

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 502.3

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63>

Биоремедиация *in situ* нефтезагрязненных почв на территории Полазненского месторождения

Дарья Олеговна Егорова¹, Евгений Валерьевич Ташкинов²

^{1,2} Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

¹ daryao@rambler.ru

² zafranceperm@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты полевых исследований (*in situ*) очистки нефтезагрязненных территорий с использованием фиторемедиационных и биоаугментационных технологий. Исследования проведены в летне-осенний период на территории Полазненского месторождения вблизи д. Зуята Добрянского городского округа, Пермского края. Технологии фито- и биоремедиации являются наиболее безопасными для окружающей среды и наименее затратными с экономических позиций. В результате проведенных полевых исследований и лабораторных анализов показано, что применение биопрепарата «БИОРЕК-РА» и высев семян люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.), овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.) позволили снизить концентрацию загрязнителя (нефтяных углеводородов) до уровня ниже ПДК в первый месяц эксперимента. На протяжении последующего полуторамесячного периода концентрация нефтяных углеводородов снижалась. Данное изменение содержания загрязнителя достоверно отличалось от изменения аналогичного показателя в контрольной почве. Таким образом, примененные технологии фито- и биоремедиации показали их перспективность для данной местности.

Ключевые слова: бактерии, штаммы, очистка почв, биопрепараты, фиторемедиация

Для цитирования: Егорова Д.О., Ташкинов Е.В. Биоремедиация *in situ* нефтезагрязненных почв на территории Полазненского месторождения // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 51-63. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63>

SECTION 2. POLLUTION

Original paper

Bioremediation *in situ* of oil-contaminated soils in the Polaznenskoe oil field area

Darya O. Egorova¹, Evgeny V. Tashkinov²

^{1,2} Perm State University (PSU)

¹ daryao@rambler.ru

² zafranceperm@mail.ru

Abstract. The article presents the results of field research on the *in situ* remediation of oil-contaminated areas using phytoremediation and bioaugmentation technologies. The research was conducted in the summer-autumn period at the Polaznen oil field near the village of Zuyat in the Dobryansky city district of the Perm region. Phytoremediation and bioremediation technologies are considered to be the safest for the environment and the most cost-effective from an economic standpoint. The application of the bioremediation product "Biorec-Ra" and the sowing of seeds of black medic (*Medicago lupulina* L.), meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.), and perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) helped to reduce the concentration of the pollutant (petroleum hydrocarbons) to below the MAC in the first month of the experiment. Over the following month and a half, the concentration of petroleum hydrocarbons continued to decrease. This change in pollutant content was significantly different from the change in the same indicator in the control soil. Thus, the applied phytoremediation and bioremediation technologies have shown promise for this particular area.

Keywords: bacteria, strains, soil remediation, bio-preparations, phytoremediation

For citation: Egorova, D., Tashkinov, E., 2024. Bioremediation *in situ* of oil-contaminated soils in the Polaznenskoe oil field area. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 10(1). pp. 51-63. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63> (in Russian)

Введение

Нефтегазодобывающая отрасль промышленности – одна из наиболее экологически опасных в настоящее

время. Она характеризуется высокой опасностью как с позиций землеемкости, так и с позиций проникновения

в окружающую среду загрязняющих соединений, а также высокой пожаро- и взрывоопасностью объектов.

В России разработка нефтяных и газонефтяных месторождений ведется более чем в 30 регионах [3, 22].

По данным на 2019 г. 82,6% от всей нефтедобычи в стране приходится на долю десяти регионов (рис. 1 / fig. 1).

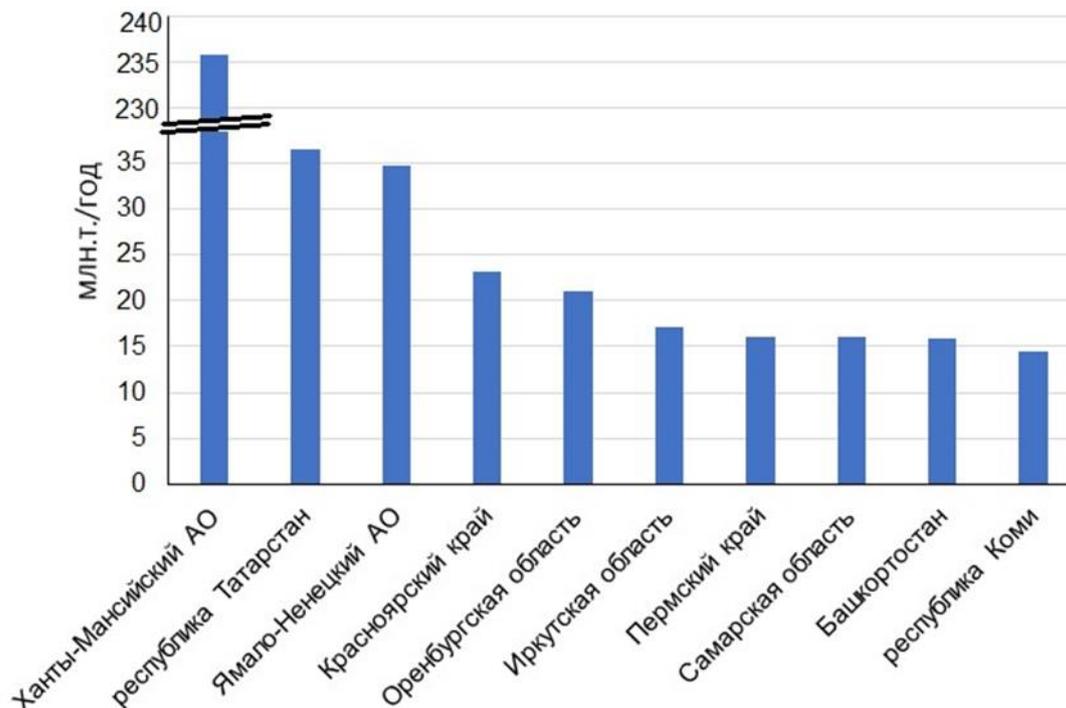


Рис. 1. Объемы добычи нефти в десяти регионах-лидерах в 2019 г.

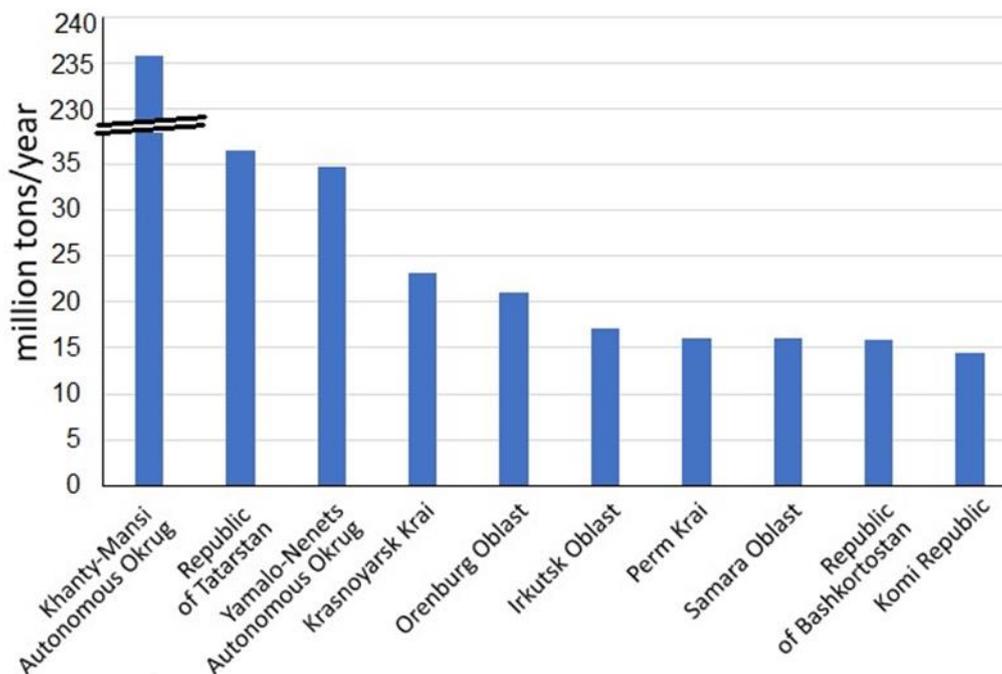


Fig. 1. Oil production volumes in the TOP-10 regions in 2019

Известно, что нефтяное загрязнение приводит к уменьшению продуктивности земель, загрязнению поверхностных и подземных вод и деградации ландшафтов, таким образом оказывая комплексное воздействие на окружающую среду. В случаях нарушения эксплуа-

тации скважин происходят разливы нефти, нефтепродуктов и соленых пластовых вод. К основным загрязняющими веществами, образующимися в процессе нефтедобычи и нефтепереработки, относятся углеводороды (48 %) и CO₂ (44 %) [23, 26]. Наиболее токсич-

ными компонентами нефти являются полициклические ароматические углеводороды (1-4% от объема нефти). Встречающийся в составе некоторых нефтей бензапирен обладает мутагенной и канцерогенной активностью и относится к I классу опасности.

Разлив нефти по поверхности почвы приводит к первоначальному загрязнению верхнего органоминерального слоя почвы, но в результате проникновения углеводородов внутрь почвенного слоя, загрязнение может со временем обнаруживаться на глубине до 140-160 см [10]. Основными препятствиями для просачивания нефти на нижние горизонты почвы являются барьеры-экраны, к которым относятся глеевые горизонты и тяжелые грунты. Однако, в этом случае происходит распространение нефти и нефтепродуктов в горизонтальном направлении, что приводит к расширению зоны загрязнения. Также барьером, предотвращающим проникновение нефти в почву, является вода. Хорошими абсорбентами выступают травяные растения и мхи. Тяжелые фракции нефти обычно сорбируются в верхнем слое почвы, тогда как легкие фракции способны к испарению или подвергаются биологическому, или химическому разложению [25]. Нефть, обладая выраженными гидрофобными свойствами, попадая в почву, сильно изменяет ее физические характеристики, а именно снижает проницаемость для кислорода и воды. Происходит это в следствии склеивания структурных частиц почвы, а также покрытия их углеводородной пленкой, что приводит к нарушению процессов активного переноса полезных соединений с током воды. Концентрации минеральных элементов, в частности азота, спустя некоторое время после разлива нефтесодержащей жидкости, снижаются. Также отмечается рост содержания аммиачного азота и снижение (до незначительных количеств) нитратного азота в почве, которые обусловлены нарушением водного режима и аэрации. В естественных условиях, особенно при низких температурах, компоненты нефти длительное время остаются без изменений [1]. Таким образом, привнесение нефти и нефтепродуктов в почву может привести к нарушению ряда ее свойств: морфологических, физических, физико-химических и микробиологических [13, 15, 27, 28].

Наиболее частые причины разливов нефти: нарушения при добыче, хранении, транспортировке, при переработке и нарушения технологий эксплуатации. Еще одна значимая причина – коррозия и неудовлетворительное качество строительно-монтажных работ, которые ведут к износу оборудования и, далее, к разливам нефти. Единичные случаи разливов, связаны с заводским браком и ошибками эксплуатации.

Нормативно-правовые документы, действующие в РФ, требуют проведения локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в самые короткие сроки. Аналогичное требование характерно и для сроков проведения рекультивации загрязненных участков до допустимого уровня остаточного содержания углеводородов в окружающей среде. Все участки, утратившие продуктивность полностью или частично, подлежат восстановлению. Конечной целью восстановления, рекультивации следует считать экологически устойчивый ландшафт с полноценным потенциалом экосистемных услуг (рис. 2 / fig. 2) [16-18, 24].

Рекультивация нарушенных земель осуществляется в несколько этапов. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 59070-2020 [6] в рекультивации земель, нарушенных промышленной деятельностью, выделяют три этапа:

- 1) подготовительный;
- 2) технический;
- 3) биологический.

Продолжительность технического и биологического этапов условно называют рекультивационным периодом, который может длиться до нескольких десятилетий, в зависимости от уровня нарушенности территории и ее целевого использования. Таким образом, суммарная продолжительность основных этапов обусловлена сроком, необходимым для полного восстановления всех природных компонентов.

Подготовительный этап состоит в изучении степени нарушенности земель. Также необходимо определить вероятное или предпочтительное направление использования нарушенных земель в дальнейшем процессе природопользования. Часто проект рекультивации затрагивает интересы сразу нескольких отраслей народного хозяйства. Основные задачи подготовительного этапа [4]:

- определение основных свойств плодородного слоя и его ценности;
- расчет затрат (и их экономической рентабельности) на сохранение или использование плодородного слоя;
- выбор направления рекультивации отдельных объектов и нарушаемых земель в целом на рассматриваемой территории на основании определения хозяйственной целесообразности и экономической эффективности;
- разработка комплексных рекомендаций по выбору технологий механизированной обработки (технологический этап);
- выбор технологии и комплексной механизации основного производства, удовлетворяющих требованиям последующей рекультивации нарушенных земель;
- разработка технологии биологической рекультивации нарушенных земель;
- определение условий последующей эксплуатации рекультивированных земель при выбранном виде использования;
- определение отраслевой, общей и сравнительной эффективности капитальных вложений и эксплуатационных расходов [4].

Необходимым условием рекультивации следует считать проведение изыскательских и научно-исследовательских работ, подготовку полноценной проектной документации.

Техническая рекультивация (Технический этап) – этап рекультивации земель, обуславливающий их подготовку для последующего целевого использования в народном хозяйстве [5].

Технический этап включает в себя планировку, формирование откосов, снятие, транспортирование и нанесение почв и плодородных пород на рекультивируемые земли, при необходимости коренную мелиорацию, строительство дорог и специальных гидротехнических сооружений [4].

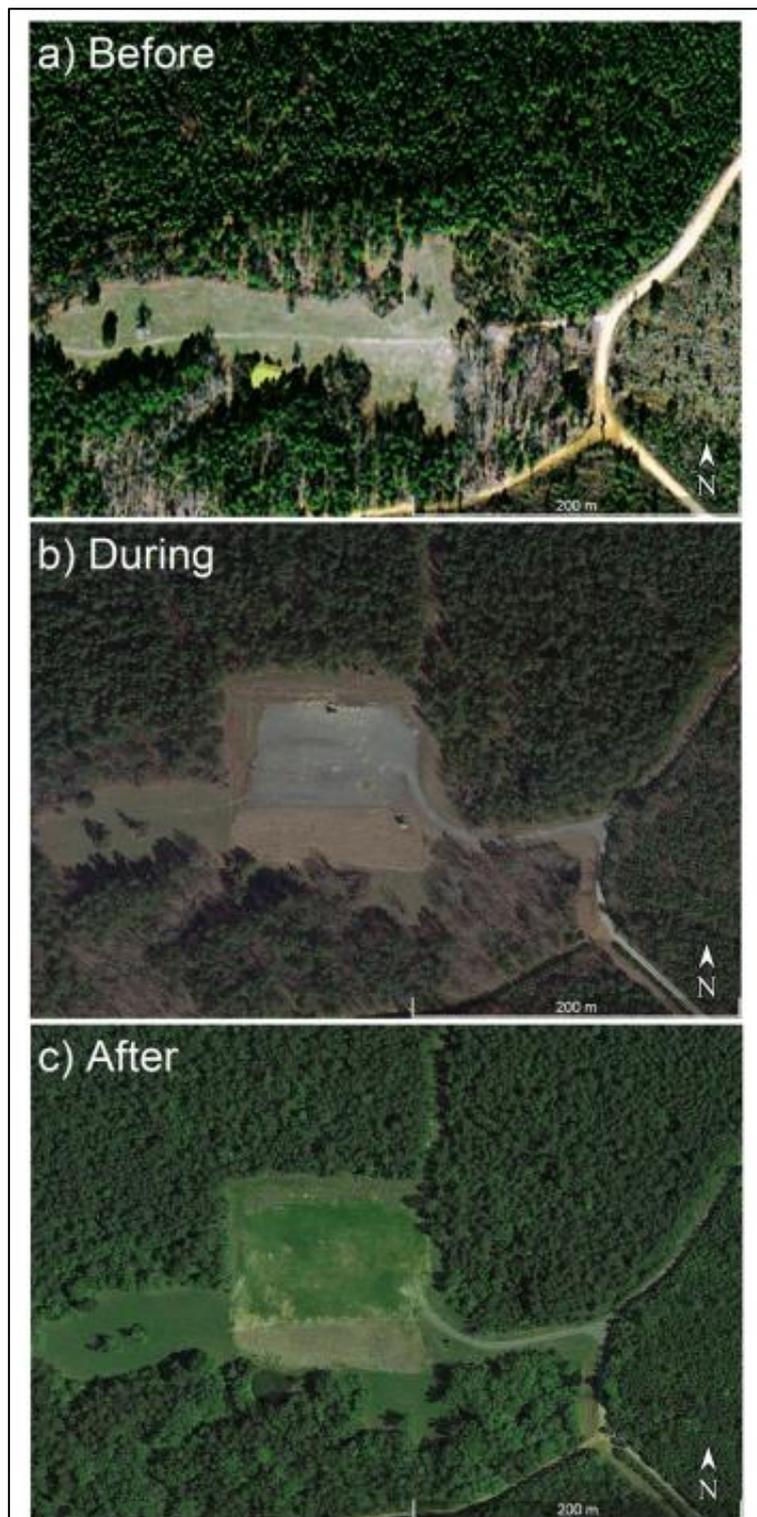


Рис. 2. Ландшафт естественного леса и пастбища: а) до разработки колодезной площадки (2006 г.), б) во время эксплуатации колодезной площадки (2012 г.), в) после «восстановления» колодезной площадки под пастбище (2016 г.) [31]

Fig. 2. Landscape of natural forest and pasture: a) before the development of the well site (2006), b) during the operation of the well site (2012), c) after the “restoration” of the well site for pasture (2016) [32]

Основные работы, выполняемые во время технического этапа (полный перечень зависит от последующего целевого использования восстанавливаемых земель):

- грубая и чистовая планировка поверхности отвалов, засыпка нагорных, водоподводящих, водоотводных каналов; высаживание или террасирование откосов; засыпка и планировка шахтных провалов;

- освобождение рекультивируемой поверхности от крупногабаритных обломков пород, производственных конструкций и строительного мусора с последующим их захоронением или организованным складированием;

- строительство подъездных путей к рекультивированному участку, устройство въездов и дорог на них с

учетом прохода сельскохозяйственной, лесохозяйственной и другой техники;

– устройство, при необходимости, дренажной, водоотводящей оросительной сети и строительство других гидротехнических сооружений;

– устройство дна и бортов карьеров, оформление остаточных траншей, укрепление откосов;

– ликвидация или использование плотин, дамб, насыпей, засыпка техногенных озер и протоков, благоустройство русел рек;

– создание и улучшение структуры рекультивационного слоя, мелиорация токсичных пород и загрязненных почв, если невозможна их засыпка слоем потенциально плодородных пород;

– создание, при необходимости, экранирующего слоя;

– покрытие поверхности потенциально плодородными и (или) плодородными слоями почвы;

– противоэрозионная организация территории [4].

Биологическая рекультивация (Биологический этап) – этап рекультивации земель, в процессе которого осуществляется комплекс мероприятий (фитомелиоративных и агротехнических) по восстановлению плодородия нарушенных земель [6].

Обязательным элементом данного этапа является анализ вероятного последующего использования земель, и, в соответствии с результатами данного анализа, учет требований, предъявляемым к особенностям

рекультивации земель для того или иного типа пользования.

Обязательной стадией, в случае подготовки земель к сельскохозяйственному или лесохозяйственному использованию, является мелиоративная подготовка. Данная стадия включает в себя комплекс агротехнических и гидромелиоративных мероприятий, нацеленных на повышение урожайности сельскохозяйственных и лесных культур в результате повышения плодородия нарушенных почв [4, 5].

Продолжительность биологического этапа рекультивации может быть различна – от 1 года до 10 лет. Конкретная длительность зависит от многих причин: разновидность нарушенных земель; планируемый тип землепользования в будущем; специфика технологического этапа рекультивации; свойства наносимого плодородного слоя; свойства подстилающих горных пород; планируемый к выращиванию состав сельскохозяйственных культур.

Продолжительность биологического этапа рекультивации может быть заметно сокращена при наличии двух условий: нанесение значительного слоя плодородной почвы, а также наличие пород со сбалансированными физико-химическими свойствами в корнеобитаемом слое. Наоборот, к увеличению срока биологического этапа рекультивации ведет недостаточное применение плодородного слоя (табл. 1 / tabl. 1) [5].

Таблица 1

Длительность биологического этапа в зависимости от используемых технологий [5]

Table 1

Duration of the biological stage depending on the technologies [5]

| Почва, используемая как верхний слой // Soil used as top layer | Толщина наносимого слоя, см // Thickness of the applied layer, cm | Тип пользования территории // Type of use of the territory | Длительность биологического этапа, лет // Duration of the biological stage, years |
|---|---|--|---|
| Плодородная почва // Fertile soil | 30-35 | Пашня // Arable land | 4-6 |
| Плодородная почва // Fertile soil | 10-20 | Кормовые угодья // Feeding grounds | 5-6 |
| Лесовидные / покровные суглинки (потенциально-плодородная порода) // Forest-like / cover loams (potentially fertile rock) | 10-20 | – | 6-8 |

Одними из способов биологической рекультивации являются биостимуляция и фиторемедиация. Так в статье Ayotamuno с коллегами показано, что на контрольном участке почвы через 9 недель эксперимента концентрация нефти снизилась на 9,8%, на участке подверженном биостимуляции – на 97,5%, на участке фиторемедиации – 78,3%, а на участке с сочетанием биостимуляции и фиторемедиации – 98,4% [31]. Полученные данные свидетельствуют об успешном применении биостимуляционных и фиторемедиационных технологий для восстановления нефтезагрязненной территории [8, 9, 11, 12, 19, 29]. При этом, использованные биотехнологии существенно снижают экономические затраты на восстановление нарушенных земель.

Биологическая рекультивация нарушенных земель должна не только повышать плодородие почв, но и

обеспечивать восстановление исходных биогеоценозов, способных воспроизводить все виды ресурсов. Для этого разработано значительное количество биопрепаратов, направленных на биодеструкцию нефти и продуктов ее переработки, загрязняющих природные среды в результате утечек, проливов, разного масштаба экологических катастроф.

По мнению большинства отечественных и зарубежных специалистов, наиболее полное восстановление может быть достигнуто обработкой почвы биопрепаратом на основе активных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов или посредством использования различных приёмов, направленных на стимулирование аборигенной микрофлоры почвы, которая способна усваивать нефть в качестве единственного источника углерода. Микробиологический способ биодegradации нефти и нефтепродуктов отличается неболь-

шими капиталовложениями, низким энергопотреблением, отсутствием вторичных отходов и экологической безопасностью [30]. Ежегодная потребность в биопрепаратах нефтедеструкторов оценивается в 100–1000 т.

Потенциальными потребителями биопрепаратов являются промышленные предприятия, нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность, нефтеналивные и заправочные станции ГСМ, подразделения МЧС, автотранспортные предприятия и станции технического обслуживания, предприятия по транспортировке нефти и нефтепродуктов, морские и речные порты, фирмы, специализирующиеся на продаже недвижимости и земельных участков, городские и муниципальные службы и др.

В настоящее время на рынке представлена широкая номенклатура биопрепаратов на основе моно- и смешанных культур микроорганизмов для ликвидации загрязнений нефтью и нефтепродуктами. Наиболее известными зарубежными биопрепаратами являются «Микробар» и «Парабан» (США), представляющие собой порошкообразные вещества, хорошо растворимые в воде. Они разрушают углеводороды с длиной цепи C12 при pH 6,5–7,3; соленостью – до 1 % NaCl и температуре 10–35 °C [30].

В России для очистки нефтезагрязненных почв применяют бактериальные препараты: «Путидойл», «Деворойл», «Биоприн-Б», «Родотрин», «Экойл», «Универсал», «Сойлекс», «Фежел-био» и др. [7, 20]. Эти биопрепараты содержат в своем составе азотно-фосфорные удобрения, энзимы и микроорганизмы, выделенные из природных биоценозов, обладающие повышенной окислительной функцией, прошедшие адаптацию в естественных условиях [21].

Целью настоящего исследования являлось провести экспериментальное обоснование перспективности применения биоремедиационных подходов для очистки нефтезагрязненных почв *in situ* на территории Полазненского нефтяного месторождения.

Материалы и методика

Эксперименты *in situ* проводились на территории Полазненского месторождения в Добрянском районе Пермского края. Были заложены 4 варианта пробных площадок: 1) площадки без внесения бактериальных

культур и семян растений, 2) площадки с внесением бактериального препарата, 3) площадки, засеянные семенами растений, 4) площадки с внесением бактериального препарата и засевом растений. Все площадки были скальпированы от растений.

В качестве бактериального агента ремедиации использовали биопрепарат «БИОРЕК-РА» ТУ 9291-011-00495603-00 от 11.01.2016 г. В составе препарата присутствуют бактериальные штаммы *Pseudomonas fluorescens* ВКГ и *Azotobacter chroococcum* АИН. Данный препарат заявлен производителем как эффективный агент для ускоренной рекультивации и биоремедиации деградированных почвогрунтов в угольной, нефтяной, железорудной и золотодобывающей промышленности; повышения плодородия земель, создания и восстановления травяного покрова футбольных газонов, озеленения городских территорий и в качестве биоудобрения для садовых и комнатных растений. Разрешение на использование препарата в естественных условиях выдано ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае» от 07.10.2011 г. На каждую опытную площадку вносили 3 л препарата «БИОРЕК-РА».

В качестве фитокомпонента биоремедиации использовали семена люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.), овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.), райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.). На каждую площадку вносили по 4 г семян растений.

Отбор образцов почв проводили каждые 14 сут эксперимента согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа [2]. Образцы почв анализировали на содержание нефти согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 от 27.07.2005 г. «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии» [14].

Для определения вероятного состава нефтяных углеводородов на исследуемой территории были взяты образцы нефти из боновых заграждений в районе нефтеловушки у д. Зуята (рис. 3 / fig. 3).

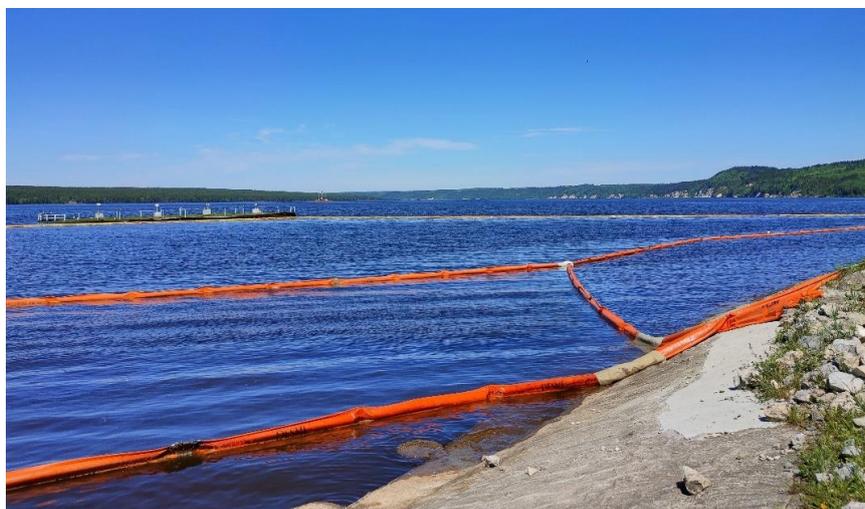


Рис. 3. Боновые заграждения
Fig. 3. Oil booms

Общее проективное покрытие на экспериментальных площадках определяли по визуальной шкале с 10 градациями: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 %. Долю каждого вида высеванных растений определяли путем прямого подсчета. Длину надземной части растений определяли путем прямого замера выборочно у 20 растений на каждой площадке.

Все результаты обрабатывали статистически с использованием пакета программ MS Office и Statistica.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент проводили в летне-осенний период в районе нефтеловушки у деревни Зуята Добрянского городского округа (рис. 4 / fig. 4).

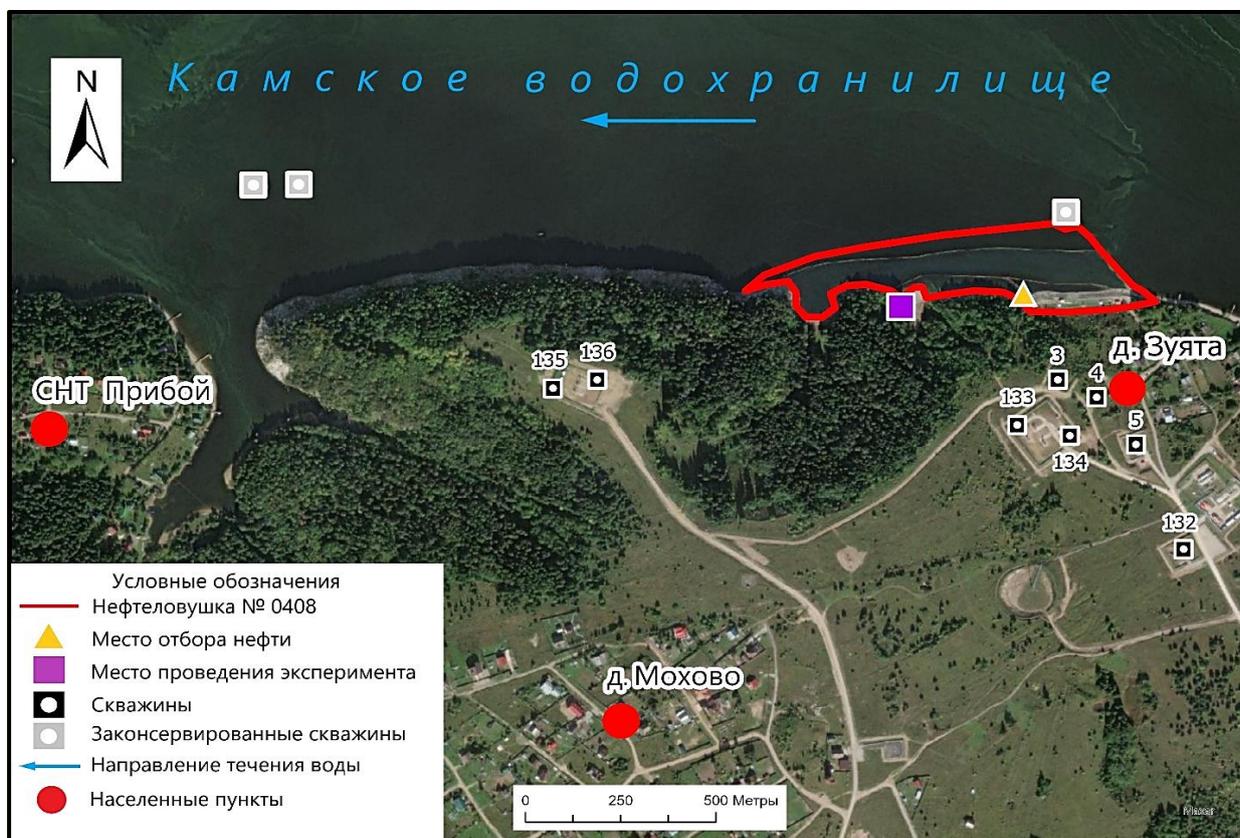


Рис. 4. Расположение экспериментального участка

Fig. 4. Location of the experimental site

На протяжении всего исследования фиксировали состояние растительности на экспериментальных и контрольном участках. Было отмечено, что не смотря на предварительное удаление с участков аборигенной растительности, проростки появлялись на площадке 2 (внесение бактерий) спустя месяц после скальпирования экспериментальной территории (табл. 2 / tabl. 2).

Оценка проективного покрытия показала, что высеv растений как в сочетании с бактериальным препаратом, так и без него, привел к активному росту вегетативной части, что было зафиксировано в результате оценки проективного покрытия (табл. 2 / tabl. 2, рис. 5 / fig. 1).

Таблица 2

Проективное покрытие растительности в ходе эксперимента, %

Table 2

Projective vegetation cover during the experiment, %

| Длительность эксперимента, сут. // Experiment's duration of the, days | Экспериментальные площадки, № // Experimental plots, No. | | | |
|--|---|----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 10 | 20 |
| 28 | 0 | 0 | 40 | 50 |
| 42 | 0 | 10 | 100 | 100 |
| 56 | 0 | 20 | 100 | 100 |
| 70 | 0 | 30 | 100 | 100 |

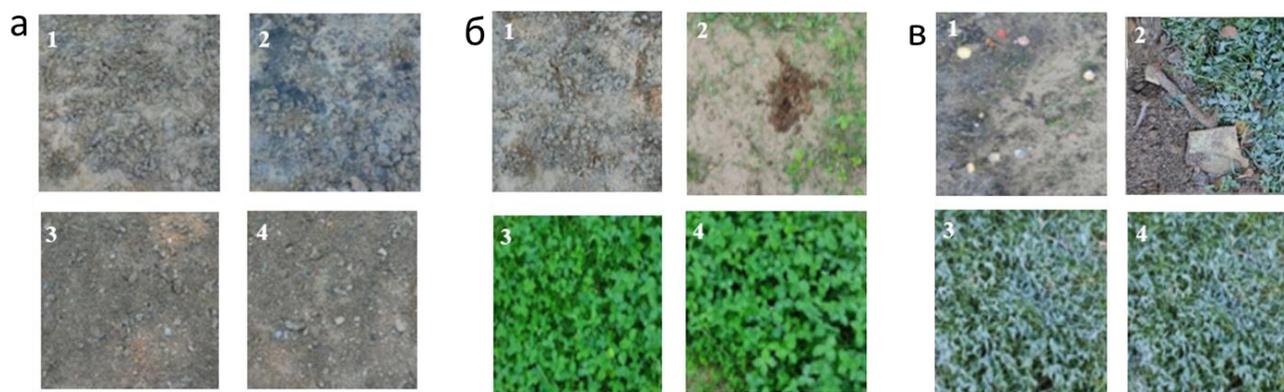


Рис. 5. Внешний вид экспериментальных площадок: а – начало эксперимента (0 сут.), б – середина эксперимента (42 сут.), в – конец эксперимента (70 сут.)

Fig. 5. External view of the experimental plots: a – the beginning of the experiment (0 days), b – the middle of the experiment (42 days), c – the end of the experiment (70 days)

Можно предположить, что внесение бактериального препарата в почву обеспечивает снижение негативной углеводородной нагрузки, благодаря чему на площадке 2 появляется растительность, а на контрольной площадке (площадка 1) проростков не было.

Измерение показателей надземной части растений люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.), овся-

ницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.), райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.) показал, что в первой половине эксперимента различия по высоте растений на 3 и 4 площадках практически отсутствовали, однако во второй половине эксперимента, достоверно выше были растения на 4 площадке (рис. 6 / fig. 6).

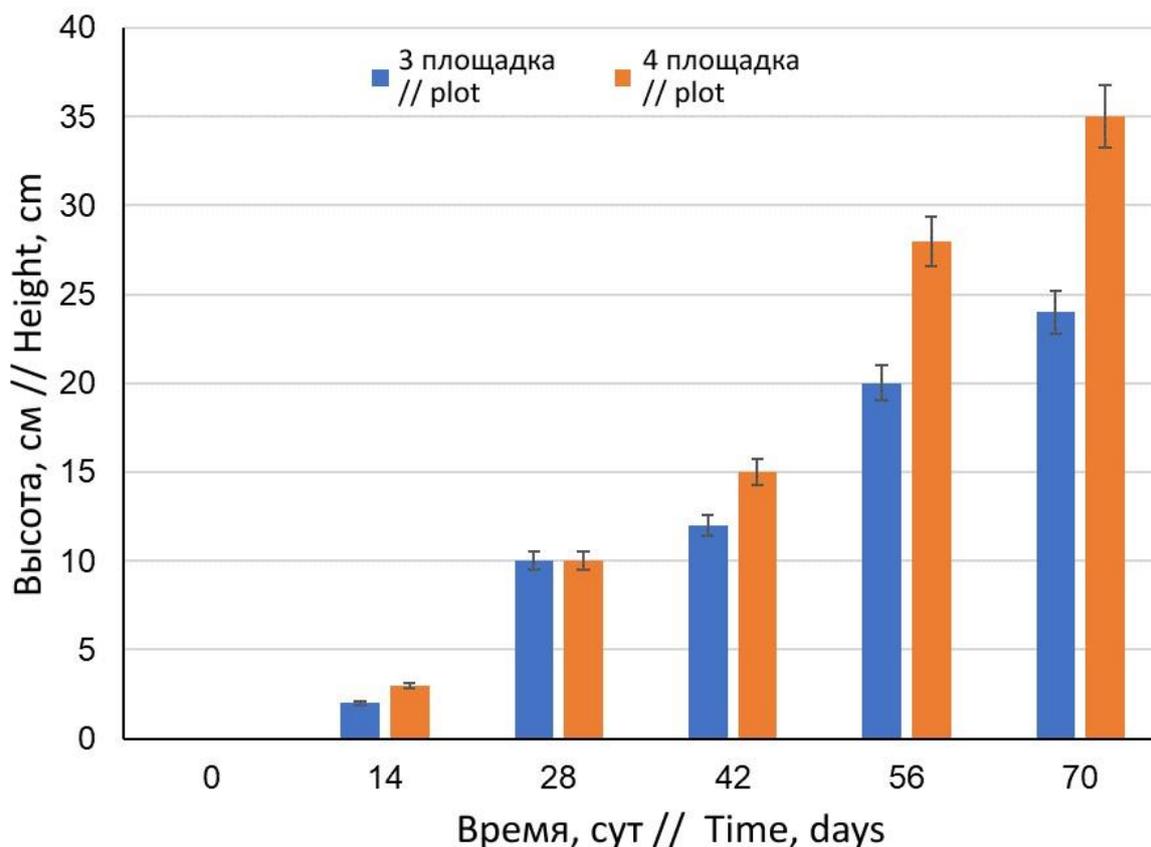


Рис. 6. Высота растений на площадках 3 (фиторемедиация) и 4 (биопрепарат + фиторемедиация)

Fig. 6. Plant height on sites 3 (phytoremediation) and 4 (biological product + phytoremediation)

Первыми проростки появились у люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.). В дальнейшем, к 28 суткам зафиксировано появление проростков овсяницы луговой

(*Festuca pratensis* Huds.). Соотношение растительных видов к концу эксперимента отличалось на площадках 3 и 4 (рис. 7 / fig. 7).

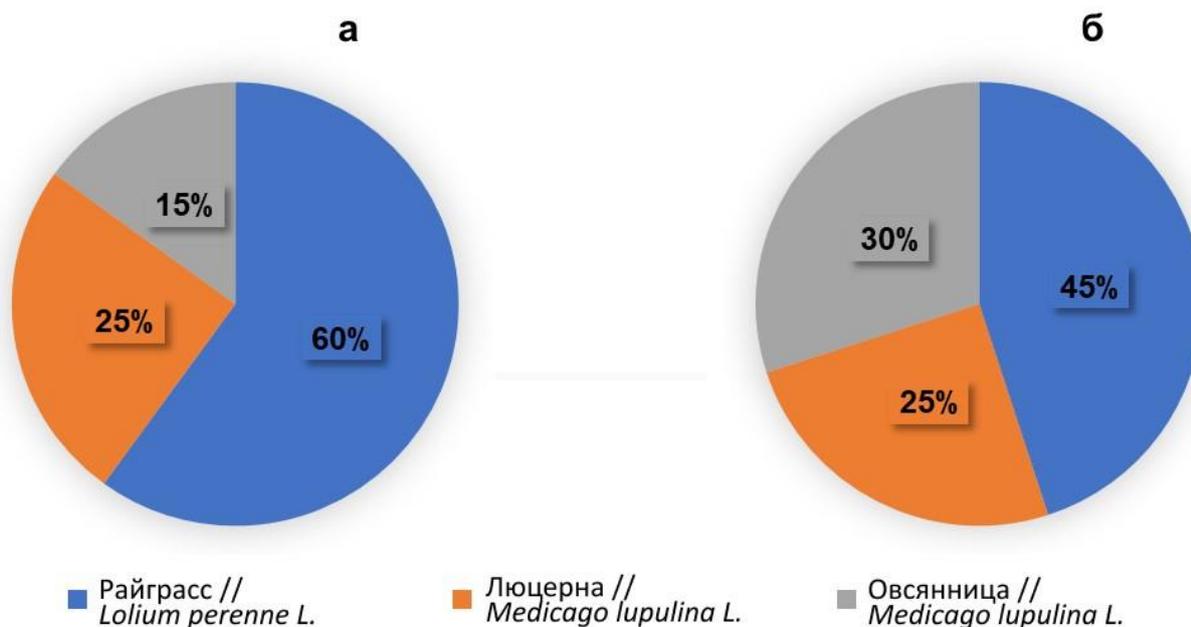


Рис. 7. Доля высеянных видов растений на 3 (фиторемедиация)(а) и 4 (биопрепарат + фиторемедиация) (б) типах площадок в конце эксперимента
 Fig. 7. The proportion of plant species sown on 3 (phytoremediation) (a) and 4 (biological product + phytoremediation) (b) types of plots at the end of the experiment

На площадке 3 доминировал райграсс пастбищный (рис. 7а / fig. 7а). Люцерна хмелевидная и овсяница луговая значительно уступали райграсу по своей представленности на экспериментальном участке. Однако, на площадке 4 соотношение растительных видов было другим (рис. 7б / fig. 7б). В данном случае все три вида были в близком долевым соотношении. Следует отметить, что райграсс и на 4 площадке был представлен более обильно, чем остальные виды. Доля овсяницы на

площадке 4 была в два раза выше, чем на площадке 3, а у люцерны показатель не изменился. Вероятно, присутствие бактерий из биопрепарата в почве площадки 4 способствует снижению токсической нагрузки, что приводит к более эффективному развитию овсяницы луговой.

Проведен анализ концентрации углеводородов нефти на экспериментальных площадках (рис. 8 / fig. 8).

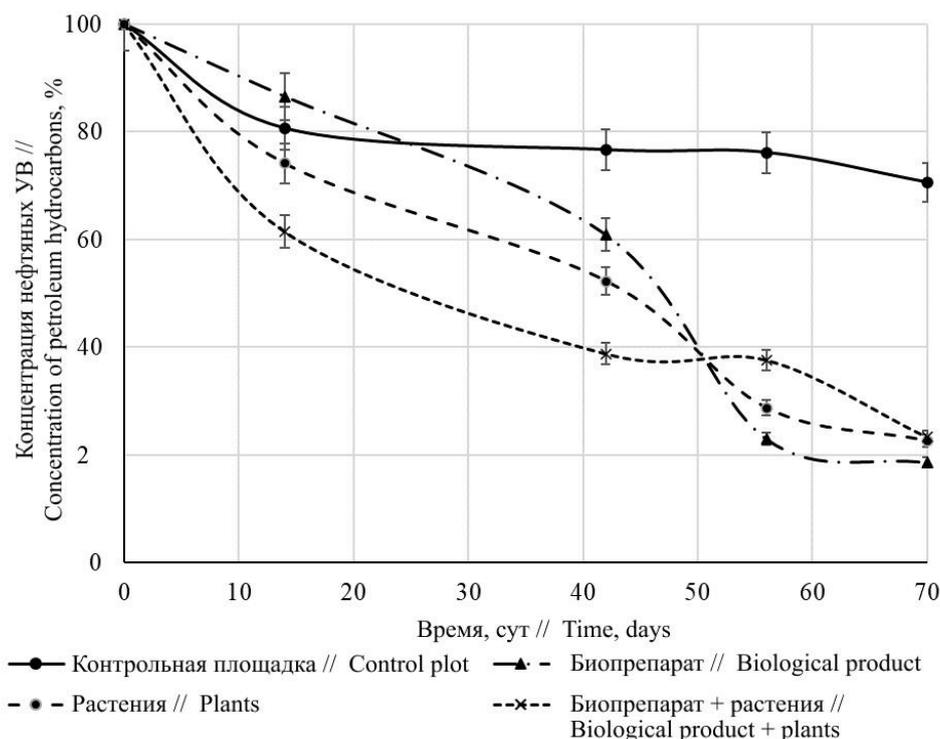


Рис. 8. Динамика изменения концентрации нефтяных углеводородов на экспериментальных площадках
 Fig. 8. Dynamics of changes in the concentration of petroleum hydrocarbons at experimental plots

Во всех случаях отмечено снижение концентрации нефтяных углеводородов. Однако, на контрольной площадке снижение составило лишь 29,4% от начальной концентрации, тогда как на остальных площадках деструкции было подвергнуто 76,6-81,3% углеводородов нефти. Изменение концентрации загрязнителя описывается формулами:

$Y = 0,0003x^3 - 0,0368x^2 + 0,0788x + 98,304$; $R^2 = 0,9681$ – площадка 2 (биопрепарат)

$Y = -0,0001x^3 + 0,0187x^2 + 1,806x + 98,884$; $R^2 = 0,982$ – площадка 3 (фиторемедиация)

$Y = 0,0007x^3 + 0,0855x^2 - 3,8741x + 100,21$; $R^2 = 0,999$ – площадка 4 (био + фиторемедиация).

Все значение R^2 близки к единице, что позволяет говорить о высокой степени достоверности описания процессов деструкции нефтяных углеводородов на исследуемых площадках данными уравнениями.

Следует отметить, что на площадках, где использован бактериологический препарат, концентрация загрязнителя была снижена до уровня ПДК через 14 сут. эксперимента, а на площадке, где были использованы только растения – через 28 сут.

Таким образом установлено, что все использованные в работе варианты восстановления нефтезагрязненной почвы показали высокую эффективность, однако сочетанное использование бактериальных препаратов и растений в динамике дает более быстрый результат.

Сведения об авторском вкладе

Д.О. Егорова – постановка задачи исследования, формулировка идеи статьи, текст статьи.

Е.В. Ташкинов – выполнение полевых работ, отбора образцов для анализа.

Contribution of the authors

D.O. Egorova – formulation of research tasks, development of article idea, writing the article.

E.V. Tashkinov – conducting fieldwork, sampling for analysis.

Список источников

1. *Ахмадиев М.В., Рудакова Л.В.* Анализ методов восстановления нефтезагрязнённых земель // II Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2008. Т. 1, № 6. С. 16-25.

2. ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».

3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 11.03.22).

4. Государственный стандарт РФ «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами». ГОСТ Р 57447-2017. Введ. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017.

5. Государственный стандарт РФ «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия». ГОСТ Р 57446-2017. Введ. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017.

6. Государственный стандарт РФ «Охрана окружающей среды. Рекультивация нарушенных и нефтезагрязненных земель. Термины и определения». ГОСТ Р 59070-2020. Введ. 2021-04-01 – АО «Кодекс», 2021.

7. *Дядечко В.Н., Толстокорова Л.Е., Морозова Т.Н.* Патент 1076446 РФ. ШТАММ *Pseudomonas putida* 36, используемый для очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов. БИ. № 6, 1984.

8. *Журавлева В.В.* Использование рекультивационных смесей для утилизации отходов нефтедобычи // Бюллетень науки и практики. Нижневартовск, 2017. С. 130-139.

9. *Кузнецов Ф.М., Иларионов С.А., Середин В.В., Иларионова С.А.* Рекультивация нефтезагрязненных почв // Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 105 с.

10. *Оборин А.А.* Самоочищение и рекультивация нефтезагрязнённых почв Предуралья и Западной Сибири // Восстановление нефтезагрязнённых почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 140-158.

11. *Освальд Е.С., Петровский В.М., Назаров В.П.* Проблемы ликвидации ЧС, связанные с разливом нефти и нефтепродуктов // Гражданская оборона на страже мира и безопасности. Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны: в 4 ч. Москва, 2021. С. 45-55.

12. *Островский Ю.В., Заборцев Г.М., Черноок В.А.* Комплексная рекультивация территории Павельцевской нефтебазы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томск, 2019. С. 210-219.

<https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2141>

13. *Паришина Н.В., Березин А.Е.* Щадящие методы рекультивации земель на заболоченных территориях // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. Ответственный редактор А.И. Сысо. Томск, 2018. С. 303-307.

14. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 от 10.11.1998 г. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ик-спектрометрии.

15. *Поварова Л.В., Кусов Г.В.* Нормативно-техническое регулирование экологической безопасности в нефтегазовой отрасли // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), Краснодар, 2018. № 4. С. 195-216.

16. Постановление Правительства РФ № 240 «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации». Введ. 2002–04–15 – АО «Кодекс», 2002.

17. Постановление Правительства РФ № 2451 «Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и

нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». Введ. 2020–12–31 – АО «Кодекс», 2020.

18. Постановление Правительства РФ № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды». Введ. 2013–06–06 – АО «Кодекс», 2013.

19. *Равзутдинов А.Р., Гилязов М.Ю., Кушамбердиева С.Ж.* Действие агрохимических и агротехнических приемов рекультивации нефтезагрязненной почвы на урожайность ярового рапса // Журнал: Зерновое хозяйство России. Казань, 2017. 2(50). С. 22–26.

20. *Сидоров Д.Г.* Микробиологическая деструкция мазута в почве при использовании биопрепарата «Деворойл» // Прикладная биохимия и микробиология. 1998. Т. 34, № 3. С. 281–286.

21. *Сопрунова О.Б., Дзержинская И.С., Еремеева С.В.* О перспективах использования новых типов биопрепаратов для рекультивации нефтезагрязненных почв // Научно-практический семинар «Проблемы экологической безопасности Нижнего Поволжья в связи с разработкой и эксплуатацией нефтегазовых месторождений с высоким содержанием сероводорода», Астрахань. 2000. С. 125–127.

22. Справки «О состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы по регионам России в 2019 году» (ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского) [Электронный ресурс]. URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/gisatlas/msb/> (дата обращения: 11.03.22).

23. *Фадеева Н. П., Бурлин Ю. К.* Нефть // Большая российская энциклопедия. Т. 22. М., 2013. С. 553–558.

24. Федеральный закон № 7–ФЗ «Об охране окружающей среды». Введ. 2002–01–10 – АО «Кодекс», 2002.

25. Фракционный и химический состав нефти // Электронный учебный курс Самарского государственного экономического университета «Добыча и переработка нефти» [Электронный ресурс]. URL: <https://lms2.sseu.ru/mod/book/view.php?id=62117> (дата обращения: 14.04.22).

26. *Хазиев Ф.Х.* Изменение биохимических процессов в почвах при нефтяном загрязнении и активация разложения нефти // Журнал: Агрохимия. 1981. С.:102–111.

27. *Чижов Б. Е.* Рекультивация и ремедиация в лесах Западной Сибири: моногр. / Б.Е. Чижов, О.А. Кулясова. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 222 с. + 24 с. цв. вкл.

28. *Шамраев А.В., Шорина Т.С.* Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды // Вестник Оренбургского государственного университета. Оренбург, 2009. С. 642–645.

29. *Экзарьян В.Н., Рукавицын В.В.* Разработка критериев оценки сохранности окружающей среды при нефтедобыче // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. М., 2016. С. 70–74.

30. *Ягафарова Г.Г.* Экологическая биотехнология в нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. 214 с.

31. *Ayotamuno J., Kogbara R., Agoro O.* Biostimulation supplemented with phytoremediation in the reclamation of a petroleum contaminated soil // World J Microbiol Biotechnol. 2009. Vol. 25. P. 1567–1572. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0045-z>

32. *Nallur V., McClung M., Moran M.* Potential for Reclamation of Abandoned Gas Wells to Restore Ecosystem Services in the Fayetteville Shale of Arkansas // Environmental Management. 2020. Vol. 66. P. 180–190. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01307-3>

References

1. Akhmediyev, M. and Rudakova, L., 2008. Analiz metodov vosstanovleniya neftezagryaznennykh zemel' [Analysis of methods for restoring oil-contaminated lands]. II Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. *Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 1(6). pp. 16–25. (in Russian)

2. GOST 17.4.4.02-2017 Mezhsudarstvennyy standart. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [Interstate standard. Protection of Nature. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis] (in Russian)

3. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'yevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu» [On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019] (elektronnyy resurs). Available from:

https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispol'zovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispol'zovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ [Accessed 11th March 2022].

4. Gosudarstvennyy standart RF Nailuchshiyе dostupnyye tekhnologii. Rekul'tivatsiya zemel' i zemel'nykh uchastkov, zagryaznennykh nef'tyu i nefteproduktami [Best available technologies. Reclamation of lands and land plots contaminated with oil and petroleum products] GOST R 57447-2017. Vved. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017. (in Russian)

5. Gosudarstvennyy standart RF Nailuchshiyе dostupnyye tekhnologii. Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' i zemel'nykh uchastkov. Vosstanovleniye biologicheskogo raznoobraziya [Best available technologies. Reclamation of disturbed lands and land plots. Restoring biological diversity]. GOST R 57446-2017. Vved. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017. (in Russian)

6. Gosudarstvennyy standart RF Okhrana okruzhayushchey sredy. Rekul'tivatsiya narushennykh i neftezagryaznennykh zemel'. Terminy i opredeleniya [Environmental protection. Reclamation of disturbed and oil-contaminated lands. Terms and Definitions]. GOST R 59070-2020. Vved. 2021-04-01 – АО «Кодекс», 2021. (in Russian)

7. Dyadechko, V., Tolstokorova, L. and Morozova, T., 1984. Patent 1076446 RF. SHTAMM *Pseudomonas putida* 36, ispol'zuyemyy dlya ochistki vody i pochvy ot

- nefti i nefteproduktov. [*Pseudomonas putida* STRAIN 36, used to purify water and soil from oil and petroleum products]. BI. № 6. (in Russian)
8. Zhuravleva, V., 2017. Ispol'zovaniye reku-l'tivatsionnykh smesey dlya utilizatsii otkhodov nefte-doby-chi [The use of reclamation mixtures for the disposal of oil production waste]. *Zhurnal: Byulleten' nauki i praktiki. Nizhnevartovsk*, pp. 130-139. (in Russian)
9. Kuznetsov, F., Ilarionov, S., Seredin, V. and Ilarionova, S., 2000. Rekul'tivatsiya neftezagryaznennykh pochv [Recultivation of oil-contaminated soils]. *Perm. gos. tekhn. un-t. Perm*. 105 p. (in Russian)
10. Oborin, A., 1988. Samoochishcheniye i reku-l'tivatsiya neftezagryaznennykh pochv Predural'ya i Zapadnoy Sibiri [Self-purification and reclamation of oil-contaminated soils in the Cis-Urals and Western Siberia]. *Vosstanovleniye neftezagryaznennykh pochvennykh ekosistem*. Moscow, Nauka, pp. 140-158. (in Russian)
11. Osva'd, Ye., Petrovskiy, V., Nazarov, V., 2021. *Problemy likvidatsii CHS, svyazannyye s razlivom nef-ti i nefteproduktov [Problems of emergency response related to oil and petroleum product spills]. Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony: v 4 ch. Moscow, pp. 45-55. (in Russian)*
12. Ostrovskiy, Yu., Zabortsev, G. and Chernook, V., 2019. Kompleksnaya rekul'tivatsiya territorii Pavel'tsevskoy neftebazy [Comprehensive reclamation of the territory of the Pavel'tsevskaya oil depot]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. Tomsk, pp. 210-219. (in Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2141>
13. Parshina, N., Berezin, A., 2018. *Shchadashchiye metody rekul'tivatsii zemel' na zabolochennykh territoriyakh [Sensible methods of land reclamation in wetlands]. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrokhimii SO RAN. Otvetstvennyy redaktor A.I. Syso. Tomsk, pp. 303-307. (in Russian)*
14. PND F 16.1:2.2.22-98 ot 10.11.1998 g. Kolichestvennyy khimicheskiy analiz pochv. Metodika vy-polneniya izmereniy massovoy doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organo-mineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom ik-spektrometrii. [Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organomineral soils and bottom sediments using the IR spectrometry method] (in Russian)
15. Povarova, L., Kusov, G., 2018. Normativno-tekhnicheskoye regulirovaniye ekologicheskoy bezopasnosti v neftegazovoy otrasli [Regulatory and technical regulation of environmental safety in the oil and gas industry]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiiy vestnik)*, Krasnodar, (4), pp. 195-216. (in Russian)
16. Postanovleniye Pravitel'stva RF № 240 O por-yadke organizatsii meropriyatiy po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nef-ti i nefteproduktov na territorii Rossiyskoy Federatsii. [On the procedure for organizing measures to prevent and eliminate oil and petroleum product spills on the territory of the Russian Federation] Enter. 2002-04-15 – AO «Kodeks», 2002. (in Russian)
17. Postanovleniye Pravitel'stva RF № 2451 Ob ut-verzhdenni Pravitel'stva meropriyatiy po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nef-ti i nefteproduktov na territorii Rossiyskoy Federatsii, za iskluyucheniye vnutrennikh morskikh vod Rossiyskoy Federatsii i territorial'nogo morya Rossiyskoy Federatsii, a takzhe o priznanii utrativshimi silu nekotorykh aktov Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii [On approval of the Rules for organizing measures for the prevention and response to oil and petroleum product spills on the territory of the Russian Federation, with the exception of the internal sea waters of the Russian Federation and the territorial sea of the Russian Federation, as well as on the invalidation of certain acts of the Government of the Russian Federation] Enter. 2020-12-31 – AO «Kodeks», 2020. (in Russian)
18. Postanovleniye Pravitel'stva RF № 477 Ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoringa sos-toyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy [On the implementation of state monitoring of the state and pollution of the environment]. Enter. 2013-06-06 – AO «Kodeks», 2013.
19. Ravzutdinov, A., Gilyazov M. and Kuzhamberridiyeva, S., 2017. Deystviye agrokhimicheskikh i agrotekhnicheskikh priyemov reku-l'tivatsii neftezagryaznennykh pochvy na urozhaynost' yarovogo rapsa [The effect of agrochemical and agrotechnical methods of reclamation of oil-contaminated soil on the yield of spring rapeseed]. *Zernovoye khozyaystvo Rossii*. Kazan, 2(50), pp. 22-26. (in Russian)
20. Sidorov, D., 1998. Mikrobiologicheskaya destruktivnaya mazuta v pochve pri ispol'zovanii biopreparata «Devoroyl» [Microbiological destruction of fuel oil in soil using the biological product “Devoroil”]. *Prilkladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 34(3), pp. 281-286. (in Russian)
21. Soprunova, O., Dzerzhinskaya, I., Yeremeyeva, S., 2000. O perspektivakh ispol'zovaniya novykh tipov biopreparatov dlya reku-l'tivatsii neftezagryaznennykh pochv [On the prospects of using new types of biological products for the remediation of oil-contaminated soils]. Nauchno-prakticheskiiy seminar “Problemy ekologicheskoy bezopasnosti Nizhnego Povolzh'ya v svyazi s razrabotkoy i ekspluatatsiyey neftegazovykh mestorozhdeniy s vysokim soderzhaniyem serovodoroda”, Astrakhan, pp. 125-127. (in Russian)
22. Spravki “O sostoyanii i perspektivakh ispol'zovaniya mineral'no-syr'yevo-y bazy po regionam Rossii v 2019 godu” (FSUE A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute) [On the state and prospects for the use of the mineral resource base in the regions of Russia in 2019]. Available from: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/gisatlas/msb/> [Accessed 11th March 2022].
23. Fadeyeva, N. and Burlin, Yu., 2013. Neft' [Oil]. *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya*. 22. Moscow, pp. 553-558. (in Russian)
24. Federal'nyy zakon № 7-FZ «Ob okhrane okruzhayushchey sredy». [On Environmental Protection] Enter. 2002-01-10 – AO «Kodeks», 2002. (in Russian)
25. Fraktsionnyy i khimicheskiy sostav nef-ti [Fractional and chemical composition of oil]. Elektronnyy uchebnyy kurs Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta «Dobycha i pererabotka nef-ti». Available from:

<https://lms2.sseu.ru/mod/book/view.php?id=62117> [Accessed 14th April 2022].

26. Khaziyev, F., 1981. *Izmeneniye biokhimicheskikh protsessov v pochvakh pri neftyanom zagryaznenii i aktivatsiya razlozheniya nefi* [Changes in biochemical processes in soils during oil pollution and activation of oil decomposition]. *Agrokimiya*, pp.:102-111. (in Russian)

27. Chizhov, B., 2018. *Rekul'tivatsiya i remediatsiya v lesakh Zapadnoy Sibiri* [Recultivation and remediation in the forests of Western Siberia: monograph]. Pushkino: VNIILM, 222 p. (in Russian)

28. Shamrayev, A. and Shorina, T., 2009. *Vliyaniye nefi i nefteproduktov na razlichnyye komponenty okruzhayushchey sredy* [The influence of oil and petroleum products on various components of the environment]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. Orenburg, pp. 642-645. (in Russian)

29. Ekzar'yan, V. and Rukavitsyn, V., 2016. *Razrabotka kriteriyev otsenki sokhrannosti okruzhayushchey*

sredy pri neftedobyche [Development of criteria for assessing the safety of the environment during oil production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*. Moscow, pp. 70-74. (in Russian)

30. Yagafarova, G., 2001. *Ekologicheskaya biotekhnologiya v neftegazodobyvayushchey i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti* [Environmental biotechnology in the oil and gas production and oil refining industries] Ufa, Izd-vo UGNTU, 214 p. (in Russian)

31. Ayotamuno, J., Kogbara, R. and Agoro, O., 2009. Biostimulation supplemented with phytoremediation in the reclamation of a petroleum contaminated soil. *World J Microbiol Biotechnol*, 25, pp. 1567-1572. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0045-z>

32. Nallur V., McClung M., Moran M., 2020. Potential for Reclamation of Abandoned Gas Wells to Restore Ecosystem Services in the Fayetteville Shale of Arkansas. *Environmental Management*, 66, pp. 180-190. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01307-3>

Статья поступила в редакцию 08.05.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 20.05.2024.

The article was submitted 08.05.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 20.05.2024.