

DOI 10.31029/vestdnc100/4

УДК 504.064

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЧВЕННО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ КОНСТАНТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

М. В. Носова¹, ORCID: 0000-0001-7985-6474

В. П. Середина², ORCID: 0000-0002-7432-1726

С. А. Стывбуник³, ORCID: 0000-0000-0000-0000

¹ООО «Сахалинская Энергия», Южно-Сахалинск, Россия

²Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия

³ООО «РН-Проектирование Добыча», Томск, Россия

ASSESSMENT OF CHANGES IN SOIL-HYDROLOGICAL CONSTANTS OF OIL-CONTAMINATED ALLUVIAL SOILS IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE OF WESTERN SIBERIA

M. V. Nosova¹, ORCID: 0000-0001-7985-6474

V. P. Seredina², ORCID: 0000-0002-7432-1726

S. A. Stovbunik³ ORCID: 0000-0000-0000-0000

¹Sakhalin Energy LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³RN-Design Extraction LLC, Tomsk, Russia

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования изменений почвенно-гидрологических констант аллювиальных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири под воздействием локального нефтяного загрязнения. Установлено, что проникновение нефтепродуктов в почвенный профиль приводит к существенной трансформации ключевых гидрофизических характеристик. Наибольшие изменения наблюдаются в верхних органогенных горизонтах (0–20 см), где формируется зона максимальной аккумуляции углеводородов. Проведенный анализ выявил значительное ухудшение фильтрационных свойств почв (снижение водопроницаемости в 5–8 раз) и изменение водоудерживающей способности. Особое внимание уделено изучению динамики основных гидрологических констант: полной влагоемкости (ПВ), гигроскопической влаги (ГВ), максимальной гигроскопичности (МГ) и влажности завядания (ВЗ). Данные константы являются ключевыми для оценки состояния почв и разработки мер по их восстановлению. Изменения водно-физических свойств почв в условиях нефтяного загрязнения по сравнению с фоновыми почвами выглядят следующим образом (от наибольших до наименьших трансформаций): ДАВ ↓> ВЗ ↑> МГ ↑> ПВ ↓> НВ ↓> ГВ ↓. Предложены практические рекомендации по восстановлению водно-физических свойств почв, такие как биоремедиация, фиторемедиация, внесение органических удобрений и сорбентов.

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of changes in the soil-hydrological constants of alluvial soils in the middle taiga subzone of Western Siberia under the influence of local oil pollution. It has been established that the penetration of oil products into the soil profile leads to a significant transformation of the key hydrophysical characteristics. The greatest changes are observed in the upper organogenic horizons (0–20 cm), where the zone of maximum hydrocarbon accumulation is formed. The analysis revealed a significant deterioration in the filtration properties of soils (a decrease in water permeability by 5–8 times) and a change in water-holding capacity. Particular attention is paid to the study of the dynamics of the main hydrological constants: total moisture capacity (TMC), hygroscopic moisture (HM), maximum hygroscopicity (MH) and wilting point moisture (WM). These constants are key to assessing the state of soils and developing measures for their restoration. Changes in the water-physical properties of soils under oil pollution conditions compared to background soils are as follows (from the greatest to the least transformations): DAV ↓> VZ ↑> MG ↑> PV ↓> NV ↓> GV ↓. Practical recommendations for the restoration of water-physical properties of soils are proposed, such as bioremediation, phytoremediation, application of organic fertilizers and sorbents.

Ключевые слова: нефтезагрязнение, аллювиальные почвы, почвенно-гидрологические константы, водно-физические свойства, влажность завядания.

Keywords: oil pollution, alluvial soils, soil-hydrological constants, water-physical properties, wilting point moisture.

Введение

Нефтяное загрязнение почв представляет собой одну из наиболее сложных и многогранных экологических проблем, оказывающую долгосрочное воздействие на биогеохимические циклы и функционирование

почвенных экосистем [1, 6, 11, 12]. Попадание нефти и нефтепродуктов в почву приводит к глубоким изменениям ее физических, химических и биологических свойств, что влечет за собой нарушение гидрологического режима, деградацию структуры и потерю плодородия. Особое внимание в научных исследованиях уделяется трансформации водно-физических свойств почв, таких как влагоемкость, водопроницаемость, пористость, плотность и почвенно-гидрологических констант (диапазон активной влаги – ДАВ, наименьшая влагоемкость – НВ, влажность завядания – ВЗ, гигроскопическая влага – ГВ, максимальная гигроскопическая влага – МГ, полная влагоемкость – ПВ). Эти параметры являются ключевыми для понимания механизмов функционирования почв как динамичной системы, способной поддерживать биоразнообразие и обеспечивать экосистемные услуги [2, 7, 14–16].

Нефть и нефтепродукты, проникая в почву, формируют гидрофобные барьеры, которые нарушают естественное распределение влаги и газообмен. Это приводит к изменению почвенно-гидрологических констант, таких как полная влагоемкость и влажность завядания, что, в свою очередь, влияет на доступность воды для растений и микроорганизмов. Подобные изменения не только снижают продуктивность почв, но и нарушают их экологические функции, такие как фильтрация, аккумуляция и трансформация веществ. Изучение трансформации свойств почв при нефтяном загрязнении имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Во-первых, оно позволяет оценить степень и глубину воздействия загрязнителей на почвенные экосистемы, что необходимо для разработки эффективных методов мониторинга и диагностики. Во-вторых, полученные данные являются основой для разработки технологий рекультивации, направленных на восстановление гидрологического режима и структуры почв. Например, понимание того, как нефтяные загрязнители влияют на пористость и водопроницаемость, позволяет подобрать оптимальные методы очистки, такие как биоремедиация, фиторемедиация или физико-химическая обработка.

Кроме того, исследования в этой области имеют важное значение для прогнозирования долгосрочных последствий нефтяного загрязнения. Изменения водно-физических свойств почв могут сохраняться на протяжении десятилетий, что требует разработки стратегий адаптивного управления почвенными ресурсами. Восстановление нефтезагрязненных почв – это не только экологическая, но и социально-экономическая задача, особенно в регионах с интенсивной нефтедобычей. Успешная рекультивация позволяет вернуть земельные ресурсы в сельскохозяйственный оборот, предотвратить загрязнение грунтовых вод и восстановить биоразнообразие.

Таким образом, изучение изменения водно-физических свойств почв и трансформации гидрологических констант при нефтяном загрязнении является важным направлением современного почвоведения и экологии. Оно не только расширяет наши знания о механизмах воздействия загрязнителей на почвенные экосистемы, но и способствует разработке инновационных подходов к восстановлению и устойчивому использованию почвенных ресурсов.

Цель настоящего исследования – изучить особенности трансформации почвенно-гидрологических констант и водно-физических свойств почв в условиях локального нефтяного загрязнения.

Материал и методы исследований

Исследование проводилось на почвах, пострадавших от разливов сырой нефти в средней тайге Западной Сибири, в пределах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО). Участки загрязнения возникли вследствие аварий на промышленных трубопроводах, расположенных в центральной части поймы реки Оби. Впоследствии были проведены рекультивационные работы в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и авторскими рекомендациями, данными в рамках исследования. Однако даже после завершения всех процедур по сдаче и приемке рекультивированных земель остается открытым вопрос о долгосрочном воздействии углеводородов нефти (УВН) на экосистемы. Исследуемая территория была разделена на несколько зон для детального анализа: эпицентр загрязнения – зона непосредственного разлива нефти, прилегающая к промзоне трубопроводного транспорта; периферийная/импактная зона – участок, расположенный в 3 м от центра разлива; граница загрязнения – зона в 5 метрах от эпицентра; фоновые почвы – контрольный участок, находящийся в 10 км к северу от месторождения; условный фон – территория в 500 м от границы загрязнения, используемая для дополнительного сравнения (рис. 1).



Эпицентр загрязнения

Периферийная зона и граница

Фоновая почва

Условный фон

Рис. 1. Объекты исследования

В каждой зоне было определено общее проективное покрытие (ОПП). При полевом описании почв применялась шкала Манселла с указанием трех основных параметров: яркость (V – value), цветность (C – chroma), цветовой тон (H – hue). Границы распространения загрязнений устанавливались по наличию битуминозной корки на поверхности почвы и визуальным признакам угнетения растительного покрова. Исследования проводились спустя 1–2 месяца после загрязнения, что позволило оценить начальные изменения в почвенных свойствах. На каждом участке были заложены почвенные прикопки. Пробы почв отбирались с четырех участков с разной степенью загрязнения на глубинах 0–10 см и 10–20 см. Верхние горизонты почвы играют ключевую роль в качестве биогеохимического барьера, задерживающего поток нефти. Однако при промывном водном режиме загрязняющие вещества активно мигрируют вглубь, оседая в иллювиальных и глеевых горизонтах, которые выступают естественными геохимическими барьерами. Систематическое положение почв на каждом участке определялось в соответствии с российской классификацией почв (2004) и международной системой World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2022). Полевое описание почвенных горизонтов приведено в табл. 3.

Таблица 1. Описание исследованных почв

Классификационная принадлежность почв		Описание горизонта почв (0 – 10 см, 10 – 20 см)
Классификация почв России, 2004 [10]	WRB, 2022 [13]	
Эпицентр загрязнения (n = 25)		
Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой среднемелкой почве	<i>Salictechnic</i> <i>Chloridictchnic</i> <i>Technic Gleyic</i> <i>Fluvisol</i>	ОПП. На исследуемой территории наблюдается крайне угнетенный растительный покров с проективным покрытием 5–10%. Доминируют виды-индикаторы нарушенных земель: – осока желтая (<i>Carex flava</i> L., 1753) – единичные угнетенные побеги; – пушица влагалищная (<i>Eriophorum vaginatum</i> L., 1753) – редкие куртины с хлоротичными листьями; – вейник наземный (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth, 1788) – единичные особи с редуцированными побегами. Редкие виды с морфологическими адаптациями: – таволга иволистная (<i>Spiraea salicifolia</i> L., 1753); – горошек мышиный (<i>Vicia cracca</i> L., 1753)
		1–10 см. Горизонт однородной окраски, темно-серый, приближающийся к черному (по шкале Манселла: яркость 3, цветность 5B, тон Gley 2). Тяжелосуглинистый, бесструктурный, вязкий, мокрый, сильно уплотненный.

		<p>На поверхности – сплошная битумная корка с маслянистым блеском. Встречаются глыбистые агрегаты (3,5–5 см) с выраженными нефтяными пленками. Характерен интенсивный запах углеводородов. Корни растений фрагментированы, представлены разложившимися остатками</p> <p>10–20 см. Горизонт однородной окраски, темно-серый с антрацитовым оттенком (аналогично верхнему слою: яркость 3, цветность 5B, тон Gley 2). Тяжелый суглинок, бесструктурный, сырой, плотный. Глыбистые отдельные (3,5–5 см) пропитаны нефтепродуктами, что подтверждается резким запахом. Присутствуют редкие корневые волокна в стадии активного разложения</p>
Периферийная/импактная зона (n = 25)		
Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глеевой средней почве	<i>Salictechnic Chloridictechnic Technic Gleyic Fluvisol</i>	<p>ОПП. Проективное покрытие 45–65%. В растительном покрове преобладают:</p> <ul style="list-style-type: none"> – осока вздутая (<i>Carex rostrata Stokes, 1787</i>) – куртины с укороченными побегами; – сабельник болотный (<i>Comarum palustre L., 1753</i>) – единичные цветущие экземпляры; – вейник наземный (<i>Calamagrostis epigeios</i>); – рябина сибирская (<i>Sorbus sibirica Hedl., 1901</i>); – таволга средняя (<i>Spiraea media Franz Schmidt, 1791</i>); – шиповник иглистый (<i>Rosa acicularis Lindl., 1820</i>)
		<p>1–10 см. Горизонт однородной окраски, темно-серый с буроватым оттенком (по шкале Манселла: яркость 4, цветность 10YR 3/2). Тяжелосуглинистый, слабоструктурный с неустойчивыми комками 1–3 см. Консистенция влажная, слабоуплотненная. Отмечаются фрагментарные битумные пятна и слабый запах нефтепродуктов. Корневая система разрозненная, частично разложившаяся, с признаками механического повреждения</p>
		<p>10–20 см. Окраска горизонта серая с охристыми пятнами (10YR 4/2). Комковато-глыбистая структура с агрегатами 2–4 см. Гранулометрический состав тяжелый суглинок. Горизонт увлажнен, но без свободной нефти. Встречаются отдельные промасленные участки. Корни растений немногочисленные, преимущественно в верхней части горизонта</p>
Граница загрязнения (n = 25)		
Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глеевой средней почве	<i>Salictechnic Chloridictechnic Technic Gleyic Fluvisol</i>	<p>ОПП. На границе зоны загрязнения проективное покрытие достигает 80–100%. Характерные признаки:</p> <p>Развитие зеленых мхов (<i>Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt., 1851</i>).</p> <p>Появление молодых побегов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris L., 1753</i>); – осина (<i>Populus tremula L., 1753</i>)
		<p>1–10 см. Горизонт серо-коричневой окраски (10YR 5/3), среднесуглинистый. Хорошо выраженная зернисто-комковатая структура. Консистенция свежая, пористая. Загрязнение представлено редкими точечными нефтяными включениями, запах отсутствует. Корневая система достаточно развита, преимущественно мочковатого типа</p>
		<p>10–20 см. Горизонт светло-серой окраски с ржавыми пятнами (10YR 6/2). Ореховатая структура с агрегатами 1–2 см. Без признаков переувлажнения. Следы нефтезагрязнения визуально не определяются</p>
Фоновые почвы (n = 25)		
Аллювиальная серогумусовая типично-глеевая среднетяжелосуглинистая почва	<i>Gleyic Fluvisols</i>	<p>ОПП. Тип растительности: Лугово-болотные ассоциации (осоково-злаковые, местами с участием хвоща и гипновых мхов).</p> <p>Проективное покрытие: 90–100%.</p> <p>Доминанты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – осока острая (<i>Carex acuta L., 1753</i>); – вейник Лангсдорфа (<i>Calamagrostis langsdorffii (Link) Trin., 1824</i>); – хвощ болотный (<i>Equisetum palustre L., 1753</i>). <p>Содоминанты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – мятлик луговой (<i>Poa pratensis L., 1753</i>); – полевица гигантская (<i>Agrostis gigantea Roth, 1788</i>); – сабельник болотный (<i>Comarum palustre L., 1753</i>). <p>Мохово-лишайниковый ярус:</p> <ul style="list-style-type: none"> – кукушкин лен обыкновенный (<i>Polytrichum commune Hedw., 1801</i>); – сфагнум оттопыренный (<i>Sphagnum squarrosum Crome, 1803</i>) (участками)

		<p>1–10 см. Горизонт однородной окраски, серо-бурый (по шкале Манселла: 5YR 5/3 в сухом состоянии). Состоит из слаборазложившихся остатков травянистой растительности. Густо пронизан корнями луговых злаков и осок, местами с признаками анаэробного разложения. Структура рыхлая, комковато-волокнистая, агрегаты 1–2 см. Консистенция влажная, слабоуплотненная. Встречаются ржаво-охристые пятна (окислы железа), что указывает на периодическое переувлажнение. Переход ясный по гранулометрическому составу, граница ровная</p> <p>10–20 см. Окраска горизонта серо-бурая (5YR 5/4), с сизовато-серыми пятнами (признаки оглеения). Многочисленные корни, преимущественно разложившиеся. Структура мелкокомковатая, агрегаты 1–3 см. Тяжелосуглинистый, уплотненный, свежий. Отмечаются редкие железистые конкреции (2–5 мм). Переход постепенный, граница слабоволнистая</p>
Условный фон (n = 25)		
Аллювиальная серогумусовая (дерновая) глеевая типичная бескарбонатная маломощная среднесуглинистая почва	<i>Stagnosols Fluvic</i>	<p>ОПП. Тип растительности: Лугово-болотные ассоциации (осоково-злаковые, местами с участием хвоща и гипновых мхов). Проективное покрытие: 90–100%. Доминанты: – осока острая (<i>Carex acuta L.</i>, 1753); – вейник Лангсдорфа (<i>Calamagrostis langsdorffii (Link) Trin.</i>, 1824); – хвощ болотный (<i>Equisetum palustre L.</i>, 1753). Содоминанты: – мятлик луговой (<i>Poa pratensis L.</i>, 1753); – полевица гигантская (<i>Agrostis gigantea Roth</i>, 1788); – сабельник болотный (<i>Comarum palustre L.</i>, 1753). Мохово-лишайниковый ярус: – кукушкин лен обыкновенный (<i>Polytrichum commune Hedw.</i>, 1801); – сфагнум оттопыренный (<i>Sphagnum squarrosum Crome</i>, 1803) (участками)</p>
		<p>1–10 см. Горизонт темно-серой окраски с буроватым оттенком (10YR 3/2), однородный. Состоит из слаборазложившихся растительных остатков (осоки, злаки). Корневая система плотная, с признаками поверхностного оглеения (сизоватые прожилки). Структура комковато-зернистая, рыхлая. Консистенция влажная, слабоуплотненная. Встречаются мелкие (1–3 мм) ржавые пятна. Переход ясный, граница ровная</p>
		<p>10–20 см. Горизонт серый с сизыми и охристыми пятнами (10YR 4/2, 5GY 5/1), пронизан корнями умеренно, корни частично разложившиеся. Структура комковато-глыбистая, агрегаты 2–4 см. Среднесуглинистый, уплотненный, сырой. Отчетливые признаки оглеения (сизые и ржавые пятна). Переход постепенный, граница слабоволнистая</p>

Полевой отбор проб и подготовка к лабораторным исследованиям проводились в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02–84 [3]. Для определения содержания нефтепродуктов в почвах использовался флуориметрический метод ПНД Ф 16.1:2.21–98 [8]. Определение почвенно-гидрологических констант, таких как диапазон активной влаги (ДАВ), наименьшая влагоемкость (НВ), влажность завядания (ВЗ), гигроскопическая влага (ГВ), максимальная гигроскопическая влага (МГ) и полная влагоемкость (ПВ), проводилось с использованием стандартизированных методов, описанных в нормативных документах (табл. 2).

Таблица 2. Методы определения почвенно-гидрологических констант почв

Параметр	Нормативный документ	Краткая характеристика метода
Диапазон активной влаги (ДАВ)	ГОСТ 28268–89 [4]	Диапазон активной влаги (ДАВ) — это интервал влажности, в пределах которого вода доступна для растений. ДАВ рассчитывается как разница между наименьшей влагоемкостью (НВ) и влажностью завядания (ВЗ): ДАВ = НВ – ВЗ
Наименьшая влагоемкость (НВ)	ГОСТ Р ИСО 18763-2019 [5]	Наименьшая влагоемкость (НВ) — это количество влаги, которое почва удерживает после стекания избыточной воды под действием силы тяжести. Физический метод: – используются мембранные установки, имитирующие корневое давление; – почвенные образцы помещаются в установку, где создается давление, эквивалентное давлению корней растений; – влажность почвы при достижении равновесия фиксируется как ВЗ

Влажность завядания (ВЗ)	ГОСТ 28268–89 [4]	ВЗ – это минимальная влажность, при которой растения начинают увядать. Почвенные образцы помещаются в условия, где выращиваются растения (например, пшеница или подсолнечник). Влажность почвы постепенно снижается до момента, когда растения начинают увядать. Влажность почвы в этот момент фиксируется как ВЗ
Гигроскопическая влага (ГВ)	ГОСТ 28268–89 [4]	ГВ – это влага, которую почва адсорбирует из воздуха при стандартной влажности. Почвенные образцы высушиваются до постоянной массы при температуре 105 °С. Затем образцы помещаются в эксикатор с насыщенным раствором соли (например, хлорида калия) для создания высокой влажности. После достижения равновесия измеряется масса образца, и вычисляется ГВ
Максимальная гигроскопическая влага (МГ)	ГОСТ 28268–89 [4]	МГ – это максимальное количество влаги, которое почва может адсорбировать из насыщенного водяного пара. Почвенные образцы высушиваются до постоянной массы. Затем образцы помещаются в эксикатор с водой для создания 100% влажности. После достижения равновесия измеряется масса образца, и вычисляется МГ
Полная влагоемкость (ПВ)	РД 52.33.219–2022 [9]	ПВ – это максимальное количество воды, которое почва может удерживать. Почвенные образцы насыщаются водой до полного заполнения пор. Избыточная вода удаляется, и измеряется масса образца. ПВ вычисляется как отношение массы удерживаемой воды к массе сухой почвы

В работе использовались параметрические методы статистики (коэффициент корреляции – R). Полученные данные также были сгруппированы по зонам загрязнения с определением среднего (μ) и стандартного отклонения (SD).

Результаты исследований

Непосредственно после разлива нефтепродуктов наблюдается их активное проникновение в почвенный профиль, что приводит к существенным изменениям ключевых гидрологических характеристик аллювиальных почв. Наибольшая концентрация углеводородов отмечается в органогенных горизонтах (0–20 см), где происходит их аккумуляция в системе почвенных пор и по ходам корневых систем растений.

Таблица 3. Содержание НП в нефтезагрязненных почвах

Эпицентр загрязнения		Периферийная/импактная зона		Граница загрязнения	
0–10 см (n = 26)	10–20 см (n = 26)	0–10 см (n = 26)	10–20 см (n = 26)	0–10 см (n = 25)	10–20 см (n = 25)
<u>66,45±13,16</u> 16,23–72,26	<u>50,72±12,75</u> 11,82–65,61	<u>52,02±8,98</u> 11,53–68,12	<u>43,47±9,09</u> 10,09–50,23	<u>13,3±2,19</u> 4,43–13,74	<u>5,69±1,14</u> 3,98–7,08

Примечание: Содержание НП в г/100 г почвы; под чертой – $lim = min - max$, над чертой – среднее.

Анализ распределения нефтепродуктов (НП) в загрязненных аллювиальных почвах выявил четкие пространственно-глубинные закономерности. Наибольшие концентрации НП наблюдаются в эпицентре загрязнения, где в слое 0–10 см содержание углеводородов достигает до 66,45 мг/кг с колебаниями от 16,23 до 72,26 мг/кг. В импактной зоне отмечается более равномерное распределение НП по профилю: 52 мг/кг в слое 0–10 см и 43,5 мг/кг на глубине 10–20 см, что указывает на продолжающийся процесс дифференциации углеводородов. На границе загрязнения содержание НП резко снижается до 13 мг/кг в верхнем слое и 5,7 мг/кг в подстилающем горизонте, демонстрируя экспоненциальный характер уменьшения концентрации по мере удаления от очага загрязнения. Полученные данные свидетельствуют о формировании четко выраженного градиента загрязнения: эпицентр → импактная зона → граница пятна, при этом в каждом выделенном участке сохраняется характерная вертикальная стратификация содержания нефтепродуктов. Особого внимания заслуживает факт накопления максимальных количеств НП в горизонте 0–10 см эпицентральной зоны, что может быть связано с сорбцией углеводородов на границе текстурного перехода и ограниченной миграционной способностью тяжелых фракций нефти. Выявленные закономерности пространственного распределения нефтепродуктов

в почвенном профиле оказывают существенное влияние на почвенно-гидрологические константы загрязненных почв. Особый интерес представляет анализ трансформации этих параметров при разном уровне нефтяного загрязнения, поскольку именно они определяют водный режим, продуктивность и устойчивость почв к загрязнению (рис. 2).

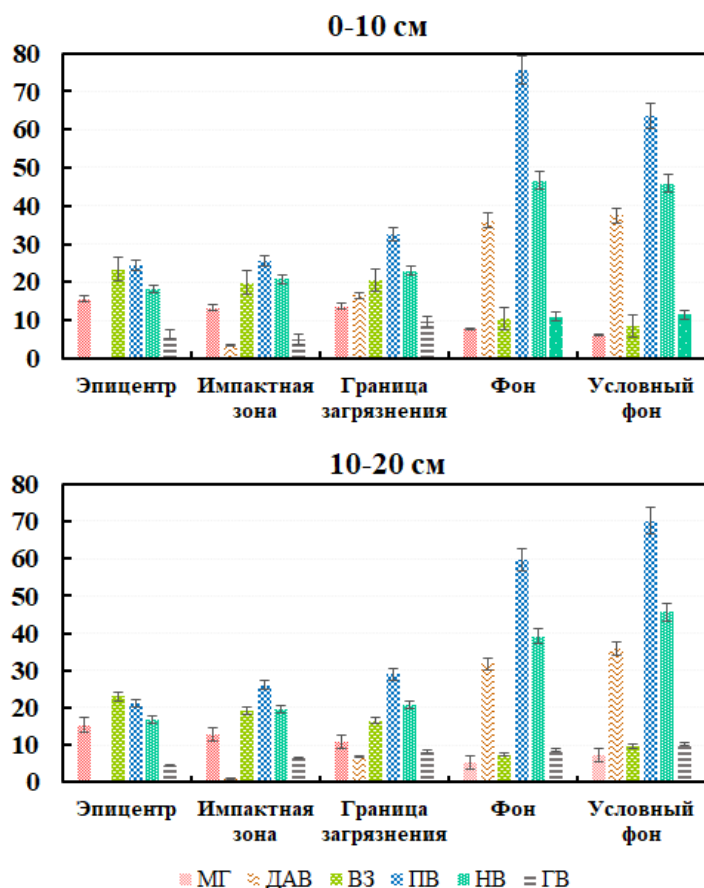


Рис. 2. Почвенно-гидрологические константы в почвах, % (μ и SD)

Опираясь на результаты исследования, можно оценить степень деградации почв и необходимость рекультивационных мероприятий. Предварительные наблюдения показывают, что наиболее значительные изменения почвенно-гидрологических констант наблюдаются в горизонтах с максимальными концентрациями нефтепродуктов. Это свидетельствует о тесной взаимосвязи между уровнем загрязнения и модификацией основных гидрофизических характеристик. Проведенный анализ распределения нефтепродуктов позволяет перейти к изучению того, как варьирование уровня загрязнения влияет на почвенно-гидрологические константы и какие последствия это имеет для водного баланса и экологических функций почв. Наибольшие изменения отмечаются в верхних 20 см профиля, где формируется зона максимального накопления углеводородов.

Изменение максимальной гигроскопической влажности (МГ). В условиях нефтяного загрязнения наблюдается увеличение МГ в эпицентре до 15,58% (0–10 см), что в 2 раза превышает фоновые значения (7,70%). В импактной зоне показатель остается повышенным (13,25–12,82%), демонстрируя прямую корреляционную зависимость от содержания НП ($R = 0,504$). Данный эффект объясняется образованием нефтяных пленок на поверхности почвенных агрегатов, что, однако, сопровождается усилением гидрофобности.

Динамика влажности завядания растений (ВЗ). Загрязнение приводит к росту ВЗ до 23,37% в поверхностном слое эпицентра, что в 2,3 раза выше фонового уровня (10,30%). Даже в импактной зоне значение ВЗ остается критическим для растений (20,43%). Это свидетельствует о значительном увеличении доли физиологически недоступной влаги, что особенно опасно в период вегетации.

Снижение наименьшей влагоемкости (НВ). Наблюдается резкое уменьшение НВ в эпицентре загрязнения – до 18,12% против 46,60% в фоновых условиях. Корреляционный анализ выявил сильную обратную зависимость между содержанием НП и НВ ($R = -0,591$), что связано с разрушением почвенной структуры и потерей способности удерживать влагу.

Деградация полной влагоемкости (ПВ). В эпицентре загрязнения ПВ снижается до 24,42%, что в 3 раза ниже фонового показателя (75,50%). Разница между слоями 0–10 см и 10–20 см (3,56%) указывает на миграцию загрязнителей вглубь почвенного профиля.

Критическое сокращение диапазона активной влаги (ДАВ). В эпицентре ДАВ падает до 0,00%, что свидетельствует о полной потере доступной влаги для растений. В импактной зоне показатель составляет 3,56%, что в 10 раз ниже фона. Установлена обратная корреляция с содержанием НП ($R = -0,591$), подтверждающая негативное влияние нефтяного загрязнения на почвенное плодородие.

Изменение гигроскопической влажности (ГВ)

Загрязнение приводит к снижению ГВ до 6,31% в поверхностном слое эпицентра (фон 10,94%). В импактной зоне наблюдается частичное восстановление показателя (9,54%), однако этого недостаточно для поддержания нормальной активности почвенной биоты.

Особенно критично это сказывается на конечном этапе рекультивации – фитомелиоративном посеве нефтестойких трав. Избыточное увлажнение приводит к снижению плотности растительного покрова на 30–50%, уменьшению проективного покрытия и ухудшению визуальных показателей, используемых для оценки качества рекультивации.

Результаты статистической обработки данных подтверждают наличие двух основных тенденций: прямая корреляция ($R = 0,504$) между содержанием НП и ростом МГ и ВЗ, что обусловлено гидрофобным эффектом нефтяных пленок и обратная корреляция ($R = -0,591$) между концентрацией НП и параметрами НВ, ПВ и ДАВ, отражающая деградацию водоудерживающей способности почв (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между содержанием НП и почвенно-гидрологическими константами в нефтезагрязненных почвах

Параметр	МГ	ВЗ	НВ	ДАВ	ПВ	ГВ	Цветовая шкала R	
Эпицентр загрязнения (n=26)								1,00
НП, г/100 г почвы	0,504	0,497	-0,472	–	-0,606	-0,591,000		0,80
Периферийная/импактная зона (n=26)								0,70
НП, г/100 г почвы	0,467	0,397	-0,365	-0,599	-0,698	-0,604		0,60
Граница загрязнения (n=25)								0,50
НП, г/100 г почвы	0,543	0,412	-0,461	-0,582	-0,643	-0,573		-0,50
								-0,60
								-0,70
								-0,80
							-1,00	

Ранжирование изменений гидрологических параметров по степени выраженности выглядит следующим образом: ДАВ↓ > ВЗ↑ > МГ↑ > ПВ↓ > НВ↓ > ГВ↓. Полученные данные свидетельствуют о кардинальном изменении водно-воздушного режима нефтезагрязненных почв, приобретении ими гидрофобных свойств и формировании значительных объемов физиологически недоступной влаги.

Выявленные закономерности подчеркивают необходимость разработки специальных мелиоративных мероприятий для нефтезагрязненных территорий; организации долгосрочного мониторинга динамики водно-физических свойств и учета изменений гидрологических констант при планировании рекультивационных работ.

Заключение

Таким образом, в гумидных областях образование на поверхности, а также в профиле почв твердых битумных корок в условиях нефтяного загрязнения кардинально изменяет водно-воздушный режим,

что негативно влияет на все характеристики почв. Изменения основных почвенно-гидрологических констант (ДАВ, ВЗ, ПВ) указывают на приобретение почвой гидрофобных свойств, появлению в гумусовых горизонтах влаги, недоступной для растений, и указывают на необходимость проведения дополнительных мелиоративных работ с возможностью дальнейшего мониторинга динамики водно-физических свойств, исследованиям которых в типовых проектах рекультивации нарушенных земель не уделяется достаточного внимания.

Для восстановления водно-физических свойств и почвенно-гидрологических констант нефтезагрязненных почв рекомендуется внедрение комплекса биологических и агротехнических мероприятий. При рекультивации участка, рассмотренного в данной статье, в травосмесь были включены растения с глубокой корневой системой – люцерна и клевер. Их использование позволило сформировать более сомкнутое и устойчивое растительное покрытие по сравнению с участками, где эти виды не высевались. Это свидетельствует о целесообразности применения таких растений при биологической рекультивации нефтезагрязненных территорий. Дополнительное внесение органических удобрений, проведение агротехнических приемов (рыхление, вспашка, использование природных сорбентов – цеолита или бентонита) способствует улучшению структуры почвы, повышению ее влагоемкости и ускоряет процесс восстановления водно-физических характеристик.

Нефтяное загрязнение почв приводит к существенному нарушению их структуры и гидрологического режима, поэтому реализация комплекса биологических, агротехнических и физико-химических методов рекультивации позволяет повысить эффективность восстановления и вернуть такие земли в хозяйственный оборот. Успешная рекультивация нефтезагрязненных почв является важным направлением сохранения экологического равновесия и обеспечения устойчивого природопользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гасанов Г.Н., Гаджиев К.М., Ахмедова З.Н., Рамазанова Н.И., Баширов Р.Р., Асварова Т.А. Определение наименьшей влагоемкости почв ускоренным методом в полевых условиях // Вестник Дагестанского научного центра. 2016. № 60. С. 20–25.
2. Геннадиев А.Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2016. № 6. С. 30–39.
3. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа : введ. 1985-07-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 15 с.
4. ГОСТ 28268–89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений : введ. 1990-01-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. 12 с.
5. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений : введ. 2021-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 27 с.
6. Нефтезагрязненные почвы: свойства и рекультивация / под ред. В.П. Серединой. Томск: НИ ТПУ, 2006. 270 с.
7. Носова М.В. Влияние нефтесолевого загрязнения на экологическое состояние почв поймы реки Оби в условиях среднетаежной подзоны Западной Сибири : дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2024. 213 с.
8. ПНД Ф 16.1:2.21–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии : введ. 1998-12-01. М.: Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 1998. 24 с.
9. РД 52.33.219–2022. Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы. Обнинск.: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023. 126 с.
10. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: ООО Ойкумена, 2004. 342 с.
11. Adipah S. Introduction of petroleum hydrocarbons contaminants and its human effects // Journal of Environmental Science and Public Health. 2019. Vol. 3, N 1. P. 1–9. DOI: 10.26502/jesph.96120043
12. Hussain I., Puschenreiter M., Gerhard S., Schöftner P., Yousaf S., Wang A., Syed J.H., Reichenauer T.G. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications // Environmental and Experimental Botany. 2018. Vol. 147. P. 202–219.

13. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 236 p.

14. *Ossai I.C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.S.* Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review // (Environmental) Technology & Innovation. 2020. Vol. 17. P. 100526. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100526

15. *Tang, J., Lu X., Sun Q., Zhu W.* Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2012. Vol. 149. P. 109–117. DOI: 10.1016/j.agee.2011.12.020

16. *Varjani S.J., Gnansounou E., Pandey A.* Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms // Chemosphere. 2017. Vol. 188. P. 280–291. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.005

Поступила в редакцию 08.08.2025 г.

Принята к печати 26.03.2026 г.

* * *

Носова Мария Владимировна, кандидат биологических наук, специалист по экологической безопасности, ООО «Сахалинская Энергия»; e-mail: nsmvsh@mail.ru

Maria V. Nosova, Candidate of Biological Sciences, environmental protection specialist, Sakhalin Energy LLC; e-mail: nsmvsh@mail.ru

Середина Валентина Петровна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и экологии почв, Томский государственный университет; e-mail: seredina_y@mail.ru

Valentina P. Seredina, Doctor of Biology, professor, professor of the Department of Soil Science and Soil Ecology, Tomsk State University; e-mail: seredina_y@mail.ru

Стовбунник Сергей Анатольевич, главный специалист, ООО «РН-Проектирование Добыча»; e-mail: StovbunikSA@rn-pd.rosneft.ru

Sergey A. Stovbunik, main specialist, RN-Design Extraction LLC; e-mail: StovbunikSA@rn-pd.rosneft.ru