

Биоиндикация нефтезагрязнённых почв с использованием беспозвоночных

© 2021. Е. Н. Мелехина, к. б. н., с. н. с., А. А. Таскаева, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: taskaeva@ib.komisc.ru

В статье рассматривается возможность применения коллембол (Collembola) как индикаторной группы почвенных беспозвоночных в случае нефтяного загрязнения, а также скорости процесса их восстановления в почвах, рекультивированных разными способами. Обследовано восемь опытных площадок с применением различных биопрепаратов и агрохимической обработкой почвы, а также фоновое сообщество в Усинском районе Республики Коми. Показано снижение разнообразия, численности ногохвосток, обеднение спектра их жизненных форм, перестройка структуры доминирования на опытных площадках спустя 12 лет после рекультивации. Чувствительными к нефтяному загрязнению оказались эуэдафические и гемиедафические виды. Выявлены виды, характерные для начальных стадий восстановления почвенных сообществ после нефтяного загрязнения (*Ceratophysella succinea*, *Proisotoma minima*, *Desoria hiemalis*), а также вид, который может быть чувствительным к нефтяному загрязнению (*Protaphorura jacutica*). Анализ разнообразия ногохвосток может служить альтернативой экотоксикологическим тестам при оценке эффективности методов рекультивации и скорости процессов восстановления нарушенных почв.

Ключевые слова: ногохвостки, загрязнение наземных экосистем, рекультивация, европейская часть России.

Bioindication of oil-contaminated soils using invertebrates

© 2021. E. N. Melekhina ORCID: 0000-0002-3738-6520*
A. A. Taskaeva ORCID: 0000-0002-4519-8458*

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: taskaeva@ib.komisc

The article discusses the possibility of using springtails (Collembola) as an indicator group of soil invertebrates in the case of oil pollution, as well as the rate of their recovery in soils reclaimed by different methods. Eight experimental sites were examined with the use of various biological preparations, agrochemical soil treatment and the background community in the Usinsk region of the Komi Republic. A decrease in the diversity and abundance of springtails, a depletion of the spectrum of their life forms, and a restructuring of the dominance structure on the experimental sites 12 years after reclamation are shown. The euedaphic and hemiedaphic species were found to be sensitive to oil pollution. Species characteristic of the initial stages of restoration of soil communities after oil pollution (*Ceratophysella succinea*, *Proisotoma minima*, *Desoria hiemalis*), as well as a species that may be sensitive to oil pollution (*Protaphorura jacutica*), have been identified. Analysis of the diversity of springtails can serve as an alternative to ecotoxicological tests in assessing the effectiveness of reclamation methods and the rate of restoration of disturbed soils.

Keywords: springtails, pollution of terrestrial ecosystems, bioremediation, European part of Russia.

Загрязнение почв в результате разливов нефти и нефтепродуктов, в том числе при их транспортировке, является основной экологической проблемой в регионах развития нефтегазовой отрасли [1]. Нефть, попадая в почву, приводит к изменению её физико-химических свойств и нарушению активности почвенной биоты [1, 2]. В этой связи представляет интерес

биологическая оценка степени загрязнённости, а, следовательно, и состояния таких почв.

Биологические методы оценки состояния природной среды находят применение в современных экологических исследованиях. Одной из групп почвенных животных – биоиндикаторов являются коллемболы или ногохвостки (Collembola) [3]. Они используются

для мониторинга природных экосистем на уровне комплекса видов [3]. На территориях с высокой антропогенной нагрузкой они часто остаются единственной группой, по которой можно судить о степени воздействия на почву [4]. Коллемболы чувствительны к изменениям окружающей среды и применяются в экотоксикологических исследованиях [4]. Актуальность изучения коллембол как биоиндикаторов территорий, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами, определяется, в первую очередь, тем, что эти факторы вызывают ответную реакцию у животных, которая зависит как от дозы загрязнителя, так и от длительности загрязнения [2, 4].

Тем не менее, работ о сообществах коллембол в загрязнённых нефтью почвах недостаточно. При этом большинство из них касается либо южных стран, либо южных территорий России [2, 5–7]. Ранее в Усинском районе Республики Коми были проведены многолетние исследования почвенных зооценозов на участках с нефтяным загрязнением [8–13]. Были выявлены закономерности многолетней динамики численности и относительного обилия ключевых таксономических групп микроартропод, в том числе ногохвосток. Коллемболы названы в числе индикаторных групп этапов восстановительной сукцессии. Однако до сих пор незначительное внимание уделяется использованию ногохвосток как биоиндикаторов для оценки процессов восстановления почв, подверженных нефтяным разливам. Биоценозы Севера вследствие суровых биоклиматических условий характеризуются относительно низкой способностью к самоочищению [13–15]. Как само загрязнение, так и мероприятия рекультивации могут приводить к существенному изменению сообществ микроартропод, в том числе коллембол, и их способности осуществлять экосистемные функции.

Цель данной работы состояла в изучении таксоценов коллембол на участках рекультивации и оценке их биоиндикационного потенциала в случае нефтяного загрязнения.

Материалы и методы исследований

Исследования проведены на экспериментальном участке № 20, расположенном в зоне деятельности нефтедобывающего предприятия ТПП «ЛУКОЙЛ-Усинскнефтегаз», на территории Возейского нефтяного месторождения Усинского района Республики Коми (66°37' с. ш., 57°07' в. д.). В 1996 г. здесь произошла

авария. К началу рекультивационных работ (2002 г.) содержание нефти в почве составляло от 87 до 465 мг/г [1]. Всего было заложено восемь вариантов опыта с использованием различных методов рекультивации, площадь каждой опытной площадки составляла 0,2 га. Предварительно, перед началом опыта, на всех площадках проведена техническая рекультивация: механическая уборка нефти и фрезерование почвы. Нами были обследованы следующие опытные площадки с применением биопрепаратов: П1: биопрепарат «Петролан», П4: биопрепарат «Универсал» с внесением минеральных удобрений, П5: биопрепарат «Омуг», П6: биопрепарат «Универсал» с внесением лигносорбента, П8: биопрепарат «Деконтам-3»; П9: биопрепарат «Родер». Состав биопрепаратов и разработчики указаны в работе [1]. Также в почву этих площадок были внесены минеральные удобрения, проведён посев трав. На площадке П7 проведена агрохимическая рекультивация: известкование почвы, внесение минеральных удобрений. В качестве контрольной выступала площадка П2 с применением только технической рекультивации без внесения биопрепаратов, минеральных удобрений и посева трав [1]. Фоновым сообществом было ивово-ерниковое осоково-хвощевое болото с торфяной почвой, без загрязнения нефтью. До разлива нефти на площади загрязнения было развито растительное сообщество, идентичное фоновому. Более подробное описание экспериментальных и фонового участков представлено в работах [9–12].

В августе 2014 г., спустя 12 лет после проведения рекультивации, на каждой опытной площадке и фоновом участке было отобрано по 10–12 почвенных проб размером 5 × 5 см на глубину до 10 см. Экстракцию коллембол осуществляли по общепринятой методике с использованием электоров Берлезе-Тюльгрена в 96%-ный спирт в течение 7–10 дней – до достижения воздушно-сухого состояния почвы [3]. Жизненные формы выделены по системе [16].

Для оценки значимости различий между выборками использовали непараметрический критерий Манна-Уитни при $p < 0,05$. Видовое разнообразие оценивалось путем расчёта индексов Шеннона и Бергера-Паркера, дифференцирующее характеризовали путём попарного сравнения видового состава коллембол и графического представления результатов в виде дендрограммы. В качестве показателя соответствия использовали метод Уарда для

качественных данных. Статистическую обработку результатов проводили в программе PAST 3.0.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о сильных различиях разнообразия и количественных показателей сообществ коллембол экспериментальных участков и фонового. Исследования северных территорий, затронутых деятельностью человека, также демонстрируют изменения состава и структуры населения ногохвосток [17–19]. Всего было зарегистрировано 24 вида коллембол (табл.), при этом видовой состав фонового участка сильно отличался от такового на опытных площадках (рис.). Аналогичная картина отмечена и другими авторами [2, 5]. Группировки ногохвосток на опытных площадках характеризовались достаточно низким для однократных учётов уровнем видового богатства (включали от 2 до 8 видов), о чём свидетельствует индекс Шеннона. Достоверных различий их разнообразия на площадках с различными методами рекультивации не выявлено, но оно оказалось статистически значимо выше в фоновом сообществе (12 видов).

Почти все обследованные группировки опытных площадок отличались повышенной относительной плотностью немногих видов (табл.), часто превышающей уровень эудоминирования (39,4%) по шкале Эн-

гельманна [20]. Средний уровень индекса доминирования Бергера-Паркера составлял $0,72 \pm 0,14$. На участках П6, П9 и П7 таким эудоминантом был вид *Desoria hiemalis*, обычный в районе исследований; на участках П8 и П2 – *D. olivacea*, обычно обильный во влажных местообитаниях [21], а на П5 – *Friesea truncata*. Более равномерное распределение видов по численности характерно лишь для фонового участка (индекс Бергера-Паркера равен 0,5). В целом, на всех исследованных участках преобладали космополитные и/или широко распространённые виды (табл.), среди которых вид *Desoria fennica* впервые отмечен для Республики Коми. Кроме того, для исследованных площадок выявлены некоторые особенности. Во-первых, обращает на себя внимание отсутствие *Folsomia quadrioculata* в почвах опытных площадок и его низкое обилие в фоновом сообществе. Это вид убиквист, он присутствует в чрезвычайно высоких плотностях (до 50 тыс. экз./м²) в самых различных биотопах, в том числе и нарушенных. В то же время он чувствителен к загрязнению радиоактивными элементами, тяжёлыми металлами [17] и, по-видимому, нефтью, которая является токсичной и отрицательно влияет на популяцию данного вида. Во-вторых, отсутствие *Parisotoma notabilis* в большинстве экспериментальных площадок также интересно, поскольку данный вид устойчив к различным антропогенным воздействиям и даже предпочитает умеренно нарушенные биотопы [22]. В-третьих, на площадке П2, где была проведена только техническая рекультивация, обнаружен устойчивый к высокому загрязнению вид *Proisotoma minima*. Это характерный вид начальных стадий сукцессии [22], поэтому его присутствие свидетельствует о ранних стадиях восстановления населения коллембол на данной площадке. Выявлен вид, который может быть чувствительным к нефтяному загрязнению (*Protaphorura jacutica*). Известно, что он широко встречается в восточно-европейских тундрах [23].

Ранее было показано, что в результате загрязнения нефтью массовая элиминация коллембол происходит в первые несколько дней, а их количество сокращается почти в 4–10 раз [5]. Восстановление происходит очень медленно; в наблюдениях [2] показатели численности не достигали контрольных значений даже спустя 7–8 лет после загрязнения. В работе [11] было показано, что сукцессии микроартропод на участках, загрязнённых нефтью, связаны с сукцессией растительного

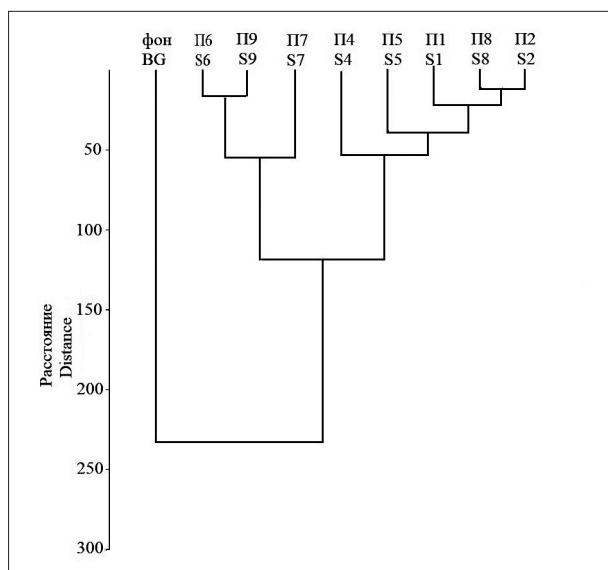


Рис. Кластерный анализ (метод Варда) сообществ коллембол на исследованных участках
Fig. Cluster analysis (Wards method) of springtail communities in the sites in experimental plot and natural undisturbed plot

Таблица / Table

Обилие (%) видов и жизненных форм коллембол на исследованных участках
Abundance (%) of species and life forms of Collembola in research sites

Вид Species	П1		П4		П5		П6		П8		П9		П7		П2		Фон		
	S1	S4	S5	S6	S8	S9	S7	S2	S5	S6	S8	S9	S7	S2	S5	S6	S8	S9	Background
<i>Protaphorura jacobitica</i> (M.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16,4
<i>Ceratophysella succinea</i> (G.)	57,1	—	—	20,0	—	—	—	—	—	—	—	6,8	—	—	—	—	—	—	—
<i>Brachystomella parvula</i> (S.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
<i>Endonura reticulata</i> (A.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7	—	—	—	—	—	—
<i>Friesea truncata</i> C.	—	—	58,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,4
<i>Micranura pugnata</i> B.	7,1	—	—	—	—	3,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,2
<i>Neanura muscorum</i> (T.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7	—	—	—	—	—	—
<i>Desoria hiemalis</i> (S.)	—	—	20,8	52,0	—	—	—	—	—	—	—	69,5	—	—	—	—	—	—	7,6
<i>Desoria neglecta</i> (S.)	—	—	—	—	—	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Desoria olivacea</i> (T.)	—	—	—	—	71,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59,3	—	—	—	—
<i>Desoria fennica</i> (R.)	—	26,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Desoria violacea</i> (T.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Folsomia quadrioculata</i> (T.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
<i>Isotoma viridis</i> B.	—	—	—	3,0	—	—	—	—	—	—	—	1,7	—	—	—	—	—	—	3,1
<i>Pachyotoma crassicauda</i> (T.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
<i>Parisotoma notabilis</i> (S.)	—	—	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
<i>Proisotoma minima</i> (A.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Lepidocyrtus lignorum</i> (F.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Orchesella flavescens</i> (B.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Smithurides schoetti</i> A.	—	29,6	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Sphaeridia pumilis</i> (K.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Smithurinus aureus</i> (L.)	28,6	5,6	17,0	22,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Smithurinus concolor</i> (M.)	7,1	38,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Deuterosmithurinus bicinctus</i> (K.)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Число видов на пробу / Species richness	0,9±0,3	1,4±0,4	3,2±0,6	2,5±0,6	2,0±0,5	3,8±1,1	3,3±0,7	2,2±0,5	2,2±0,5	2,0±0,5	3,8±1,1	3,3±0,7	0,7±0,2 ^b	2,2±0,5	2,2±0,5	2,0±0,5	3,8±1,1	3,3±0,7	6,6±0,5
Индекс разнообразия Шеннона / Shannon's index	0,2±0,1 ^b	0,3±0,1 ^b	1,0±0,2 ^{ab}	0,6±0,2 ^b	0,6±0,1 ^b	0,8±0,2 ^{ab}	0,7±0,2 ^b	0,6±0,2 ^b	0,6±0,1 ^b	0,6±0,1 ^b	0,8±0,2 ^{ab}	0,7±0,2 ^b	0,7±0,2 ^b	0,6±0,2 ^b	0,6±0,2 ^b	0,6±0,2 ^b	0,8±0,2 ^{ab}	0,7±0,2 ^b	1,3±0,05 ^a
Индекс Бергера-Паркера Berger-Parker's index	0,9±0,1	0,9±0,1	0,6±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	0,7±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	0,7±0,1	0,7±0,1	0,7±0,1	0,7±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	0,5±0,03
Численность, тыс. экз./м ² Density, thous. Ind./m ²	0,7±0,3 ^b	4,0±2,0 ^{ab}	5,3±2,4 ^b	5,0±1,2 ^b	3,5±1,4 ^b	5,9±1,4 ^b	7,5±3,9 ^{ab}	2,7±0,6 ^b	3,5±1,4 ^b	3,5±1,4 ^b	5,9±1,4 ^b	7,5±3,9 ^{ab}	2,7±0,6 ^b	2,7±0,6 ^b	2,7±0,6 ^b	3,5±1,4 ^b	5,9±1,4 ^b	7,5±3,9 ^{ab}	21,1±3,4 ^a
Жизненные формы (%) / Life forms (%): Поверхностно обитающие / Epiedaphic Гемизафические / Hemicdaphic Эузафические / Euedaphic	92,9	100	98,1	100	100	96,6	89,4	88,9	100	100	96,6	89,4	88,9	88,9	100	100	96,6	89,4	64,0
	7,1	—	1,9	—	—	3,4	10,6	11,1	—	—	3,4	10,6	11,1	11,1	—	—	3,4	10,6	19,7
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16,3

Примечание: П1: биопрепарат «Петролан», П4: биопрепарат «Универсал» с внесением минеральных удобрений, П5: биопрепарат «Омуз», П6: биопрепарат «Универсал» с внесением лигносорбента, П8: биопрепарат «Деконтан-3», П9: биопрепарат «Родер», П7: агрохимическая рекультивация, П2: контроль. Жирным шрифтом выделены эудоминанты, подчерк означает, что вид отсутствует. Разные буквы указывают на достоверные различия между исследуемыми участками на основе теста Манна-Уитни при $p < 0,05$.

Note: S1: biopreparation "Petrolan", S4: biopreparation "Universal" with mineral fertilizers, S5: biopreparation "Omuz", S6: biopreparation "Universal" with lignin sorbents, BAG, S8: biopreparation "Dekontam-3", S9: biopreparation "Roder", S7: phytoremediation (without biopreparation), S2: control (only mechanical oil removal. No seed plants, fertilizing, or biopreparations). Eudominants are highlighted in bold, dash means that species is absent. Different letters indicate significant differences between the studied sites based on the Mann-Whitney test at $p < 0.05$.

сообщества после рекультивации. Так, на ранних стадиях сукцессии фитоценоза, через четыре года после рекультивации, коллемболы отсутствовали на опытных площадках, но на стадии сукцессии «высокое проективное покрытие сеяных злаков» зарегистрировано повышение их численности и относительного обилия [11]. Через семь лет после рекультивации коллемболы были доминирующей группой, с наиболее высоким обилием под сеянными злаками, как на площадках с биопрепаратами, так и на площадке «агрехимические методы». На площадке «Родер» относительное обилие коллембол под сеянными злаками (стадия «высокое проективное покрытие») составляло под двукисточником более 87% всей группировки, под тимофеевкой – 50%. Плотность населения коллембол под двукисточником достигала 220 тыс. экз./м², в то время как в почве фонового участка она составляла 4400 экз./м² [11]. Новые данные свидетельствуют о том, что спустя 12 лет после проведения рекультивации плотность ногохвосток составила 700–7550 экз./м², при этом оказалась достоверно ниже, чем на фоновом участке (21100 экз./м²). Можно предположить, что численность коллембол через 12 лет после рекультивации начинает приближаться к фоновым значениям: после её резкого увеличения, которое наблюдалось на определённой стадии восстановления, начинается её снижение, что вполне согласуется с полученными ранее данными о динамике относительного обилия коллембол [11, 12].

Спектр жизненных форм ногохвосток, являясь показателем стабильности протекающих экологических процессов в наземных экосистемах [24], выявил отсутствие почвенных видов на опытных площадках. Кроме того, полупочвенные виды присутствовали лишь на некоторых из них (табл.), в то время как на фоновом участке был представлен полный набор жизненных форм. Известно, что эу- и гемиедафические виды обладают избирательным преимуществом в загрязнённых почвах [25] и чувствительны к физическим нарушениям почвы [19]. Высокое обилие поверхностно обитающих форм коллембол на всех исследованных участках подчёркивает способность этих видов адаптироваться к быстрым изменениям окружающей среды благодаря их мобильности [26].

В соответствии с полученными данными по структуре доминирования, численности и спектру жизненных форм коллембол большинство анализируемых опытных площадок

образуют кластеры (рис.). Наиболее чётко вычленивается группировка ногохвосток фонового участка. Отдельный кластер образуют группировки ногохвосток, населяющих почвы площадок П6, П9 и П7, где применялись биопрепараты «Универсал», «Родер» и была проведена агрохимическая обработка. Население коллембол этих сообществ характеризовалось наиболее высокой численностью, высоким фаунистическим богатством и выровненной структурой (табл.). Третий кластер образуют группировки коллембол площадок П4, П5, П1, П8 и П2, для которых было характерно более низкое разнообразие, по сравнению с площадками второго кластера. Это указывает на то, что рекультивация торфяной почвы с применением биопрепаратов «Омуг», «Петролан», «Деконтам-3», а также при помощи только технической обработки, без высева трав и внесения минеральных удобрений, была менее эффективна. В целом можно заключить, что через 12 лет после проведения рекультивации сообщества коллембол находились в угнетённом состоянии, что подтверждалось низким разнообразием, численностью, упрощённой структурой таксоценоза, отсутствием почвенных видов.

Заключение

Показаны реакции почвенных беспозвоночных, на примере коллембол, на нефтяное загрязнение. Обследовано восемь опытных площадок с применением различных биопрепаратов, агрохимической обработкой почвы и фоновое сообщество. Установлено снижение численности и разнообразия ногохвосток на участках опытной рекультивации. Отмечена перестройка структуры доминирования, обеднение спектра жизненных форм, выпадение из состава группировок эуэдафических видов и снижение численности гемиедафических видов. Выявлен вид, который может быть чувствительным к нефтяному загрязнению (*Protaphorura jacutica*). Индикаторами ранних стадий восстановления почвенных сообществ можно считать виды *Ceratophysella succinea*, *Proisotoma minima*, *Desoria hiemalis*. Таким образом, коллемболы являются хорошими индикаторами состояния почвы, загрязнённой нефтью. Анализ разнообразия ногохвосток в почвенных образцах может служить альтернативой экотоксикологическим тестам при оценке эффективности методов рекультивации и скорости процессов восстановления нарушенных почв.

Авторы признательны М.Ю. Маркаровой за организацию полевых исследований. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-05028 мк и в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН АААА-А17-117112850235-2.

References

1. Nature-conservation measures on the refinery companies. Part 1: Rehabilitation of petroleum polluted soils in Usinsk district, Komi Republic. Syktyvkar: Komi nauchnyy tsentr UrO RAN, 2006. 208 p. (in Russian).
2. Artemyeva T.I. Complexes of soil animals and the issues of reclamation of technogenic territories. Moskva: Nauka, 1989. 111 p. (in Russian).
3. Gilyarov M.S. Zoological method of soil diagnostic. Moskva: Nauka, 1965. 175 p. (in Russian).
4. Kireeva N.A., Kabirov T.R., Dubovik I.E. Complex biotesting of oil contaminated soils // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 1. P. 65–69 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-1-041-45
5. Utrobina N.M., Orlov O.I., Artemyeva T.I. Influence of soil pollution by oil on Collembola // Fauna and ecology of springtails (Collembola). Moskva: Nauka, 1984. P. 172–179. (in Russian).
6. Mordkovich V.G., Andrievsky V.S., Berezina O.G., Lyubchansky I.I., Marchenko I.I. The animal population as an indicator of the ecological status of the soils of the north of West Siberia under the action of pollution with oil // Contemporary problems of ecology. 2004. V. 4. P. 467–474 (in Russian).
7. García-Segura D., Castillo-Murrieta I.M., Martínez-Rabelo F., Gomez-Anaya A., Rodríguez-Campos J., Hernández-Castellanos B., Contreras-Ramos S.M., Barois I. Macrofauna and mesofauna from soil contaminated by oil extraction // Geoderma. 2018. V. 332. P. 180–189. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.06.013
8. Melekhina E.N. The effect of oil pollution on the soil microfauna of the tundra communities of the extreme northern taiga // Ekologiya cheloveka. 2007. No. 1. P. 16–23 (in Russian).
9. Melekhina E.N., Markarova M.Yu., Shchemelinina T.N., Anchugova E.M., Kanev V.A. Secondary successions of biota in oil-polluted peat soil upon different biological remediation methods // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. P. 643–653. doi: 10.1134/S1064229315060071
10. Melekhina E.N., Markarova M.Yu., Anchugova E.M., Shchemelinina T.N., Kanev V.A. The efficiency assessment of oil polluted soil recultivation methods // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences. 2016. No. 3. P. 61–70 (in Russian).
11. Melekhina E.N. Recovery of soil invertebrates after oil pollution: importance of composition and development degree of plant community // Vestnik Instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. 2019. No. 1. P. 9–17 (in Russian). doi: 10.31140/J.VESTNIKIB.2019.1(208).2
12. Melekhina E.N. Recovery of soil microfauna successions in oil-polluted ecosystems of the European Subarctic // Biology Bulletin. 2020. V. 47. P. 97–105. doi: 10.1134/S1062359020010082.
13. Melekhina E.N., Kanev V.A., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Novakovskiy A.B., Taskaeva A.A., Tarabukin D.V., Velegzhaninov I.O., Rasova E.E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: a multidisciplinary approach // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 123–129 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-123-12
14. Markarova M.Yu. The use of hydrocarbon-oxidizing bacteria for the recovery of oil-contaminated land in the conditions of the Far North, Perm, 1999. 22 p. (in Russian).
15. Kireeva N.A., Rafikova G.F., Shchemelinina T.N., Markarova M.Yu. Biological activity of oil-contaminated and remediated peat-gley soils in the Komi Republic // Agrochemistry. 2008. V. 8. P. 68–75 (in Russian).
16. Stebaeva S.K. Springtails life forms (Collembola) // Zool. Journ. 1970. V. 49. No. 10. P. 1437–1455 (in Russian).
17. Coulson S.J., Fjellberg A., Melekhina E.N., Taskaeva A.A., Lebedeva N.V., Belkina O.A., Seniczak S., Seniczak A., Gwiazdowicz D.J. Microarthropod communities of industrially disturbed or imported soils in the High Arctic; the abandoned coal mining town of Pyramiden, Svalbard // Biology and Conservation. 2015. V. 24. P. 1671–1690. doi: 10.1007/s10531-015-0885-9
18. Olejniczak I., Boniecki P., Kaliszewicz A., Pan-teleeva N. The response of tundra springtails (Collembola, Hexapoda) to human activity on the Murman coast of the Kola Peninsula, Russia // Polar Science. 2018. V. 15. P. 99–103. doi: 10.1016/j.polar.2017.12.005
19. Taskaeva A.A., Mandrik E.A., Konakova T.N., Kudrin A.A. Characteristic of the microarthropods communities in post-agrozone and tundra soils of the European Northeast of Russia // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. P. 661–670. doi: 10.1134/S1064229319060127
20. Engelmann H.D. Zur dominanzklassifizierung von Bodenarthropoden // Pedobiologia. 1978. V. 18. P. 378–380 (in German).
21. Potapov M.B. Synopses on Palaearctic Collembola. III. Isotomidae. Görlitz. 2001. V. 73. 603 p.
22. Kuznetsova N.A., Potapov M.B. Changes in structure of communities of soil springtails (Hexapoda: Collembola) under industrial pollution of the south-taiga bilberry pine forests // Russian Journal of Ecology. 1997. V. 26. P. 386–392.
23. Babenko A.B., Potapov M.B., Taskaeva A.A. The Collembola fauna of the East-European tundra // Russian Entomological Journal. 2017. No. 26. P. 1–30.
24. Vandewalle M., De Bello F., Berg M.P., Bolger T., Dolédec S., Dubs F., Feld C.K., Harrington R., Harrison P.A., Lavorel S., Martins da Silva P., Moretti M., Niemela J., Santos P., Sattler T., Sousa J.P., Sykes M.T., Vanbergen A.J., Woodcock B.A. Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms // Biodiversity and Conservation. 2010. V. 19. P. 2921–2947. doi: 10.1007/s10531-010-9798-9
25. Filser J., Wittmann R., Lang A. Response types in Collembola towards copper in the microenvironment // Envir. Pol. 2000. V. 107. No. 1. P. 71–78. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00130-X
26. Hopkin S.P. Biology of springtails, Insecta: Collembola. New York: Oxford University Press, 1997. 341 p.