов, связанных с почвенным плодородием, а также одним из главных компонентов общего ферментативного пула микроорганизмов, участвующих в биогеохимических циклах.

Адекватность использования активности дегидрогеназы для доказательства восстановления биогеохимических циклов на уровне микроорганизмов была ранее экспериментально обоснована в работе [9]. Так, расчет коэффициента корреляции, указывающего на направление и степень сопряженности в изменчивости признаков, пока-

зал наличие сильной существенной корреляционной связи между активностью дегидрогеназы и капиллярной влагоемкостью ($r = 0.95$), а также активностью дегидрогеназы и полной влагоемкостью ($r = 0.95$) тундровых почв. Соответствующие формулы корреляционной зависимости, т.е. уравнения линейной зависимости, позволяющие судить о том, как количественно менялся результативный признак (y) при изменении факторального (x) на единицу измерения, имели следующий вид:

$$y = 2.74 + 0.28x; \quad y = 7.71 + 0.15x.$$

Как оказалось, чем больше величина капиллярной и полной влагоемкости, тем выше была активность дегидрогеназы. Ведущее значение влажности для активности дегидрогеназы почвы связано с тем, что влага определяет нормальное физиологическое состояние микроорганизмов в почве, а также поддерживает в реакционном состоянии данный фермент и его субстраты (углеводы, кислоты, спирты и др.).

ВЫВОДЫ

1. Рекультивацию нарушенных тундровых почв на территории функционирования объектов ООО «Газпром добыча Ямбург» (ЯНАО) проводили с использованием местного торфа, посева и выращивания смеси многолетних злаковых трав и использования полученного из того же торфа гумата калия как стимулятора роста и развития растений.

2. Текущий контроль эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв осуществляли путем сопоставления результатов анализа активности фермента дегидрогеназы рекультивированной почвы с результатами анализа активности дегидрогеназы нарушенной почвы на момент начала рекультивации, взятых из базы данных, хранящейся в лаборатории, контролирующей процесс рекультивации.

3. Об эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв судили путем оценки существенности разности выборочных средних по t -критерию, позволяющему установить достоверное различие между активностью дегидрогеназы рекультивированной и нарушенной почвы, как свидетельство восстановления биогеохимических циклов на уровне микроорганизмов. В случае если это различие оказывалось статистически не достоверным, в результате повторного нарушения целостности почвенно-растительного покрова, то на искомом участке возобновляли про-

цесс рекультивации до полного восстановления плодородия нарушенной почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. Мат-лы VII пленума СКОПЕ. Москва, 15–22.11.1974 г. М.: Наука, 1976. С. 19–85.
2. Ивлев А.М. Биогеохимия. М.: Высш. шк., 1986. 127 с.
3. Галямов А.А., Гаевая Е.В., Захарова Е.В. Биологическая рекультивация сельскохозяйственных земель (оленьих пастбищ) на полуострове Ямал // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 10. С. 17–22.
4. Пыстина Н.Б., Баранов А.В., Листов Е.Л., Будников Б.О. Совершенствование технологий рекультивации нарушенных и загрязненных земель на месторождениях углеводородов Крайнего Севера // Научн. вестн. Ямало-Ненец. автоном. округа. 2016. № 2(91). С. 4–8.
5. Пыстина Н.Б., Унанян К.Л., Ильякова Е.Е., Хохлачев Н.С., Лужков В.А. Совершенствование технологий рекультивации ландшафтов на склонах в условиях Крайнего Севера // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 27–34.
6. Gaevaya E.V., Zakharova E.V., Skipin L.N., Galyamov A.A. Improvement of biological recultivation technology of disturbed soils of oil, gas and condensate field // Adv. Engin. Res. 2017. V. 133. P. 215–220.
7. Gagloeva A.E., Aistov I.P. Peculiarities of using biomass for oil-contaminated soils remediation in the Far North regions // J. Soil Water Sci. 2018. V. 1 (1). P. 26–28.
8. Iglavikov A.V., Motorin A.S. Emerging technologies for recultivation of disturbed sandy soil after anthropogenic disturbances in the industrial development of the Far North // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Science. 2018. № 194. P. 1–8.
9. Bashkin V.N., Galiulin R.V. Geoeological risk management in polar areas. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. 156 p.
10. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
11. Петерсон Н.В. Дегидрогеназная активность в почве как проявление активности ее микрофлоры // Микробиология. 1967. Т. XXXVI. Вып. 3. С. 518–525.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
13. Сартаков М.П. Спектроскопия ЯМР ^{13}C гуминовых кислот торфов Среднего Приобья // Химия раст. сырья. 2008. № 3. С. 135–139.
14. Alekseev A.O., Bashkin V.N. NMR ^{13}C measurements for assessing humates from tundra peats // Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems. N.Y.: Nova Science Publishers, 2017. P. 101–128.
15. Onet A. Relation between enzymatic activities and counts of soil microorganisms // Analele Universitatii din Oradea. Fascicula: Protectia Mediului, 2007. V. XII. P. 224–230.

16. *Wolinska A., Stepniewska Z.* Dehydrogenase activity in the soil environment // *Dehydrogenases*. INTECH Open Publisher, 2012. Chapter 8. P. 183–210.
17. *Kumar S., Chaudhuri S., Maiti S.K.* Soil dehydrogenase enzyme activity in natural and mine soil – A review // *Middle-East J. Sci. Res.* 2013. V. 13 (7). P. 896–906.
18. *Kujur M., Patel A.K.* Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality // *Chil. J. Agricult. Res.* 2014. V. 74 (1). P. 96–104.
19. *Navnage N.P., Patle P.N., Ramteke P.R.* Dehydrogenase activity (DHA): Measure of total microbial activity and as indicator of soil quality // *Inter. J. Chem. Studies.* 2018. V. 6 (1). P. 456–458.

Control of Efficiency of Disturbed Tundra Soil Recultivation in Taz Peninsula

V. N. Bashkin^a and R. V. Galiulin^{b,#}

^a *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b *Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

[#] *E-mail: galiulin-rauf@rambler.ru*

Recultivation of disturbed tundra soils in the Taz peninsula (Yamalo-Nenets autonomous district) was carried out by application of local peat, sowing and growing a mixture of perennial cereal grasses and using potassium humate, produced from the same peat, as a stimulating agent for growth and development of plants. Current control of recultivation efficiency of disturbed tundra soils was carried out by analysis of soil dehydrogenase enzyme activity. At the same time, results of analysis of dehydrogenase enzyme activity of recultivated soil were compared with results of analysis of dehydrogenase enzyme activity of disturbed soil on the moment of beginning of recultivation, taken from database stored in the laboratory, controlling recultivation process. This formed by the basis for conclusion about the efficiency of recultivation of disturbed tundra soils.

Key words: Taz peninsula, disturbed tundra soils, recultivation, current control of recultivation efficiency, dehydrogenase enzyme activity.