

УДК 574.635

doi: 10.17223/19988591/20/17

Д.С. Воробьев^{1,2}, Ю.А. Франк^{2,3}, С.В. Лушников³

¹Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа (г. Томск)

²Биологический институт Томского государственного университета (г. Томск)

³Научно-техническое объединение «Приборсервис» (г. Томск)

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЧЕРВЕЙ *Limnodrilus hoffmeisteri* НА ПРОЦЕССЫ ОЧИСТКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОТ НЕФТИ

Исследовано влияние плотности червей-лимнодрилусов на процессы деструкции нефти в илах в двух температурных режимах. Установлено, что по мере увеличения количества червей (2 500 экз./м² – 5 000 экз./м² – 10 000 экз./м²) наблюдалось статистически значимое ($p < 0,05$) снижение содержания нефти в илах. При низких температурах воды (5°C) процессы очищения, в среднем, проходили активнее, чем при температуре 21–22°C. Показана возможность использования технологии очистки донных отложений от нефти с использованием червей-тубифицид в зимний период с содержанием растворенного кислорода в воде не менее 5–6 мг/л.

Ключевые слова: донные отложения; ил; нефтяное загрязнение; тубифициды; очистка водоемов.

Введение

Решение экологических проблем нефтезагрязненных территорий и акваторий – одна из важных и актуальных задач нефтедобывающих компаний. Несмотря на разнообразный спектр технологий по очистке и восстановлению нефтезагрязненных сред, данная проблема окончательно не решена.

За последние годы только в морских водах произошло несколько глобальных катастроф, сопровождающихся загрязнением водных объектов (в Испании, на Сахалине, Ладоге, Амуре), в результате которых в морские воды вылились сотни тысяч тонн нефти. Многие акватории уже потеряли способность к самоочищению и превратились в практически мертвые районы [1]. По данным Ростехнадзора, не отвечает нормам по содержанию загрязняющих веществ в водах порядка 40% поверхностных и 17% подземных источников питьевого водоснабжения. В категорию «загрязненные» уже перешли такие реки, как Волга, Ока, Кама, Дон, Северная Двина и другие реки России. До 90% сточных вод попадают в водоёмы практически без очистки. От 35 до 60% населения России употребляют воду, не соответствующую санитарным нормам питьевой воды [2].

Целью нашей работы явилось исследование влияния плотности червей-лимнодрилусов на активность процессов деструкции нефти в донных отло-

жениях для оптимизации технологии очистки донных отложений с использованием червей-тубифицид [3].

Материалы и методики исследования

В эксперименте использовали распространенный вид тубифицид – *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862. Обладая высокой экологической пластичностью, лимнодрилус встречается практически во всех пресноводных объектах. Лимнодрилус, питаясь иловыми отложениями и мелким детритом, становится активным минерализатором органических веществ и биофильтратором воды [4].

В качестве субстрата для червей использовали ил, отобранный в условно чистом озере вблизи г. Томска и процеженный через мельничный газ № 19 для удаления грубого растительного детрита. Для «стерилизации» ила (уничтожения макробеспозвоночных животных, коконов олигохет и др.) его раскладывали в герметичные емкости-кюветы и в течение 5 ч выдерживали в термостате при температуре 70–72°C.

Перед закладкой эксперимента ил сметанообразной консистенции помещали в 5-литровые емкости и добавляли различное количество нефти. Загрязненный ил находился в емкостях в течение 7 сут для прохождения процессов сорбции, где проводилось ежедневное перемешивание в течение 5–7 мин. Для проведения эксперимента был подготовлен загрязненный ил с различным содержанием нефти: № 1 – 2,35 г/кг; № 2 – 5,45 г/кг; № 3 – 11,19 г/кг. Химический анализ массовой концентрации нефти в илах проводился в аккредитованной лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН методом ИК-спектromетрии на приборе «SPECORD M-80» («Carl Zeiss Jena», Германия) по РД 39-0147098-015-90.

Через 7 сут после загрязнения ил помещался в емкости объемом 200 мл по 35 г в каждую по две повторности. Ил взвешивали на электронных весах марки «Krupp» (Германия) с дискретностью 1,0 г. Емкости медленно (чтобы избежать размывания слоя ила на дне) наполняли отстоянной в течение 3 сут водопроводной водой (по 150 мл). После заполнения емкостей водой производили посадку взрослых лимнодрилусов: в контрольные емкости червей не помещали; в опытные емкости помещали лимнодрилусов, плотность 2500, 5000 и 10000 экз./м². Экспериментальные емкости были помещены в светонепроницаемые ящики, чтобы исключить процессы фотоокисления нефти. Эксперимент проводился в двух температурных режимах: при температуре воды 21–22°C и 5°C. Аэрация воды в емкостях на протяжении всего эксперимента и кормление червей не проводились. Ежедневно доливали отстоянную водопроводную воду во все емкости до первоначального уровня. Длительность эксперимента составила 6 месяцев со дня посадки червей. Для математико-статистического анализа данных использовался алгоритм парного критерия Вилкоксона [5]. Статистическая обработка дан-

ных и построение графиков выполнены в программе Microsoft Office Excel 2003 («Microsoft Corporation», США). Данные представлены в виде средней арифметической с ошибкой.

Результаты исследования и обсуждение

Полученные результаты по содержанию нефти в экспериментальных емкостях через 6 месяцев посадки червей выявили тенденцию ускорения процессов очистки донных отложений от нефти по мере увеличения плотности лимнодрилусов. Во всех экспериментальных емкостях наблюдалось снижение содержания нефти по сравнению с исходным грунтом (рис. 1). Снижение содержания нефти в илах в емкостях без червей (контрольные емкости) наблюдалось как при высоких, так и при низких температурах воды (табл. 1).

Таблица 1

Отношение концентраций нефти «исходный грунт / контроль» через 6 месяцев

Температура воды, °С	Исходная концентрация			$\bar{A} \pm m$
	№ 1 (2,35 г/кг)	№ 2 (5,45 г/кг)	№ 3 (11,19 г/кг)	
21–22	$1,8 \pm 0,5$	$1,7 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,4$	$1,73 \pm 0,03$
5	$1,3 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,4$	$1,37 \pm 0,12$

Примечание. Здесь и далее содержание нефти в донных отложениях в исходных концентрациях.

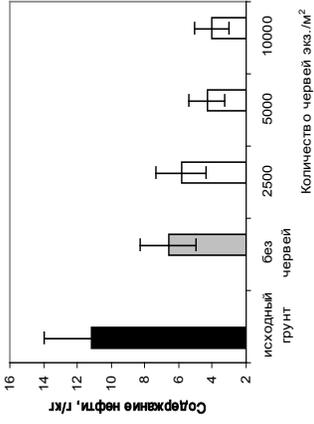
В среднем, при температуре 21–22°С содержание нефти в контрольных емкостях снизилось в 1,73 раза; при температуре 5°С – в 1,37 раза. Снижение концентрации нефти связано в большей степени с физико-химическими и микробиологическими аспектами самоочищения нефтезагрязненных отложений. По результатам эксперимента прослеживается зависимость очищения донных отложений от плотности червей (табл. 2).

Таблица 2

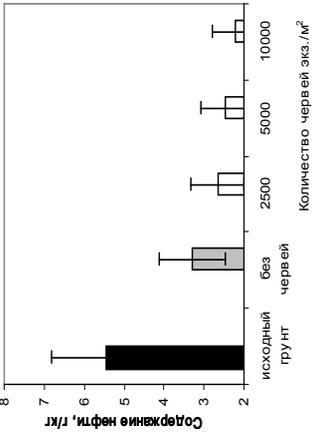
Отношение концентраций нефти «контроль / опыт» («ил без червей / ил с червями») через 6 месяцев

Плотность червей, экз./м ²	21–22°С			$\bar{A} \pm m$	5°С			$\bar{A} \pm m$
	Исходная концентрация				Исходная концентрация			
	№ 1 ¹	№ 2	№ 3		№ 1	№ 2	№ 3	
2 500	$1,0 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,3$	$1,13 \pm 0,07$	$1,4 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,3$	$1,24 \pm 0,08$
5 000	$1,0 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,4$	$1,30 \pm 0,14$	$1,4 \pm 0,4$	$1,2 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,3$	$1,35 \pm 0,06$
10 000	$1,0 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,4$	$1,6 \pm 0,4$	$1,39 \pm 0,18$	$1,4 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,4$	$1,47 \pm 0,07$
$\bar{A} \pm m$	1,0	$1,33 \pm 0,09$	$1,40 \pm 0,15$	$1,24 \pm 0,08$	1,4	$1,33 \pm 0,13$	$1,30 \pm 0,10$	$1,34 \pm 0,05$

Концентрация № 3
(начальное содержание нефти 11,19 г/кг)



Концентрация № 2
(начальное содержание нефти 5,45 г/кг)



Концентрация № 1
(начальное содержание нефти 2,35 г/кг)

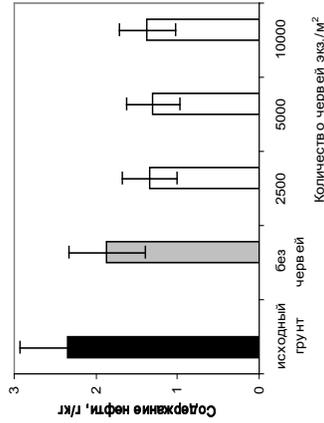
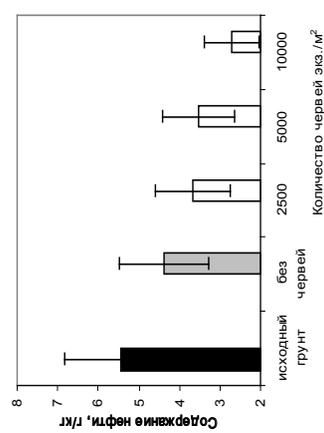
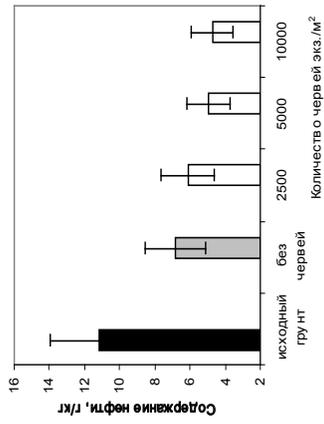
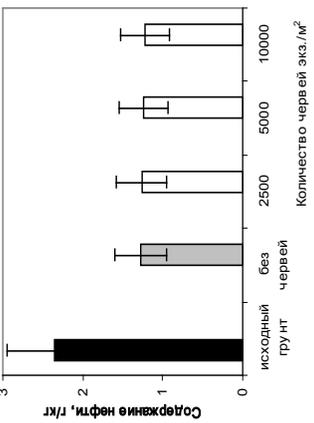


Рис. 1. Содержание нефти (г/кг воздушно-сухого ила) в экспериментальных емкостях через 6 месяцев после начала эксперимента; «исходный грунт – ил» на момент постановки эксперимента (посадки червей)

Температура, °С
21-22°C

Следует отметить, что при низких температурах воды (5°C) процессы очищения, в среднем, проходили активнее (судя по отношению «контроль / опыт»), чем при температуре $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$: при плотности червей $2\,500$ экз./м² – на 10%, при $5\,000$ экз./м² – на 4%, при $10\,000$ экз./м² – на 6%. Общеизвестно, что одними из основных факторов, влияющих на активность процессов деструкции нефти, являются температура среды и содержание кислорода. При увеличении температуры активность углеводородокисляющих бактерий (УОБ) возрастает. Как отмечают И.В. Перетрухина с соавт. [6], изменения углеводородокисляющей активности бактерий носят выраженный сезонный характер и связаны с изменениями температуры воды. Минимальные значения активности наблюдаются, когда температура воды близка к минимальной, а максимальные значения углеводородокисляющей активности имеют место в летний период времени при максимальных температурах воды.

Кислородный режим влияет на активность УОБ аналогично: при увеличении концентрации растворенного кислорода процессы деструкции проходят более активно. Известно, что для полного окисления 1 мг углеводов необходимо как минимум 3–4 мг кислорода [7]. В поставленном нами эксперименте наиболее оптимальный кислородный режим для прохождения процессов деструкции нефти наблюдался при температуре 5°C . Так как аэрация экспериментальных емкостей не проводилась и были исключены процессы фотоокисления нефти и, соответственно, фотосинтетические процессы, то одним из единственных путей поступления кислорода в экспериментальные емкости следует считать инвазию кислорода из атмосферы. Используя табличные данные по зависимости равновесной концентрации кислорода в воде от температуры [8], приведем значения концентрации кислорода при температурах эксперимента: $5,0^{\circ}\text{C}$ – 12,79 мг/л; $21,5^{\circ}\text{C}$ – 8,75 мг/л. Очевидно, что содержание кислорода в экспериментальных емкостях было ниже, чем в контроле, ввиду его потребления биоценозом аквариума (микроорганизмы и черви). По нашим данным, полученным ранее, при температуре $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$ в аквариумных емкостях, где не проводилась аэрация, содержание кислорода в аквариумах без червей наблюдалось на уровне 4,4–4,8 мг/л, а в аквариумах с лимнодрилусами – 3,1–3,2 мг/л. При содержании растворенного кислорода в воде менее 5 мг/л (при температуре 23°C) черви реагируют более активными «дыхательными» движениями, увеличением части тела, участвующей в этих движениях, и снижением пищевой активности [9]. В условиях нашего эксперимента содержание кислорода в емкостях с температурой воды $21\text{--}22^{\circ}$ было не более 3 мг/л, что затормаживало процессы микробной деструкции нефти и снижало пищевую активность лимнодрилусов.

Сравнительный анализ содержания нефти в исходных илах и в конце эксперимента показал, что максимальное снижение содержания нефти наблюдалось при максимальной концентрации нефти в илах в эксперименте (11,19 г/кг) при температуре $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$: при численности лимнодрилусов $10\,000$ экз./м² – в 2,8 раза и при численности лимнодрилусов $5\,000$ экз./м² – в

2,6 раза. В условиях низких температур (5°C) эти показатели были немного ниже при той же концентрации нефти: при численности лимнодрилусов $10\,000$ экз./ м^2 – в 2,4 раза, $5\,000$ экз./ м^2 – в 2,3 раза. Объединив результаты, полученные в разных температурных условиях, в единые совокупности, используя критерий Вилкоксона, мы отметили 5%-ные достоверные отличия между содержаниями нефти в конце эксперимента в контрольных и опытных емкостях во всех концентрациях (рис. 2).

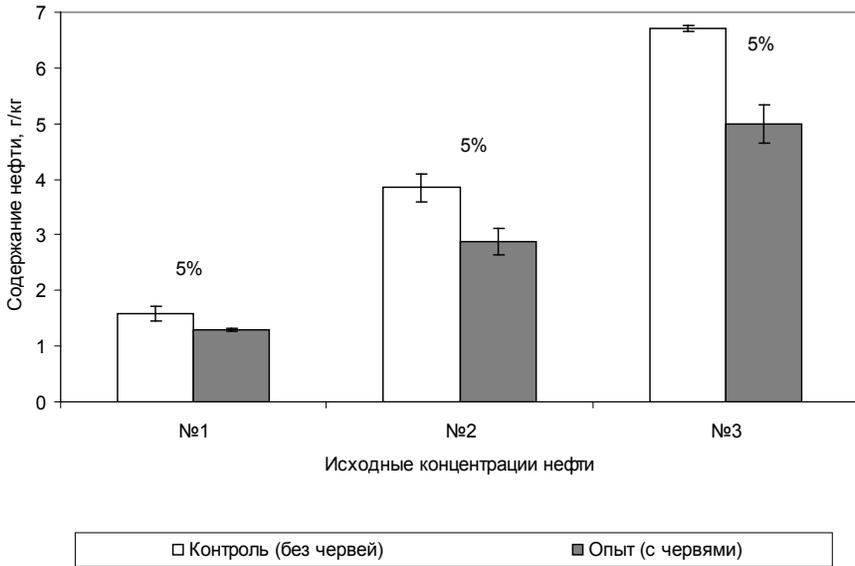


Рис 2. Содержание нефти в экспериментальных емкостях в конце эксперимента

Выводы

1. Установлено влияние плотности популяции червей *Limnodrilus hoffmeisteri* на активность процессов деструкции нефти в донных отложениях: с увеличением их количества наблюдается тенденция снижения содержания нефти в донных отложениях.

2. Содержание нефти в илах контрольных аквариумов (без червей) снизилось по сравнению с исходным загрязненным илом при температуре $21-22^{\circ}\text{C}$ в 1,73 раза; при температуре 5°C – в 1,37 раза, что связано с физико-химическими и микробиологическими аспектами самоочищения илов.

3. При низких температурах воды (5°C) и при температуре $21-22^{\circ}\text{C}$ активность процессов очищения практически одинакова; по средним значениям, процессы очищения проходили активнее при низких температурах: при плотности червей $2\,500$ экз./ м^2 – на 10%, $5\,000$ экз./ м^2 – на 4%, $10\,000$ экз./ м^2 – на 6%, что, вероятно, связано с более благоприятными кислородными условиями.

4. Максимальное снижение содержания нефти наблюдалось при максимальной концентрации нефти в илах в эксперименте (11,19 г/кг) при температуре 21–22°C, при численности лимнодрилусов 10 000 экз./м² – в 2,8 раза.

5. Относительно высокие темпы очистных процессов, проходящих в илах при низких температурах воды, расширяют перспективы использования технологии очистки донных отложений от нефти с использованием червей-тубифицид в зимний период. Для эффективной реализации очистных мероприятий в зимний период требуется поддержание растворенного в воде кислорода не менее 5–6 мг/л.

Литература

1. Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н., Кутукова К.Н. Комплексное использование отходов производства в качестве сорбентов нефтепродуктов // Экология и промышленность России. 2009. № 1. С. 36–38.
2. Мецряков С.В., Смирнова Т.С. Проблемы загрязнения природных вод предприятиями нефтегазового комплекса и пути их решения // Экология и промышленность России. 2008. № 8. С. 33–37.
3. Способ биологической очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов: пат. 2357929 Рос. Федерация: МПК C02F3/32, C12N1/26 / Воробьев Д.С., Залозный Н.А., Лушников С.В., Франк Ю.А. / заявитель и патентообладатель ООО «НТО «Прибор-сервис». № 2007124025/13; заявл. от 26.06.2007; опублик. 10.06.2009, 1 табл. (ил.).
4. Иоганзен Б.Г., Залозный Н.А., Иголкин Н.И. и др. Исследование биоценозопов таежной зоны // Проблемы экологии / под ред. Б.Г. Иоганзена. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1976. Т. 4. С. 3–25.
5. Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М. : Наука, 1984. 424 с.
6. Перетрухина И.В., Ильинский В.В., Литвинова М.Ю. Определение скоростей биодеградации нефтяных углеводородов в воде литорали Кольского залива // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 5. С. 828–832.
7. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
8. Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. СПб. : Кримас+, 2004. 248 с.
9. Воробьев Д.С., Залозный Н.А., Франк Ю.А. и др. К вопросу о роли тубифицид в потреблении кислорода в донных отложениях, загрязненных нефтью // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 1 (4). С. 702–706.

Поступила в редакцию 21.10.2011 г.

Danil S. Vorobiev^{1,2}, Yulia A. Frank^{2,3}, Sergey V. Lushnikov³

¹Tomsk Petroleum Institute, Tomsk, Russia

²Biological Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia

³Research and Technology Association «Priborservice» Ltd. Tomsk, Russia

INFLUENCE OF *Limnodrilus hoffmeisteri* WORMS POPULATION SIZE ON CLEANING OIL POLLUTED BOTTOM SEDIMENTS

The problem of oil polluted territories and water areas decontamination is one of topical tasks for resolving. The problem is far from being completely solved in spite of a variety of technologies for oil polluted environments cleaning and restoring that exist today. The aim of the current study was to investigate *Limnodrilus hoffmeisteri* population size influence on oil destruction in contaminated sludge for optimizing the technology for bottom sediments cleaning using Tubificidae worms.

The data on oil contained in sediments of the experimental vessels which were obtained in this study indicate the tendency to acceleration of bottom sediments cleaning from oil with the increasing of worm's number. Decreasing of oil concentration in comparison to control conditions was observed in all experimental vessels. Decreasing of oil content in sediments of the control vessels (without worms) was detected both at high temperature (21–22°C) and low temperature (5°C).

Oil content in the control vessels decreased in 1.73 times at the temperature of 21–22°C; in 1.37 times at the temperature of 5°C. The decreasing of oil content in sediments is connected with physic and chemical and microbiological aspects of bottom sediments self decontamination. It is necessary to note that cleaning processes were, in average, more intensive at 5°C than at 21–22°C: for 10% at 2 500 cohorts/m², for 4% at 5 000 cohorts/m² and for 6% at 10 000 cohorts/m².

The analysis of initial and final oil content in the experiment revealed its maximum decreasing at the highest oil concentration (11.19 g/kg) and at the temperature of 21–22°C: reduction in 2.8 times at 10 000 cohorts/m² and in 2.6 times at 5 000 cohorts/m². The same characteristics were less at the same oil concentration at 5°C: reduction in 2.4 times at 10 000 cohorts/m² and 2.3 times at 5 000 cohorts/m². Reliable ($p < 0.05$) reduction of oil content in sludge was observed with the increasing of worm's number (2 500 cohorts/m² – 5 000 cohorts/m² – 10 000 cohorts/m²) during combining data from different temperatures experiments into common battery with Wilkoxson criterion.

The possibility of a rather fast cleaning processes in oil contaminated sludge at a low temperature extends the perspectives of the technology application in winter time. For effective realization of cleaning in winter, dissolved oxygen maintenance at the level of 5–6 mg/l is required.

Key words: bottom sediments; sludge; oil pollution; Tubificidae; cleaning of water bodies.

Received October 21, 2012