

ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ТУНДРОВО-ГЛЕЕВЫХ ПОЧВ ПРИ ИХ РЕКУЛЬТИВАЦИИ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

TRANSFORMATION OF THE PROPERTIES OF OIL-CONTAMINATED TUNDRA-GLEY SOILS AT THEIR REMEDIATION WITH DIFFERENT METHODS

Ключевые слова: нефть, нефтяное загрязнение, рекультивация, тундрово-глеевые почвы, содержание нефтепродуктов в почве.

Проведены полевые и лабораторные исследования химических и биологических свойств рекультивированных разными способами тундрово-глеевых почв Республики Коми в сравнительном анализе с фоновыми почвами.

Keywords: petroleum, oil contamination, remediation, tundra-gley soils, oil product content in soil.

Field and laboratory studies of the chemical and biological properties of tundra-gley soils of the Komi Republic remediated by different methods, were conducted, the results were compared with those of the background soils.

Ежелев Захар Сергеевич, н.с., аспирант, каф. физики и мелиорации почв, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. E-mail: ejelevsoil@gmail.com.

Умарова Аминат Батальбиевна, д.б.н., проф., каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-25-42. E-mail: a.umarova@gmail.com.

Лысак Людмила Вячеславовна, д.б.н., доцент, каф. биологии почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. E-mail: a.umarova@gmail.com.

Yezhelev Zakhar Sergeevich, Staff Scientist, Post-Graduate Student, Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: ejelevsoil@gmail.com.

Umarova Aminat Batalbiyevna, Dr. Bio. Sci., Prof., Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-25-42. E-mail: a.umarova@gmail.com.

Lysak Lyudmila Vyacheslavovna, Dr. Bio. Sci., Assoc. Prof., Soil Biology Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: a.umarova@gmail.com.

Введение

Одной из важнейших задач России в XXI в. является экономическое и промышленное развитие Арктики. В связи с естественным падением добычи в приморских районах суши (по оптимальному варианту) уровень добычи жидких УВ на месторождениях суши Тимано-Печорской нефтегазовой провинции до 40 млн т возможен с 2017 по 2023 гг., после чего он будет постепенно снижаться до 30 млн т в год [1]. Компенсировать снижение планируется за счет дальнейшего продвижения на север к морским месторождениям Тимано-Печорской провинции. Возникает необходимость возведения новых нефтегазотранспортных систем, экологическое обеспечение которых возможно лишь с развитием транспортной системы северного региона, поскольку скорость локализации нефтяных аварий является одним из ключевых этапов рекультивации. В условиях сурового климата Севера биоценоотические связи между компонентами экосистемы не только становятся теснее, но и само жизненное пространство уменьшается до небольшого по мощности органогенного слоя, в котором практически замыкается биологический оборот органического вещества, сосредоточена основная

масса корней растительного сообщества (80-90% от общей массы корней в 5-10-сантиметровом слое). Это и является хорошо известной причиной сильной уязвимости северных экосистем к техногенным воздействиям, особенно механическим. При таком структурном строении биогеоценоотической системы возобновление ее на биологически инертном, нередко перегруженном загрязняющими веществами, субстрате идет медленно. Поэтому интенсивные методы восстановления техногенных территорий необходимы для предотвращения эрозионных явлений и ускорения процессов восстановления растительного и почвенного покровов.

Цель – сравнительный анализ содержания углеводов и бактериального комплекса участков, подвергнутых различным способам рекультивации после загрязнения нефтью в условиях севера.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования послужил почвенный покров участка, подвергнутый нефтяному загрязнению, площадью 76,55 га, расположенного вблизи нефтепровода «Возей – Головные сооружения» (66°25' с.ш., 57°18' в.д.) в Усинском районе на севере

Республики Коми. Рельеф изучаемой территории представлен холмистой мореной равниной, гидрографическая сеть сильно развита. Средняя годовая температура с 1940 по 2004 гг. $-3,1^{\circ}\text{C}$, средняя температура в июне $+10^{\circ}\text{C}$, средняя температура в январе $-18,8^{\circ}\text{C}$.

После того, как в 1994 г. произошла крупная авария, в окружающую среду попало, по разным оценкам, от 60 до 150 тыс. т сырой нефти. Помимо самих углеводородов (УВ) в ней содержалась вода (до 10%), минеральные соли (в основном хлориды – до 4 г/л), некоторое количество тяжелых металлов, ртути, радиоактивных элементов, сера (от 0,001 до 14%), кислород (0,005–3,6%) и азот (0,02–1,7%) [6]. В период с 1994 по 2010 гг. проводилась рекультивация загрязненных почв, в которой четко прослеживались два этапа: технический и биологический. В технический этап рекультивации входили устранение утечки УВ нефти из магистрального нефтепровода, локализация нефтяного разлива, сбор и откачка свободной нефти, сбор более прочно связанной нефти с помощью паровых установок и обводнения территории для сбора свободноплавающей нефти с поверхности. Каждая рекультивированная площадка была обрамлена рвом глубиной 0,5–1 м с целью снижения уровня почвенно-грунтовых вод и вытеснения нефтесодержащей жидкости при минусовых температурах. Рекультивация проводилась пятью разными способами:

1) промывка загрязненной почвы на специализированной установке по переработке нефтешламов и размещение ее на исходное место;

2) сбор нефти и запахивание оставшейся;

3) замена загрязненного слоя песчаным с размещением на его поверхности осадков сточных вод (ОСВ), слоем мощностью 15–30 см;

4) сбор нефти с поверхности (частичное, локальное загрязнение участка);

5) сжигание нефти; размещение на поверхности незагрязненного грунта.

В биологический этап рекультивации для вариантов 1, 2, 3, и 5 входили следующие агротехнические мероприятия: боронование, внесение минеральных удобрений (первая подкормка – доломитовая мука, азофоска; вторая и третья подкормки – хлорид калия, мочевины); высев злаков (*Festucapratisensis*, *Festucarubra*, *Festucaovina*, *Phleumpretense*, *Loliumperenne*, *Loliummultiflorum*); а на третьем участке, кроме того, в 2011 г. произвели рядную посадку саженцев сосны ($h = 10$ см) с шагом 1 м. На площадках рекультивации и фоновом участке были заложены разрезы, проведены их морфологическое описание, описание растительного покрова. Было

проведено профильное определение плотности, коэффициента фильтрации [3], определены некоторые физические и химические показатели. Образцы для микробиологического анализа были отобраны в июле 2013 г. из зоны ризосферы с глубины с 0–10 см. Учет общей численности микроорганизмов в почвенных образцах проводили прямым люминесцентным методом по Звягинцеву и Кожевину с использованием флюорохромного красителя акридина оранжевого [4]. Подсчет микробных клеток был проведен на люминесцентном микроскопе (ZEISSAxioskop 2 plus) просмотром каждого образца не менее 50 полей зрения. Выделение микроорганизмов с целью определения состава сапротрофного бактериального комплекса осуществляли методом высева на накопительной селективной среде Rich в чашках Петри. С целью улучшения десорбции микроорганизмов с поверхности почвенных частиц осуществляли предварительную обработку почвенной суспензии (1:10) с помощью низкочастотного диспергатора. Методом капиллярной газожидкостной хроматографии определены: суммарное содержание УВ, содержание их высококипящей ($C_{24}-C_{34}$) и среднекипящей ($C_{14}-C_{23}$) фракций. Значение отношения этих фракций указывает на доминирование выноса или накопления миграционно активных УВ. Для оценки почв к самоочищению от техногенных углеводородов использованы два отношения, характеризующих глубину деградации исходных нефтепродуктов: содержание индивидуальных *n*-алканов (от C_{14} до C_{34}), а также рассчитано содержание изопреновых УВ – пристана и фитана [2].

Результаты и их обсуждение

Суммарное содержание УВ на фоновом участке не превысило 581 мг/кг (табл. 1). Наиболее низкие значения этого показателя отмечаются на большей территории 3-го участка, рекультивированного с применением ОСВ (составляет 681 мг/кг). Более высокие концентрации характерны для поверхностных горизонтов 1-го (промывка) и 4-го (частичный сбор) участков.

Максимальные содержания УВ характерны для 2-го участка, рекультивированного методом запахивания оставшейся нефти, и составляют 339500 мг/кг. На 4-м участке наблюдается латеральное перемещение УВ от нефтяных луж, которых не коснулась рекультивация. Повышение соотношения $C_{14}-23/C_{24}-34$ в почве под нефтяными пятнами (0,6) в 2 раза по сравнению с почвой прилегающих участков (0,3) свидетельствует о преобладании биodeградации по краям источника загрязнения над латеральным распределением вокруг нефтяных пятен.

Таблица 1

Общая численность, таксономический состав сапротрофных бактериальных комплексов и суммарное содержание углеводородов, отношение среднекисляющей к высококисляющей фракции, % n-алканов/среднекисляющей фракции, пристан/фитановый индекс

Участок рекультивации	Доминанты >30%	Субдоминанты 30-20%	Среднее обилие 20-10%	Минорные компоненты <10%	Общ. числ. бактерий N, клетки	Σ УВ мг/кг	C14-C23/ C24-C34	% n-алканов/ C14-C23	C17+C18/ C15-Ci-16
Фон лесотундра	Bacillus 58 Arthrobacter 31			Spirillum 7,4 Pseudomonas 7,4	5,9*10 ⁸	581	15,7	0,3	1,6
Промывка в УПНШ (1)	Arthrobacter 41	Cytophaga 24	Мухососус 15,7 Rhodococcus 13,5	Pseudomonas 5,6	1,8*10 ⁹	7774	1,3	0,25	3,8
Вспашка нефти (2)	Bacillus 61,8 Pseudomonas 34,8			Мухососус 3,45	3,9*10 ⁸	339500	1,7	0,5	0,07
3.1. ОСВ Автоморфный, без раст-ти	Spirillum 42		Arthrobacter 18 Cytophaga 15,6 Pseudomonas 15,1	Rhodococcus 6,4 Bacillus 2,9	2,5*10 ⁹	5669	0,6	0,25	1,3
3.2. ОСВ Авто-морфный, без раст-ти	Arthrobacter 35,6		Rhodococcus 14,7 Streptomyces 13,2	Bacillus 9 Cytophaga 7,5 Pseudomonas 4,8 Мухососус 4,8 Spirillum 4,8	1,1*10 ⁹	681	4,5	0,26	1,6
3.3. ОСВ Гидроморфный, с раст-ю			Arthrobacter 15,2	Cytophaga 8,9 Rhodococcus 6,9 Cellulomonas 1,6 Serratia 0,3 Bacillus 0,3	1,3*10 ⁹	8485	8,5	0,6	1,4
3.4. ОСВ Гидро-морфн., с раст-ю	Arthrobacter 48	Cytophaga 20	Rhodococcus 13,3 Мухососус 12,5	Pseudomonas 4,7 Streptomyces 1,2	1,4*10 ⁹	7171	3,1	0,28	0,7
4.1. Частичный сбор (нефт. пятно)	Bacillus 91,7		Cytophaga 8,3		1,4*10 ⁸	4792	4,4	0,6	0,04
4.2. Частичный сбор (вокруг пятен нефти)	Bacillus 36,8	Мухососус 22,4 Cytophaga 21,1	Arthrobacter 12,4	Rhodococcus 2,3 Streptomyces 0,6 Pseudomonas 0,5	9,4*10 ⁸	2499	2,4	0,3	0,9

Эту гипотезу подтверждает общая численность бактерий и таксономический состав. Было обнаружено, что их количество вокруг нефтяных пятен ($9,4 \cdot 10^8$) на порядок превосходит численность под нефтяным пятном ($1,4 \cdot 10^8$), а субдоминанты и минорные компоненты (под нефтяным пятном) полностью отсутствуют. Отношения C_{14-23}/C_{24-34} под нефтяными пятнами (0,6) выше в 2 раза по сравнению с прилегающим участком (0,3), а значит, биодegradации по краям источника загрязнения преобладает над латеральным перераспределением УВ (предположительно из-за резкого увеличения аэрируемости поверхности на периферии нефтяных луж).

Подробно рассмотрим 3-й участок рекультивации, в котором ярко выражена мозаичность растительного покрова, присутствует выраженность рельефа, в связи с чем была подробно исследована пространственная неоднородность техногенного загрязнения с учетом гидроморфности участка. Снижение концентрации органических поллютантов на автоморфной (3,1 и 3,2) части данной территории вызвано интенсификацией их выноса. Переувлажненная гидроморфная часть (3,3 и 3,4) характеризуется увеличением их концентрации в связи с преобладанием процессов накопления над выносом. Свой вклад в снижение концентрации УВ вносит и растительность с микробиотой. На автоморфных и гидроморфных участках, покрытых растительностью, общее содержание УВ ниже, чем на участках без растительности. Повышение отношения $C_{14}-C_{23}/C_{24}-C_{34}$ в почвах незаросшего гидроморфного участка и понижение в почвах автоморфного участка указывают на относительное накопление среднекипящей фракции УВ в переувлажненных почвах относительно автоморфных почв за счет более интенсивного выноса из почв с вышележащих участков. Причем наличие УВ высококипящей фракции, которая характеризуется повышенной сорбируемостью и пониженной растворимостью в воде, в почвах нижних участков по рельефу свидетельствует о возможном механизме миграции этих компонентов преимущественно в сорбированном виде вместе с почвенными частицами.

Наиболее высоким содержанием н-алканов в составе поллютантов характеризуется незаросшая почва гидроморфного участка, что обусловлено низким уровнем биодegradации НП, отсутствием какого-либо из доминант и субдоминант в бактериальных комплексах.

Выводы

Таким образом, способность изученных рекультивированных почв к самоочищению от техногенных УВ определяется совокупностью факторов: 1) выносом органических поллютантов с водными потоками; 2) формой рельефа; 3) уровнем исходного углеводо-

родного загрязнения и фракционным составом УВ; 4) биодegradацией. На основе полученных результатов можно утверждать, что в условиях севера наиболее эффективными способами очистки почвы от нефтепродуктов на биологическом этапе являются высеив многолетних трав, внесение минеральных и органических удобрений.

Библиографический список

1. Григоренко Ю.Н., Прищепа О.М., Соболев В.С. Вопросы нефтегеологического районирования и оценка северо-западного сектора евразийской системы «континент-океан» // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 4. – С. 10-17.
2. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практическое руководство. – М.: БИНОМ, 2007. – 270 с.
3. Ежелев З.С., Умарова А.Б., Гончарук Н.Ю., Завгородняя Ю.А., Ежелева А.С. Свойства рекультивированных после загрязнения нефтью тундровых почв Севера Европейской части России // ВЕСТНИК ОГУ. – 2013. – № 10 (159)/октябрь. – 253 с.
4. Инструментальные методы в почвенной микробиологии / под общ. ред. Е.А. Андреев. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 176 с.
5. Орлов Д.С., Аммосова Я.М., Садовникова Л.К. Охрана почв от химического загрязнения. – М.: МГУ, 1989. – 94 с.
6. Прищепа О.М. Зоны нефтегазоаккумуляции – методические подходы к их выделению, обеспечивающие современное решение задач отрасли // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2008. – № 2. – http://www.ngtp.ru/rub/12/14_2008/pdf.

References

1. Grigorenko Yu.N., Prishchepa O.M., Sobolev V.S. Voprosy neftegeologicheskogo raionirovaniya i otsenka severo-zapadnogo sektora evraziiskoi sistemy «kontinent-ocean» // Razvedka i okhrana neдр. – 2010. – № 4. – S.10-17.
2. Drugov Yu.S., Rodin A.A. Ekologicheskie analizy pri razlivakh nefiti i nefteproduktov. Prakticheskoe rukovodstvo. – М.: BINOM, 2007. – 270 s.
3. Ezhelev Z.S., Umarova A.B., Goncharuk N.Yu., Zavgorodnyaya Yu.A., Ezheleva A.S. Svoistva rekultivirovannykh posle zagryazneniya nefft'yu tundrovyykh pochv Severa Evropeiskoi chasti Rossii // Vestnik OGU. – 2013. – № 10 (159).
4. Instrumental'nye metody v pochvennoi mikrobiologii / pod obshch. red. E.A. Andreyuk. – Kiev: Nauk. dumka, 1982. – 176 s.
5. Orlov D.S., Ammosova Ya.M., Sadovnikova L.K. Okhrana pochv ot khimicheskogo zagryazneniya. – М.: MGU, 1989. – 94 s.

6. Prishchepa O.M. Zony neftegazonakople-niya – metodicheskie podkhody k ikh vydeleniyu, obespechivayushchie sovremennoe reshenie zadach otrasli // Neftegazovaya

geologiya. Teoriya i praktika. – 2008. – № 2. – http://www.ngtp.ru/rub/12/14_2008/pdf.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проекты № 12-04-01297, 13-04-01475.



УДК 631.421.1:633.16

С.В. Железова, В.П. Самсонова
S.V. Zhelezova, V.P. Samsonova

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЧВЫ
И ЕЕ СВЯЗЬ С УРОЖАЙНОСТЬЮ ЯЧМЕНЯ
В ПОЛЕВОМ ОПЫТЕ ЦЕНТРА ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

**SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ELECTRICAL RESISTIVITY AND BARLEY YIELD MAP
IN A FIELD TRIAL AT THE SCIENTIFIC CENTER OF PRECISION AGRICULTURE**

Ключевые слова: пространственная неоднородность почвы, точное земледелие, карта электрического сопротивления почвы, ячмень, карта урожайности, карта биомассы, индекс NDVI.

Keywords: soil spatial variability, precision agriculture, electrical resistivity map, barley, yield mapping, biomass mapping, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Для целей точного земледелия обследование почвы является одним из ключевых моментов. Составление карт электрического сопротивления почвы на поле позволяет оперативно оценить неоднородность почвы и оптимизировать маршрутные агрохимические обследования. Карта электрического сопротивления является устойчивой от года к году, что позволяет планировать почвенные исследования и корректировать имеющиеся почвенные карты. Составление карт биомассы культуры по индексу NDVI и урожайности позволяет оценить эффективность тех или иных агрономических приемов на фоне пестроты почвенного плодородия.

The research of soil electrical resistivity is one of the key points for the purposes of precision agriculture. Mapping of soil electrical resistance in the field enables to quickly evaluate soil variability and to optimize route agrochemical surveys. The map of soil electrical resistance of a field is stable from year to year, thus the planning and adjusting of soil agrochemical surveys is possible on the basis of soil electrical resistivity map. Mapping of crop biomass by NDVI and crop yield enables evaluating the effectiveness of various agronomic practices under the conditions of patchy soil fertility.

Железова Софья Владиславовна, к.б.н., с.н.с., Научный центр точного земледелия, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева; н.с., каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. E-mail: soferrum@mail.ru.

Zhelezova Sofya Vladislavovna, Cand. Bio. Sci., Senior Staff Scientist, Scientific Center of Precision Agriculture, Russian State Agricultural University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Staff Scientist, Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: soferrum@mail.ru.

Самсонова Вера Петровна, д.б.н., доцент, каф. общего земледелия и агроэкологии, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. E-mail: vkbun@mail.ru.

Samsonova Vera Petrovna, Dr. Bio. Sci., Assoc. Prof., General Agriculture and Agroecology Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. E-mail: vkbun@mail.ru.

Введение

Свойства почвы в пределах одного поля всегда в той или иной степени неоднородны, что приводит к неравномерности развития биомассы посевов и, в конце концов, отражается на урожайности. Концепция точного земледелия подразумевает использование дифференцированного подхода к обработке и удобрению почвы неоднородных участков, а также возможность применять разные сце-

нарии уходов за посевами в разных частях поля. Наиболее простым способом отражения неоднородности почвы на поле является составление карты электропроводности (ЭП) или удельного электрического сопротивления (ЭС), что нашло широкое применение не только в детальном картировании почвы, но и в практике точного земледелия [1-3]. В зарубежных странах, где технологии точного земледелия активно развиваются с 1990-х го-