

УДК 631.427.12

В. А. Мязин, В. В. Редькина

## Влияние загрязнения почвы нефтепродуктами на рост *Secale cereale* L. и перспективы ее использования при фиторемедиации

V. A. Myazin, V. V. Redkina

## The impact of soil contamination by oil products on the growth of *Secale cereale* L. and prospects for its use in phytoremediation

**Аннотация.** В работе проведена оценка влияния загрязнения почвы светлыми и темными нефтепродуктами на рожь многолетнюю (*Secale cereale* L.) и рассмотрена перспектива использования данного растения при фиторемедиации. Установлены остаточные концентрации нефтяных углеводородов в почве, при которых возможно проведение фиторемедиации с использованием ржи многолетней – не более 5 г/кг для светлых и не более 13 г/кг для темных нефтепродуктов.

**Abstract.** In the paper the effect of soil contamination by light and dark oil products on a rye (*Secale cereale* L.) and the prospects of using the plants with phytoremediation have been evaluated. Residual hydrocarbon oil concentration in the soil has been determined, phytoremediation may conduct not more than 5 g/kg of light and not more than 13 g/kg of dark oil.

**Ключевые слова:** фиторемедиация, *Secale cereale* L., нефтепродукты, агрозём Al-Fe-гумусовый.  
**Key words:** phytoremediation, *Secale cereale* L., petroleum products, cultivated Al-Fe-humus soil.

### Введение

В последнее время было проведено множество исследований, направленных на изучение реакции растений на загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами (НП) как в природных условиях на территориях нефтяных разливов, так и в лабораторных условиях с использованием различных тест-растений. Показано как положительное, так и отрицательное влияние нефти и НП на растения, зависящее от концентрации и типа нефтепродуктов, продолжительности и условий воздействия, вида растений, почвенно-климатических условий и др.

Обнаружено, что невысокие концентрации нефти и НП в почве (по разным данным, до 5 %) не оказывают достоверного влияния или даже стимулируют рост растений, увеличивая такие показатели, как всхожесть, биомассу, длину надземной и подземной части, ассимиляционную поверхность, содержание хлорофилла в листьях [1–3]. При увеличении содержания нефти в почве начинает оказываться ингибирующее влияние НП – снижение скорости прорастания семян и их количества, торможение роста растения и смещение фаз развития [4–7].

Различные растения в одинаковых условиях по-разному реагируют на действие одних и тех же нефтепродуктов. В результате многочисленных исследований удалось установить наиболее устойчивые к нефтяному загрязнению виды растений, которые впоследствии можно использовать на этапе фиторемедиации загрязненных почв. Среди таких растений встречаются как дикорастущие, так и окультуренные виды – кукуруза, подсолнечник, зеленые бобы, соя, рожь многолетняя, овсяница луговая, волоснец песчаный, двукосточник тростниковидный, кострец безостый, бодяк щетинистый [2; 7–11].

По результатам полевых исследований, проведенных на территории Мурманской области сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, выявлено, что рожь многолетняя проявляла устойчивость к загрязнению почвы нефтепродуктами.

Цель данной работы – оценить способность ржи к росту на почвах, загрязненных светлыми и темными продуктами переработки нефти, а также перспективы ее использования для фиторемедиации загрязненной почвы в условиях Кольского Севера.

Для этого был заложен полевой модельный эксперимент с разной степенью загрязнения почвы светлыми и темными НП. Район проведения работ находился в Мурманской области, в 2-х км южнее г. Апатиты (67°32'55.84" N 33°22'2.53" E, 120 м над ур. моря) на территории Полярной опытной станции ГНУ ВНИИР им. Н. И. Вавилова. По физико-географическим характеристикам район находится в пределах северной тайги. Почва на участке проведения полевого опыта – агрозём Al-Fe-гумусовый на песчаных озерно-ледниковых отложениях. Пахотный горизонт 0–20 см. Почва характеризуется слабокислой или

нейтральной реакцией среды ( $pH_{\text{вод}} = 6,3-6,6$ ), содержание С – 3,38 %, N – 0,3 %, Ca – 2,26 мг-экв/100 г, Mg – 0,41 мг-экв/100 г.

### Материалы и методы

В качестве загрязняющего вещества использовали дизельное топливо (ДТ) марки Л-0,2-62 в количестве 1,4, 2,8 и 14 л/м<sup>2</sup> и мазут топочный марки М-100 в количестве 1,3, 2,6 и 7,5 л/м<sup>2</sup>. После внесения НП почву не перемешивали. Площадь каждого варианта 1 м<sup>2</sup>.

Через год после загрязнения для определения степени фитотоксичности почвы и возможности проведения этапа фиторемедиации на опытные участки была посеяна рожь многолетняя (*Secale cereale* L.) сорта Хибины-2 (норма посева – 26 г/м<sup>2</sup>). Перед посевом в почву внесли азотно-фосфорно-калийное удобрение "Азофоска" (Нитроаммофоска) марки НРК (МОР) с содержанием действующих веществ – N – 16 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 16 %, K<sub>2</sub>O – 16 % в количестве 60 г/м<sup>2</sup>.

Через 3 месяца после посева в конце вегетационного периода провели учет фитомассы и высоты надземной части растений, количества и массы колосьев. Определение массовой доли НП в почве проводили согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 методом ИК-спектроскопии с использованием анализатора АН-2 [12]. Влажность почвы определяли общепринятым методом, высушивая навеску почвы при 105 °С до постоянного веса. Определение актуальной кислотности почвы проводили потенциометрическим методом на рН-метре с комбинированным электродом.

### Результаты

К моменту посева семян наиболее токсичные летучие компоненты нефтепродуктов испарились, а валовое содержание углеводов в слое почвы 0–10 см снизилось. В таблице представлены данные по содержанию НП в слое почвы 0–10 см через сутки после загрязнения и через 1 год.

Таблица

Содержание НП в слое почвы 0–10 см

Внесено в почву НП, л/м <sup>2</sup>	ДТ 1,4	ДТ 2,8	ДТ 14	Мазут 1,3	Мазут 2,6	Мазут 7,5
Содержание НП через 1 сут, г/кг	5,61 ± 0,43	17,79 ± 0,30	23,59 ± 0,56	3,47 ± 0,13	4,80 ± 0,12	25,30 ± 0,97
Содержание НП через 1 год, г/кг	0,55 ± 0,03	3,24 ± 0,17	5,28 ± 0,25	1,66 ± 0,09	2,58 ± 0,13	13,49 ± 0,67

Полученные данные показали, что перед посевом ржи в вариантах с низкой и средней дозой загрязнения ДТ и низкой дозой загрязнения мазутом процессы самоочищения привели к снижению содержания НП ниже значений ОДК – 4 г/кг для светлых НП и 2 г/кг для темных НП [13]. В вариантах с более высокой исходной степенью загрязнения содержание НП превышало ОДК. Влажность почвы в начале вегетационного периода на разных участках составляла от 29 до 36 %, что близко к значениям влажности незагрязненной почвы. Актуальная кислотность почвы – 6,1–6,2 ед. рН.

В результате учета, проведенного в конце вегетационного периода, установлено следующее. Достоверное снижение высоты растений от 10 до 48 % наблюдали на участках с исходно высокой степенью загрязнения мазутом и ДТ. В то же время на участке с низким уровнем загрязнения мазутом отмечали увеличение высоты растений ржи многолетней на 17 % (рис. 1, а). Наименьшее значение фитомассы надземной части растений также характерно для участков с высокой степенью загрязнения. Так, при высоком уровне загрязнения ДТ фитомасса не превышала 3 % от контрольного значения, при высоком уровне загрязнения мазутом – 38 %. Более низкое содержание нефтепродуктов привело к увеличению фитомассы. В большей степени это проявилось при загрязнении почвы мазутом, где значение фитомассы увеличилось в 1,5–2,7 раза (рис. 1, б).

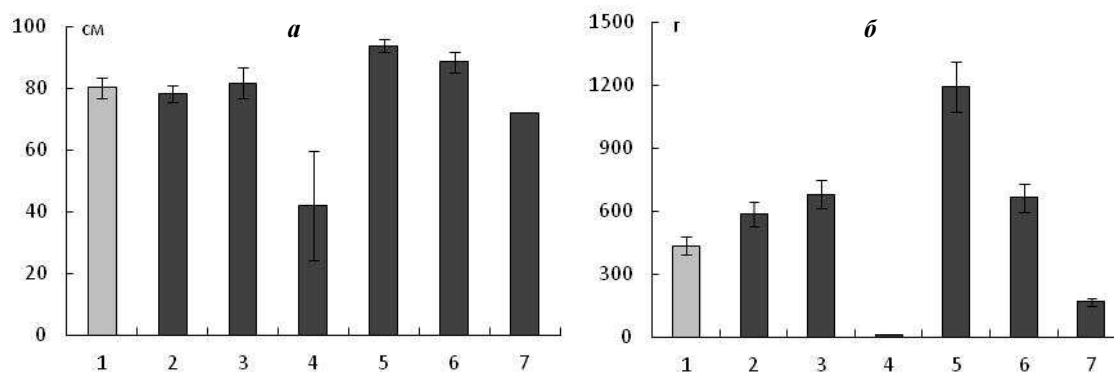


Рис. 1. Средняя высота (а) и фитомасса (б) надземной части растений ржи многолетней в конце вегетационного периода: 1 – контроль; 2 – ДТ 1,4 л/м<sup>2</sup>; 3 – ДТ 2,8 л/м<sup>2</sup>; 4 – ДТ 14 л/м<sup>2</sup>; 5 – мазут 1,3 л/м<sup>2</sup>; 6 – мазут 2,6 л/м<sup>2</sup>; 7 – мазут 7,5 л/м<sup>2</sup>

Негативное воздействие на растения ржи высоких концентраций нефтепродуктов подтвердили данные по числу колосьев и массе одного колоса. При максимальной для данного опыта степени загрязнения ДТ количество колосьев не превышало 12 % от контрольного значения, а средняя масса колоса составляла 0,1 г, что в 5 раз ниже контрольных показателей. При высокой степени загрязнения мазутом количество колосьев составляло 3 % от контроля, а масса одного колоса – не более 0,2 г. В то же время, как и в случае с высотой и фитомассой растений, низкие концентрации нефтепродуктов, особенно мазута, привели к увеличению числа и массы колосьев (рис. 2).

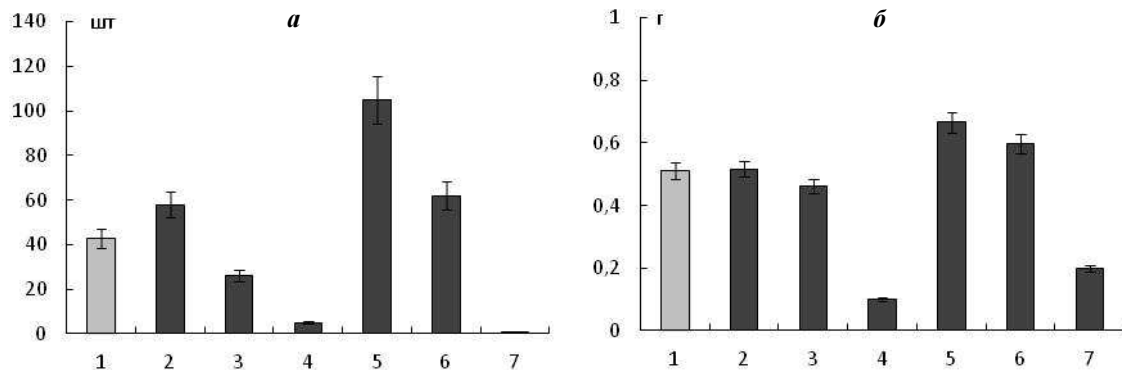


Рис. 2. Количество колосьев (а) и средняя масса одного колоса (б) растений ржи многолетней в конце вегетационного периода: 1 – контроль; 2 – ДТ 1,4 л/м<sup>2</sup>; 3 – ДТ 2,8 л/м<sup>2</sup>; 4 – ДТ 14 л/м<sup>2</sup>; 5 – мазут 1,3 л/м<sup>2</sup>; 6 – мазут 2,6 л/м<sup>2</sup>; 7 – мазут 7,5 л/м<sup>2</sup>

Таким образом, было установлено, что почва, содержащая более 5 г/кг ДТ и 13 г/кг мазута и продуктов их трансформации, оказала отрицательное влияние на исследуемые параметры роста растений. Так, при данных концентрациях ДТ произошло уменьшение высоты растений относительно контроля на незагрязненном участке в 2 раза, фитомасса снизилась в 30 раз, количество колосьев – в 8,5 раз, средняя масса одного колоса – в 5 раз. Мазут обладает менее выраженными фитотоксичными свойствами, что привело к меньшему снижению показателей роста растений. Высота растений уменьшилась на 10 %, фитомасса снизилась в 2,5 раза, количество колосьев – в 20 раз, средняя масса колоса – в 2,5 раза.

В то же время низкие содержания НП и продуктов их трансформации в почве оказали стимулирующее влияние на рост растений, что может быть связано с усилением биологической активности углеводородокисляющих микроорганизмов и стимулированием метаболических процессов в ризосферной зоне [14]. В большей степени это характерно для участков, загрязненных мазутом при концентрации менее 3 г/кг, где высота растений увеличилась на 10–17 %, фитомасса 1,5–2,7 раза, количество колосьев – в 1,4–2,4 раза, масса одного колоса – на 17–30 %.

За 3 месяца вегетационного периода содержание НП в слое почвы 0–10 см достоверно снизилось на участках с низким и средним исходным уровнем загрязнения ДТ. При более высоком уровне загрязнения ДТ, как и при загрязнении мазутом, проведение этапа фиторемедиации не повлияло на содержание НП в почве (рис. 3).

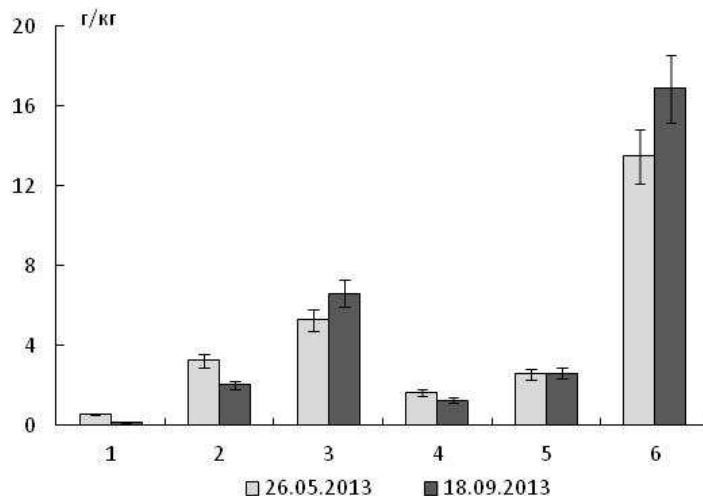


Рис. 3. Остаточное содержание нефтяных углеводородов в почве после проведения фиторемедиации: 1 – ДТ 1,4 л/м<sup>2</sup>; 2 – ДТ 2,8 л/м<sup>2</sup>; 3 – ДТ 14 л/м<sup>2</sup>; 4 – мазут 1,3 л/м<sup>2</sup>; 5 – мазут 2,6 л/м<sup>2</sup>; 6 – мазут 7,5 л/м<sup>2</sup>

В конце вегетационного периода актуальная кислотность почвенной вытяжки достоверно не изменилась. Влажность почвы снизилась во всех вариантах, в том числе и в незагрязненной почве, и составляла от 18 до 28 %, что вызвано малым количеством осадков и относительно высокой температурой в летний период 2013 г.

#### Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что почва, содержащая в слое 0–10 см более 5 г/кг светлых нефтепродуктов (ДТ) и более 13 г/кг темных нефтепродуктов (мазут), а также продуктов их трансформации, оказывает сильное токсичное действие на растения ржи многолетней, поэтому приемы фиторемедиации с использованием данного вида растений целесообразно проводить при остаточных уровнях загрязнения, не выше указанных. В то же время наличие в почве углеводов мазута и продуктов их трансформации в количестве менее 3 г/кг привело к стимулированию роста растений.

В результате проведения фиторемедиации содержание углеводов в почве, загрязненной ДТ в количестве 1,4 и 2,8 л/м<sup>2</sup>, снизилось на 75 % и 35 % соответственно. При загрязнении почвы мазутом приемы фиторемедиации с использованием ржи многолетней позволили снизить содержание углеводов на 25 %.

Таким образом, показана возможность использования ржи многолетней при фиторемедиации почв, загрязненных нефтепродуктами, в условия северо-запада Европейской части России. Изучение состояния растений ржи в течение второго и последующих вегетационных периодов в ходе этапа фиторемедиации, а также возможность включения ее в ассоциации с другими видами устойчивых растений требует проведения дальнейших исследований.

#### Библиографический список

1. Киреева Н. А., Мифтахова А. М., Салахова Г. М. Рост и развитие растений яровой пшеницы на нефтесодержащих почвах и при биоремедиации // *Агрохимия*. 2006. № 1. С. 85–90.
2. Маслова С. П., Табаленкова Г. Н. Реакция корневищного злака *Phalaroides arundinacea* на загрязнение почвы нефтью // *Агрохимия*. 2010. № 8. С. 66–71.
3. Зейферт Д. В., Гамерова Л. М. Характер зависимости между концентрацией нефти в почве и ее токсичностью // *Экологический вестник России*. 2012. № 12. С. 16–19.
4. Биологическая активность и микробиологическая рекультивация почв, загрязненных нефтепродуктами / В. Г. Алехин, В. Т. Емцев, Е. А. Рогозина, А. И. Фахрутдинов // *Биологические ресурсы и природопользование : сб. науч. трудов. Нижневартовск : Изд-во Нижневартовского пед. ин-та, 1998. Вып. 2. С. 95–105.*
5. Киреева Н. А., Мифтахова А. М., Кузяхметов Г. Г. Рост и развитие сорных растений в условиях техногенного загрязнения почвы // *Вестник Башкирского университета*. 2001. № 1. С. 32–34.
6. Седых В. Н., Игнатьев Л. А. Влияние отходов бурения и нефти на физиологическое состояние растений // *Сибирский экологический журнал*. 2002. № 1. С. 47–52.
7. Воздействие загрязнения почв дизельным топливом на растения и ризосферную микробиоту / Г. А. Евдокимова, Н. П. Мозгова, М. В. Корнейкова, И. В. Михайлова // *Агрохимия*. 2007. № 12. С. 49–55.
8. Dominguez-Rosado E., Pichtel J., Coughlin M. Phytoremediation of soil contaminated with used motor oil: Enhanced microbial activities from laboratory and growth chamber studies // *Environmental Engineering Science*. 2004. V. 21, N 2. P. 157–168.
9. Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Михайлова И. В. Способы биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении дизельным топливом // *Агрохимия*. 2009. № 6. С. 61–66.
10. Влияние загрязнения дизельным топливом на устойчивость культур и биологическую активность выщелоченного чернозема / А. П. Денисова, Н. С. Архипова, А. Ф. Халилова [и др.] // *Агрохимия*. 2011. № 2. С. 41–50.
11. Маслобоев В. А., Евдокимова Г. А. Очистление почв Кольского полуострова от нефтепродуктов: сроки и способы реабилитации // *мат. междунар. конф. "Окружающая среда и человек: друзья или враги?"*. Пушкино, 2011. С. 19–23.
12. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М., 1998. 15 с.
13. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами / Ю. И. Пиковский, А. Н. Геннадиев, С. С. Чернянский, Г. Н. Сахаров // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1132–1140.
14. Шарапова И. Э., Маслова С. М. Биологическая активность нефтесодержащей почвы при фиторемедиации и реакция растений на различные уровни нефтесодержания // *Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития : мат. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Вып. 5. Ч. 1. Киров : ВятГГУ, 2007. С. 105–108.*

## References

1. Kireeva N. A., Miftahova A. M., Salahova G. M. Rost i razvitie rasteniy yarovoy pshenitsy na neftezagryaznennykh pochvah i pri bioremediatsii [Growth and development of spring wheat in the oil-contaminated soils and with bioremediation] // *Agrohimiya*. 2006. N 1. P. 85–90.
2. Maslova S. P., Tabalenkova G. N. Reaktsiya kornevischnogo zlaka *Phalaroides arundinacea* na zagryaznenie pochvy neftyu [Reaction of rhizomatous cereal *Phalaroides arundinacea* to the soil contamination by oil] // *Agrohimiya*. 2010. N 8. P. 66–71.
3. Zeyfert D. V., Gameraova L. M. Harakter zavisimosti mezhdu kontsentratsiyey nefi v pochve i ee toksichnostyu [The character of relationship between the oil concentration in the soil and its toxicity] // *Ekologicheskiy vestnik Rossii*. 2012. N 12. P. 16–19.
4. Biologicheskaya aktivnost i mikrobiologicheskaya rekultivatsiya pochv, zagryaznennykh nefteproduktami [Biological activity and microbial remediation of soils contaminated with oil products] / V. G. Alehin, V. T. Emtsev, E. A. Rogozina, A. I. Fahrutdinov // *Biologicheskie resursy i prirodopolzovanie* : sb. nauch. trudov. Nizhnevartovsk : Izd-vo Nizhnevartovskogo ped. in-ta, 1998. Vyp. 2. P. 95–105.
5. Kireeva N. A., Miftahova A. M., Kuzyahmetov G. G. Rost i razvitie sornykh rasteniy v usloviyakh tehnogennogo zagryazneniya pochvy [Growth and development of weed plants in the conditions of technogenic contamination of soil] // *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2001. N 1. P. 32–34.
6. Sedyh V. N., Ignatev L. A. Vliyanie othodov bureniya i nefi na fiziologicheskoe sostoyanie rasteniy [The influence of drilling waste and oil on a physiological state of plants] // *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2002. N 1. P. 47–52.
7. Vozdeystvie zagryazneniya pochv dizelnym toplivom na rasteniya i rizosfernyuyu mikrobiotu [The impact of soil contaminated by diesel fuel on plants and rhizosphere microbiota] / G. A. Evdokimova, N. P. Mozgova, M. V. Korneykova, I. V. Mihaylova // *Agrohimiya*. 2007. N 12. P. 49–55.
8. Dominguez-Rosado E., Pichtel J., Coughlin M. Phytoremediation of soil contaminated with used motor oil: Enhanced microbial activities from laboratory and growth chamber studies // *Environmental Engineering Science*. 2004. V. 21, N 2. P. 157–168.
9. Evdokimova G. A., Mozgova N. P., Mihaylova I. V. Sposoby bioremediatsii pochv Kolskogo Severa pri zagryaznenii dizelnym toplivom [The methods of bioremediation of soils contaminated by diesel fuel on the Kola Peninsula] // *Agrohimiya*. 2009. N 6. P. 61–66.
10. Vliyanie zagryazneniya dizelnym toplivom na ustoychivost kultur i biologicheskuyu aktivnost vyschelochennogo chernozema [The impact of pollution of diesel fuel on the stability of cultures and the biological activity of leached chernozem] / A. P. Denisova, N. S. Arhipova, A. F. Halilova [i dr.] // *Agrohimiya*. 2011. N 2. P. 41–50.
11. Masloboev V. A., Evdokimova G. A. Ochislenie pochv Kolskogo poluoostrova ot nefteproduktov: sroki i sposoby reabilitatsii [Purification of soils of the Kola Peninsula from oil products: Timing and methods of rehabilitation] // *mat. mezhdunar. konf. "Okruzhayushchaya sreda i chelovek: druzya ili vragi?"*. Puschino, 2011. P. 19–23.
12. PND F 16.1:2.2.22-98. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli nefteproduktov v pochvah i donnykh otlozheniyah metodom IK-spektrometrii [Methods of measurement of mass fraction of petroleum products in soils and sediments by IR spectroscopy]. M., 1998. 15 p.
13. Problema diagnostiki i normirovaniya zagryazneniya pochv neftyu i nefteproduktami [The problem of diagnostic and regulation of soil contamination by oil and oil products] / Yu. I. Pikovskiy, A. N. Gennadiev, S. S. Chernyanskiy, G. N. Saharov // *Pochvovedenie*. 2003. N 9. P. 1132–1140.
14. Sharapova I. E., Maslova S. M. Biologicheskaya aktivnost neftezagryaznennoy pochvy pri fitoremediatsii i reaktsiya rasteniy na razlichnyie urovni neftezagryazneniya [The biological activity of oil-contaminated soils at the phytoremediation and response of plants to different levels of oil pollution] // *Problemy regionalnoy ekologii v usloviyakh ustoychivogo razvitiya* : mat. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Vyp. 5. Ch. 1. Kirov : VyatGGU, 2007. P. 105–108.

## Сведения об авторах

**Мязин Владимир Александрович** – Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук; e-mail: myazin@inep.ksc.ru

**Myazin V. A.** – Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. of Biol. Sci.; e-mail: myazin@inep.ksc.ru

**Редькина Вера Вячеславовна** – Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук; e-mail: kalmykova@inep.ksc.ru

**Redkina V. V.** – Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. of Biol. Sci.; e-mail: kalmykova@inep.ksc.ru