



## Техногенное засоление подзолистых и аллювиальных почв среднетаёжной подзоны Западной Сибири

© 2024 М. В. Носова <sup>1</sup>, В. П. Середина <sup>2</sup>, С. А. Стывбунник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «ТомскНИПИнефть», пр. Мира, 72, г. Томск, 634027, Россия. E-mail: [NosovaMV@tomsknpi.ru](mailto:NosovaMV@tomsknpi.ru)

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия. E-mail: [seredina\\_v@mail.ru](mailto:seredina_v@mail.ru)

**Цель исследования.** Выявить основные тренды и закономерности миграции и аккумуляции нефтяных загрязнителей (нефтепродуктов, легкорастворимых солей) в почвах среднетаёжной подзоны Западной Сибири.

**Место и время проведения.** Почвенно-географические и почвенно-генетические исследования проводили на территории среднетаёжной подзоны Западной Сибири в среднем течении р. Обь в различных элементарных ландшафтах в 2019 и 2023 гг.

**Методы.** Нефтепродукты определяли экстракцией из почвы гексаном с последующим измерением на анализаторе «Флюорат-2». Качественный состав солей определен гостированными методиками в водной вытяжке.

**Основные результаты.** Высокоминерализованные воды оказывают более значительное влияние на свойства подзолистых и аллювиальных почв Западной Сибири, чем действие сырой нефти. Отмечено, что нефтесолевое загрязнение сопровождается высоким содержанием токсичных солей в корнеобитаемых горизонтах. Сброс минерализованных вод в ходе аварийных разливов в условиях переувлажнённых таёжных ландшафтов Западной Сибири приводит к образованию техногенно-засоленных почв на территориях, где естественное развитие этого процесса невозможно. В связи с этим, засоление почв в условиях гумидного климата, можно считать наложенным почвообразовательным процессом.

**Заключение.** Обнаруженные изменения позволяют оценить экологическое состояние почв (химизм, степень засоления, запас токсичных солей) и разработать предложения по рекультивации почв нефтесолевого загрязнения. Совокупное действие процессов засоления и осолонцевания нетипично для зон гумидного почвообразования, где эти процессы не развиты из-за избытка влаги и промывного водного режима. Техногенное засоление, связанное с деятельностью нефтедобычи, часто встречается в таких регионах и не зависит от климатических условий. Ввиду отсутствия промышленного опыта рекультивации почв, подверженных техногенному засолению на территории среднетаёжной подзоны Западной Сибири, исследования по экологическому состоянию почв территории загрязнения являются одной из актуальных задач современного почвоведения и экологии. При этом учёт характера загрязнения, химизма засоления и положения почв в ландшафтно-геохимической катене позволит адаптировать методы рекультивации техногенно-засоленных почв для конкретного участка загрязнения, что в дальнейшем позволит завершить процессы восстановления почв в ходе рекультивационных мероприятий.

**Ключевые слова:** почвы; нефтесолевое загрязнение; минерализованные жидкости; легкорастворимые соли; техногенное засоление; техногенное осолонцевание; химизм засоления.

**Цитирование:** Носова М.В., Середина В.П., Стывбунник С.А. Техногенное засоление подзолистых и аллювиальных почв среднетаёжной подзоны Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 4. e284. DOI: [10.31251/pos.v7i4.284](https://doi.org/10.31251/pos.v7i4.284)

### ВВЕДЕНИЕ

Западная Сибирь – один из основных регионов добычи нефти и газа в России, где широко применяется закачка плотных солевых растворов в подземные пласты. Такой метод помогает повысить эффективность добычи углеводородов, улучшая проницаемость пластов и устойчивость их структуры. В результате аварийных выбросов при добыче, процессы техногенного засоления почв по масштабу и интенсивности отрицательных воздействий часто превосходят влияние битуминозных веществ (нефти и нефтепродуктов), что определяет актуальность проблемы и для районов избыточного увлажнения. В связи с этим, легкорастворимые соли, наряду с нефтью и

нефтепродуктами, являются основными загрязнителями данной территории (Солнцева, 2002; Геннадиев, 2009; Середина и др., 2017; Nosova et al., 2020, 2021).

Несмотря на значительное количество работ (Середина, 2006; Фоминых, 2013; Середина и др., 2017; Wiens, 2013; Carra et al., 2015), посвящённых исследованию влияния нефтяного загрязнения на свойства почв таёжных ландшафтов Западной Сибири, закономерности поведения нефтепродуктов и легкорастворимых солей, их влияние на экологическое состояние территории, а также практические аспекты рекультивационных работ на почвах пойменных экосистем основных месторождений Западной Сибири практически не изучены.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении полевых работ использовали общепринятые методы почвенных исследований, такие как сравнительно-географический, профильно-генетический и сравнительно-аналитический. Объектами исследования являлись почвы на участках разлива сырой нефти и минерализованных жидкостей на территории средней тайги Западной Сибири в пределах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) (табл.1).

Таблица 1

Морфологическая характеристика исследуемых типов почв Западной Сибири

№	Название почв*	Морфологическое строение профиля	Количество проб	Дата отбора
1	2	3	4	5
Техногенно-загрязненные почвы				
Участок №1				
P-1	Эпицентр загрязнения: Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве ( <i>Gleyic Toxic Fluvisols</i> )	(0–10 см)+(10–20 см)+(20–40 см)+(40–60 см)+(60–80 см)+(80–100 см)	6**	01.07.2019
P-2	Импактная зона загрязнения: Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой почве ( <i>Gleyic Toxic Fluvisols</i> )	(0–10 см)+(10–20 см)+(20–40 см)+(40–60 см)+(60–80 см)	5**	01.06.2019
П-1 (П-1.1, П-1.2, П-1.3)	Эпицентр (П-1.1)/импактная зона (П-1.2)/граница загрязнения (П-1.3): Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве ( <i>Fluvisol Toxic Solonchaks</i> )	AУх,v(0–10 см)	75*** П-1.1 (25 проб), П-1.2 (25 проб), П-1.3(25 проб)	01.07.2019
		AУх(10–20 см)	75*** П-1.1 (25 проб), П-1.2 (25 проб), П-1.3(25 проб)	
Участок №2				
P-3	Эпицентр загрязнения: Хемозем техногенно-засоленный по подзолистой иллювиально-железистой почве ( <i>Gleyic Toxic Solonchaks</i> )	Os,x(0–2 см)+OTs,x(2–7 см)+ELs,x(7–12 см)+BEL <sub>Fe,s,x</sub> (12–30 см)+BT <sub>1Fe,s,x</sub> (30–50 см)+BT <sub>2Fe,s,x</sub> (50–60 см)+BT <sub>3Fe,s,x</sub> (60–70 см)+BC <sub>Fe,s,x</sub> (70–100 см)	8**	10.08.2023
П-2 (П-2.1, П-2.2, П-2.3)	Эпицентр (П-2.1)/импактная зона (П-2.2)/граница загрязнения (П-2.3): Хемозем техногенно-засоленный по подзолистой иллювиально-железистой мелкоосветленной легкосуглинистой почве ( <i>Solonchaks Gleyic Toxic</i> )	Os,x(0–10 см)	60*** П-2.1 (20 проб), П-2.2 (20 проб), П-2.3(20 проб)	10.08.2023
		OTs,x(10–20 см)	60*** П-2.1 (20 проб), П-2.2 (20 проб), П-2.3(20 проб)	

Фоновые почвы Участок №3				
1	2	3	4	5
Фон-1	Аллювиальная серогумусовая типично-глееватая средне мелкая тяжелосуглинистая почва ( <i>Gleyic Fluvisols</i> )	AУv(0–13 см)+AУ(13–30 см)+AУC <sub>g</sub> (30–45 см)+IC <sub>1g</sub> (45–55 см)+IC <sub>2g</sub> (55–90 см)+IIIC <sub>3g</sub> (90–100 см)	6**	20.08.2023
Участок №4				
Фон-2	Подзолистая иллювиально-железистая мелкоосветленная легкосуглинистая почва ( <i>Albic Podzol</i> )	O(0–2 см)+OT(2–7 см)+EL(7–12 см)+BEL <sub>Fe</sub> (12–30 см)+BT <sub>1Fe</sub> (30–50 см)+BT <sub>2Fe</sub> (50–60 см)+BT <sub>3Fe</sub> (60–70 см)+BC <sub>Fe</sub> (70–100 см)	8**	15.08.2023
Участок №1				
П-1 (фон)	Аллювиальная серогумусовая типично-глееватая средне мелкая тяжелосуглинистая почва ( <i>Gleyic Fluvisols</i> )	AУv(0–10 см)	20***	01.07.2019
		AУ(10–20 см)	20***	
		AУC <sub>g</sub> (20–40 см)	20***	
Участок №2				
П-2 (фон)	Подзолистая иллювиально-железистая мелкоосветленная легкосуглинистая почва ( <i>Albic Podzol</i> )	O(0–10 см)	20***	10.08.2023
		OT(10–20 см)	20***	
		EL(20–30 см)	20***	
		BEL <sub>Fe</sub> (30–40 см)	20***	

Примечание.

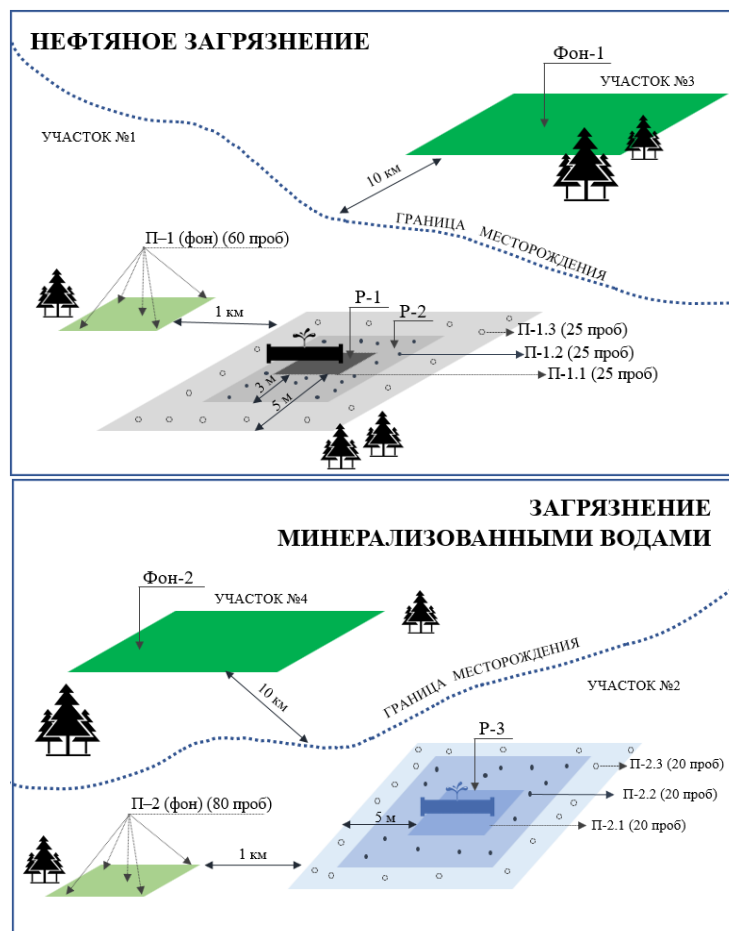
\*Название почв приведено по «Классификация и диагностика почв России» (2004), в скобках – по IUSS Working Group WRB (2022). \*\*Отбор точечных проб проводили в почвенном разрезе из каждого генетического горизонта/слоя. Итоговое количество проб совпадает с количеством генетических горизонтов/слоев. \*\*\*Отбор объединенных проб проводили в почвенных прокопках (1 объединённая проба = 30 точечным пробам).

Из-за невозможности дифференциации генетических горизонтов в почве, загрязнённой углеводородами нефти (Р-1 в эпицентре, Р-2 в импактной зоне, П-1: П-1.1, П-1.2, П-1.3), пробы отбирались послойно через каждые десять сантиметров до глубины распространения нефти (100 см/80 см). Разница в мощности органогенного горизонта между разрезами и прикопками связана с особенностями микрорельефа и разной мощностью органогенного горизонта. В условиях техногенного загрязнения нефтепродукты могут избирательно накапливаться в более мощных органогенных горизонтах, которые обладают большей нефтеемкостью.

Очаги загрязнения образовались вследствие разгерметизации промышленных трубопроводов, вызвав нефтяное загрязнение аллювиальных почв (июль 2019 г.) в центральной части поймы реки Оби. Аварийный отказ водовода высокого давления на водораздельной равнине левобережья привёл к загрязнению подзолистых почв минерализованными водами (август 2023 г.). Подзолистые почвы могут формироваться на водораздельных пространствах Западной Сибири, характеризующейся избыточным увлажнением и умеренным климатом, особенно на возвышенных участках и водоразделах (Роде, 1957; Ковда, 1963). В течение месяца после аварии на трубопроводном транспорте, были обследованы почвы, находящиеся под влиянием каждого типа загрязнения. Для исследования изменений почв под влиянием нефтяных загрязнителей с глубиной были заложены полнопрофильные почвенные разрезы. Отбор проб проводился из каждого генетического горизонта. Почвы находятся в эпицентре нефтяного загрязнения (Р-1: 6 точечных проб), импактной зоне нефтезагрязнения (Р-2: 5 точечных проб), в эпицентре загрязнения минерализованными водами (Р-3: 8 точечных проб).

Для исследования латеральной миграции нефтепродуктов и легкорастворимых солей заложена серия почвенных прикопок (П-1: П-1.1, П-1.2, П-1.3 и П-2: П-2.1, П-2.2, П-2.3, соответственно). Объединённые пробы, состоящие из 30 точечных проб, отбирались в эпицентре загрязнения и на различном удалении от очага загрязнения: в импактной зоне (3 метра) и на границе загрязнения (5 метров) на глубинах 0–10, 10–20 см (рис. 1). Границы зон воздействия определялись по степени деградации растительного покрова, интенсивности окраски почв под влиянием поллютантов, а также по следующим признакам: наличие битуминозной корки на поверхности почвы (ярко выражена в

эпицентре, менее выражена в импактной зоне, отсутствует на границе загрязнения), солевой корки (выражена в эпицентре) и выцветов солей (наблюдаются в импактной зоне, отсутствуют на границе загрязнения).



**Рисунок 1.** Карта-схема очагов загрязнений.

\*Эпицентр загрязнения – наибольшая зона техногенного воздействия; импактная зона загрязнения – буферная зона воздействия источника загрязнения (территория от эпицентра до границ загрязнения); граница загрязнения – зона с минимальным воздействием источника загрязнения.

Для оценки степени изменения почв на загрязнённых участках по сравнению с естественными почвами, соблюдая требование максимальной однородности факторов почвообразования – почвообразующих пород, элементов рельефа и характера растительности, были заложены почвенные разрезы на фоновых участках в 10 км от зоны загрязнения. Требования к отбору фоновых проб почвы для контроля загрязнения установлены в ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб». Пробы отбирали из основных генетических горизонтов на всю глубину разреза (Фон–1: 6 точечных проб; Фон–2: 8 точечных проб). Фоновые почвенные прикопки (П–1 (фон), П–2 (фон)) заложены в непосредственной близости от места аварии, но за пределами распространения нефтяного пятна и минерализованных вод. В дальнейшем все вышеупомянутые загрязнённые почвы были рекультивированы эксплуатирующей организацией.

Систематическое положение почв на каждом обследованном участке определяли по «Классификация и диагностика почв России» (2004) и по IUSS Working Group WRB (2022).

**Нефтепродукты (НП)** в почвах определены в соответствии с ПНДФ 16.1:2.21-98. Плотный остаток и  $r_{\text{H}_{2}\text{O}}$  определены согласно ГОСТ 26423-85. Качественный состав солей определен гостированными методиками в водной вытяжке. Перед проведением анализа почв были выполнены качественные реакции для выявления ионов солей в почвенных образцах в соответствии с действующими ГОСТами. Определение сульфат-ионов проводили по ГОСТ 26426-85, осаждая сульфат бария при добавлении раствора бария, что указывает на присутствие сульфатов в образце. Ионы натрия и калия выявляли методом пламени по ГОСТ 26427-85, при этом натрий окрашивает

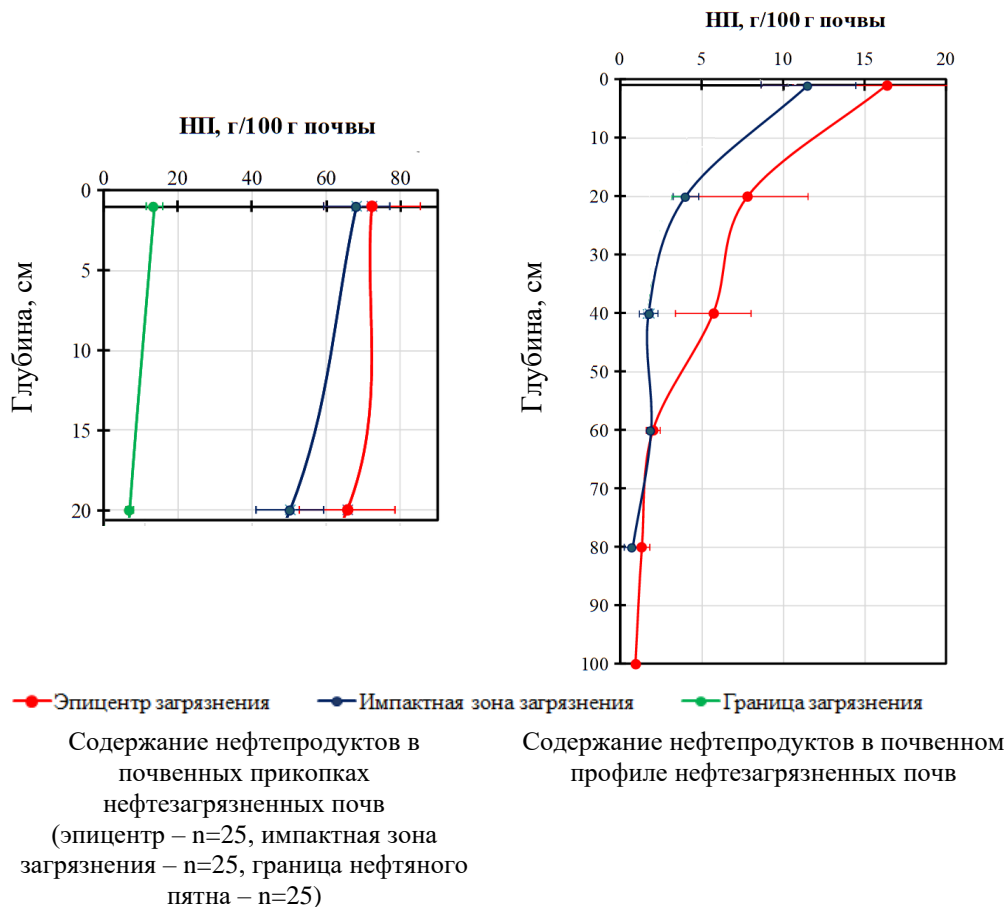
пламя в жёлтый цвет, а калий – в фиолетовый. Хлорид-ион определяли по ГОСТ 26425-85 путем добавления раствора нитрата серебра, что вызывает образование белого осадка хлорида серебра, свидетельствующего о наличии хлоридов. Для обнаружения ионов кальция и магния использовали ГОСТ 26428-85: кальций образует белый осадок при добавлении оксалата аммония, а магний – при добавлении магнезонавого реагента или щелочи. Ионы карбоната и бикарбоната определяли по ГОСТ 26424-85, при котором добавление кислоты к образцу вызывает выделение углекислого газа, подтверждая наличие карбонатных ионов в образце. Во всех загрязнённых почвах установлена положительная реакция на наличие солей (за исключением карбонатов и бикарбонатов, реакция – отрицательная). В фоновых почвах (Фон–1, Фон–2, П–1 (фон), П–2 (фон)) качественная реакция на наличие солей отрицательная – соли отсутствуют.

Ввиду отсутствия методических рекомендаций, а также утверждённых ПДК солей в почвах, степень засоления оценивали по классификации, представленной в трудах различных авторов (Ковда, 1963; Зайдельман, 2017). Нормальность распределения полученных результатов оценивали с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. В работе использовали параметрические методы статистики (коэффициент корреляции Пирсона –  $R^P$ ). Полученные данные были сгруппированы по зонам загрязнения с определением диапазона данных ( $lim=min-max$ ), среднего, стандартного отклонения ( $SD$ ), коэффициента вариации ( $CV$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для верхних горизонтов загрязнённых почв характерно фронтальное просачивание нефти, которое полностью насыщает массу этих горизонтов, не создавая существенных различий между отдельными блоками. Установлено, что в почвах, загрязнённых сеноманскими водами (Р–3), а также в фоновых почвах (Фон–1, Фон–2, П–1 (фон), П–2 (фон)) содержание нефтепродуктов находится ниже предела обнаружения, в связи с чем, данные не приводятся.

Содержание **углеводородов нефти (УВН)** в нефтезагрязнённых почвах по профилю уменьшается по мере удаления от эпицентра загрязнения к импактной зоне в латеральном направлении и по мере увеличения глубины горизонтов почв (рис. 2).



**Рисунок 2.** Содержание нефтепродуктов (НП) в различных зонах загрязнения.



Основная часть лёгких углеводородов удаляется с поверхности почв путем испарения и выноса с жидким поверхностным стоком. Тяжёлые УВН и смолисто-асфальтеновые компоненты чаще всего закрепляются в верхних горизонтах почв.

При аварийных разливах нефть распределяется по поверхности почвы неравномерно, что приводит к значительным колебаниям концентраций загрязняющих веществ в отдельных точках. Это создает вариативность загрязнения при отборе проб из генетических горизонтов и подчеркивает важность их отбора не только по профилю, но и необходимость отбора объединенных проб в различных зонах загрязнения. Такие пробы позволяют получить репрезентативную картину глубины и масштаба распространения поллютантов. Разница в концентрации нефти между почвенными разрезами и прикопками может быть связана с особенностями миграции углеводородов, микрорельефом и различиями в плотности почвы, что сохраняет высокую вариабельность даже при снижении концентрации с глубиной. В эпицентре загрязнения, на глубине 0–10 см, в почве отмечается содержание нефти в диапазоне от 16,23 до 72,26 г/100 г, со средним значением 66,45 и стандартным отклонением 13,16. Коэффициент вариации составляет 19,80%, что указывает на умеренную вариабельность концентраций. В слое почвы 10–20 см среднее содержание нефти составляет 50,72 г/100 г с SD=12,75 и CV=25,14%, что свидетельствует о более высокой степени неоднородности распределения.

В импактной зоне среднее содержание нефти на глубине 0–10 см составляет 52,02 г/100 г, стандартное отклонение – 8,98, а коэффициент вариации – 17,26 %, что указывает на относительно низкую вариабельность загрязнения. В слое почвы 10–20 см, где содержание нефти варьируется от 10,09 до 50,23, среднее значение снижается до 43,47, однако стандартное отклонение (SD=9,09) и CV=20,91% демонстрируют повышение вариабельности по сравнению с верхними слоями.

На границе загрязнения наблюдается значительно меньшая концентрация нефти. На глубине почвы 0–10 см содержание нефти составляет в среднем 13,3 г/100 г, SD=2,19, а CV=16,47%, что отражает сравнительно низкую вариабельность. На глубине 10–20 см среднее значение снижается до 5,69, SD=1,14, а CV возрастает до 20,04%, что указывает на возрастание неоднородности в нижних горизонтах. Диапазон концентрации ожидаемо снижается с глубиной, что подтверждается данными: в эпицентре загрязнения на глубине 0–10 см диапазон составляет 16,23–72,26 (CV=19,80%), а на глубине 10–20 см 11,82–65,61 (CV=25,14%). Аналогичная тенденция наблюдается в импактной зоне и на границе загрязнения. Несмотря на общее снижение концентрации с глубиной, коэффициенты вариации в некоторых горизонтах остаются высокими (например, 20,91% в импактной зоне на глубине 10–20 см и 20,04% на границе загрязнения). Это указывает на влияние локальных скоплений нефти, обусловленных микрорельефом и плотностью почвы. Такие закономерности подчёркивают значительную вариабельность загрязнения и важность учёта глубины и профиля для оценки экологической обстановки.

Для верхних горизонтов (0–10 см, 10–20 см) хемоземов различных зон загрязнения характерно повышенное содержание нефтепродуктов (табл. 2), что связано с закреплением техногенных углеводородов органическими компонентами почв, обладающими высокой нефтеемкостью. При этом наблюдается поступление нефтепродуктов сверху вниз по профилю почвы с постепенным снижением их концентрации. В гумусово-аккумулятивных горизонтах аллювиальных нефтезагрязнённых почв (P–1 и P–2, прикопки нефтезагрязнённых) максимум НП приурочен к эпицентру загрязнения, при движении к импактной зоне содержание углеводородов нефти уменьшается.

**Таблица 2**

Содержание нефтепродуктов в корнеобитаемых горизонтах почв в различных зонах загрязнения (верхние горизонты P–1, P–2, П–1: П–1.1, П–1.2, П–1.3), г/100 г почвы

Эпицентр загрязнения		Импактная зона		Граница загрязнения	
0–10 см (n=25)	10–20 см (n=25)	0–10 см (n=25)	10–20 см (n=25)	0–10 см (n=25)	10–20 см (n=25)
66,45 ± 13,16 (CV=19,80)	50,72 ± 12,75 (CV=25,14)	52,02 ± 8,98 (CV=17,26)	43,47 ± 9,09 (CV=20,91)	13,3 ± 2,19 (CV=16,47)	5,69 ± 1,14 (CV=20,04)
16,23–72,26	11,82–65,61	11,53–68,12	10,09–50,23	4,43–13,74	3,98–7,08

Примечание.

Над чертой – среднее ± стандартное отклонение, в скобках – коэффициент вариации (CV, %), под чертой – диапазон данных: lim=min–max,

Преимущественно ненормальное распределение концентраций нефтепродуктов связано с пространственной неоднородностью почвенных характеристик, таких как мощность органогенных горизонтов, особенности микрорельефа и плотность растительного покрова. Эти факторы создают различия в аккумуляции и миграции углеводородов в почвенном профиле, что приводит к значительным отклонениям от нормального распределения.

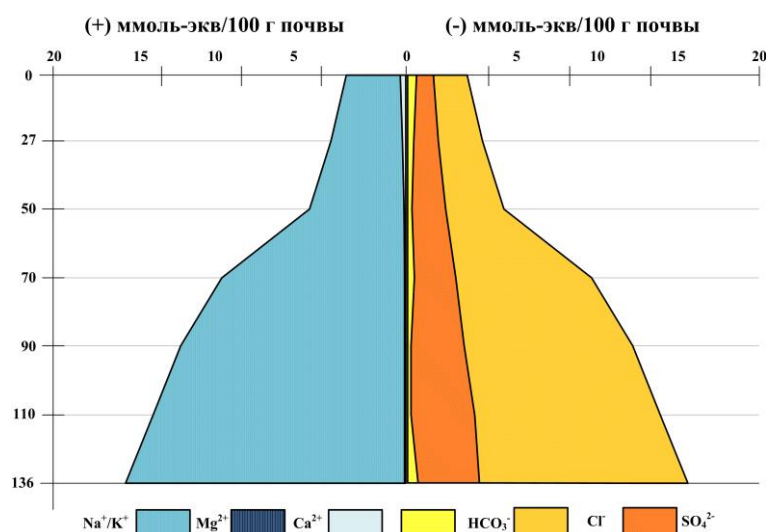
В большинстве горизонтов почвы распределение содержания нефти отклоняется от нормального. Это подтверждается смещением средних значений относительно середин диапазонов и значительными коэффициентами вариации (до 25,14% в эпицентре загрязнения на глубине 10–20 см и 20,04 % на границе загрязнения на той же глубине). Исключением является граница загрязнения на глубине 0–10 см, где коэффициент вариации составляет 16,47%, что приближается к нормальному распределению. Основными причинами ненормальности являются локальные скопления нефти, особенности миграции углеводородов, микрорельеф и различия в плотности почвы. Эти факторы создают высокую неоднородность даже на глубинах, где концентрация нефти снижаются.

Неровности микрорельефа способствуют локализации загрязняющих веществ в депрессиях, где задерживается большее количество нефтепродуктов, тогда как на возвышенных участках происходит их быстрее вымывание или разложение. Такие закономерности подчёркивают важность учёта пространственной неоднородности почв при оценке распределения нефтепродуктов в загрязнённых зонах.

В пределах района исследования, особенно в почвах центральной части поймы, легкорастворимые соли, привнесённые с нефтью, будут выноситься из почвенного профиля в грунтовые воды и мигрировать вниз по профилю. Следовательно, в такой почве будут оставаться битуминозные вещества, которые по своей природе миграционно более устойчивы. В восстановительных условиях, характерных для многих почв нефтедобывающих районов Западной Сибири, и суровом холодном климате, также характерном для данной климатической зоны, процессы разложения нефти значительно замедляются. Поэтому аккумулятивные ландшафты могут служить источником вторичного загрязнения территории нефтепродуктами и легкорастворимыми солями.

Поступление высокоминерализованных вод приводит к формированию сложных ореолов загрязнения. Наибольшая зона техногенной трансформации для обоих типов загрязнения характерна для эпицентра. По мере продвижения к контуру распространения загрязнения (импактная зона, граница) их содержание снижается. Во всех изученных почвах отмечается различный уровень засоления.

Хемоземы по подзолистой почве (Р–3) отличаются сильной степенью засоления (рис. 3). В почвенном профиле отмечается вынос ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  при слабой миграции других солей в профиле ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ). Установлено, что в корнеобитаемых горизонтах почв (0–10 см) отношение хлоридов к сульфатам (1,96/1,77 ммоль(экв)/100 г почвы) выше по сравнению с таковым нижней части профиля (12,4/4,56 ммоль(экв)/100 г почвы), что свидетельствует об остаточном засолении, обусловленном эпизодическим выносом ионов хлора и натрия из верхних горизонтов профиля.



**Рисунок 3.** Солевой профиль загрязнённой минерализованными (сеноманскими) водами подзолистой почвы (эпицентр загрязнения, Р–3).

В солевом профиле выражены две зоны: от 0 до 70 см (гор. Os,x, OTs,x, ELs,x, BELFe,s,x, BT1Fe,s,x, BT2Fe,s,x, BT3Fe,s,x), откуда происходит активный вынос ионов, и нижележащие горизонты от 70 до 136 см (BCFe,s,x), где аккумулируются продукты выноса. Тип химизма в техногенно-засоленной почве – сульфатно-хлоридный натриевый, что характерно для загрязнения минерализованными сеноманскими водами. Концентрация  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  возрастает с глубиной и снижается от эпицентра разлива к его периферии. Хлорид-ион занимает доминирующее положение среди прочих анионов: его доля в миграционных потоках составляет около 80%. Доля катионов натрия – практически 95%.

Опасность техногенного засоления связана не только с общим содержанием солей в корнеобитаемых горизонтах почв, но и с их токсичностью для высших растений. В хемоземах по подзолистой почве токсичные техногенные соли представлены  $\text{NaHCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Их сумма ( $\Sigma_{\text{токс}}$ ) в профиле возрастает с глубиной и достигает 1,2% в нижних горизонтах. Это может свидетельствовать о вымывании солей из почвенного профиля с понижением уровня грунтовых вод. Данный солевой профиль характерен для сульфатно-хлоридного типа засоления, что подтверждает техногенное происхождение солей в почвенном профиле.

Хемоземы по аллювиальной почве (P-1, P-2) характеризуются средней степенью засоления в эпицентре и слабой в импактной зоне при сульфатно-натриевом типе засоления, обусловленном сернистостью нефти и составом подтоварных вод. По результатам корреляционного анализа выявлена статистически значимая положительная связь между содержанием легкорастворимых солей и УВН ( $R_p = 0,89$  на глубине 0–10 см и 0,85 на глубине 10–30 см,  $p < 0,05$ ).

В отличие от хемоземов по подзолистой почве, в хемоземах по аллювиальной почве концентрация солей достигает максимума в поверхностном корнеобитаемом слое, затем постепенно снижается с глубиной (импактная зона загрязнения) или остаётся постоянной (эпицентр) (рис. 4). Такой характер распределения солей может быть связан с сезонным подъёмом грунтовых вод и миграцией солей по профилю почв.

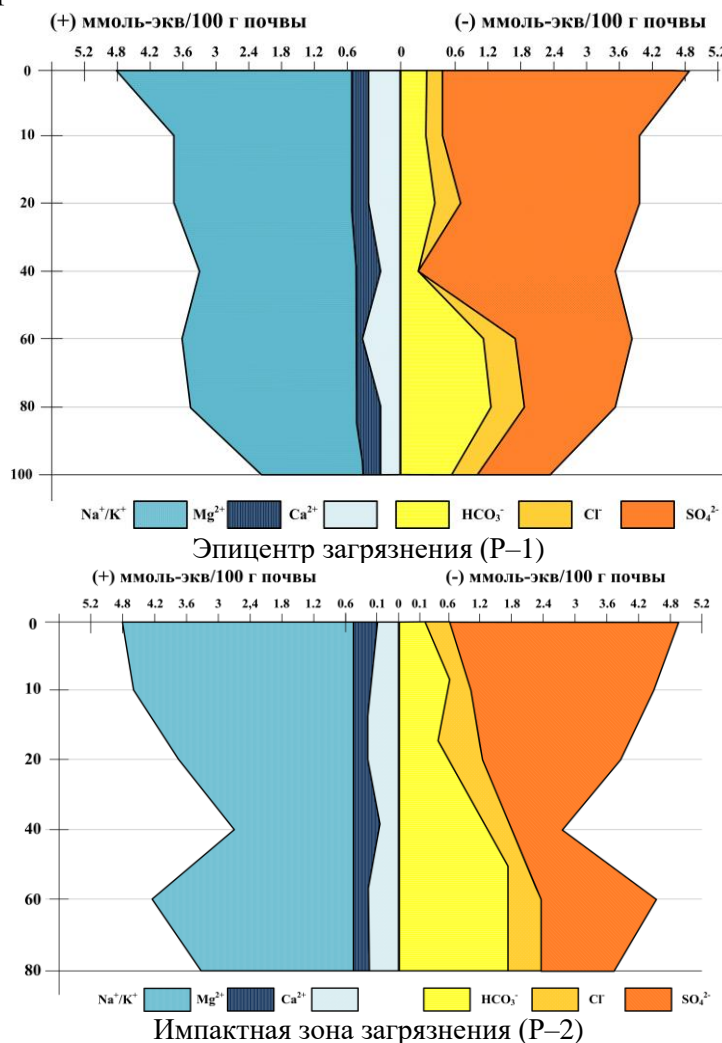
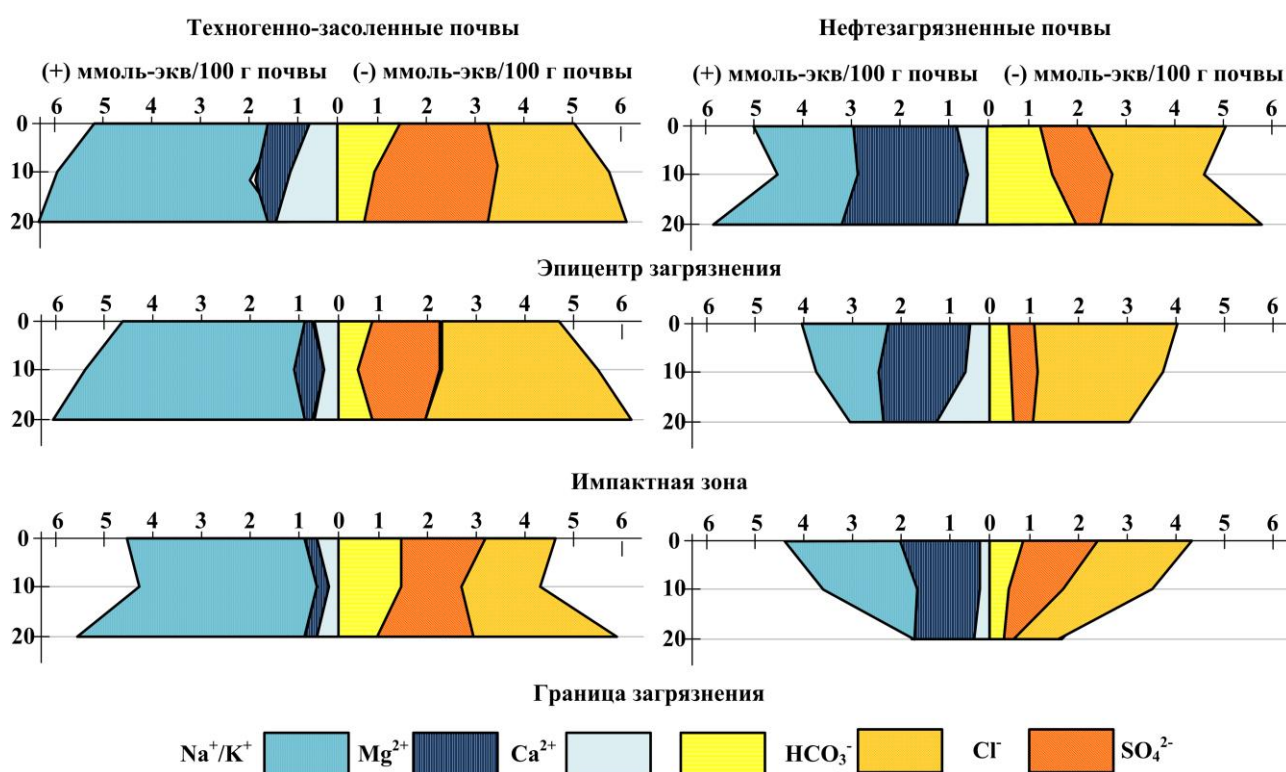


Рисунок 4. Солевой профиль нефтезагрязнённых аллювиальных почв.



В хемоземе по аллювиальной почве токсичные техногенные соли представлены  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgCl}_2$ . Почвенные растворы с высокой концентрацией токсичных солей в нижележащих горизонтах почв, поступая в корнеобитаемые слои, могут способствовать вторичному засолению. Такой эффект возможен в тех случаях, когда грунтовые воды, характерные для территории Западной Сибири (ультракислые или нейтральные), не обеспечивают достаточного разбавления этих солей. Следует отметить, что наибольшую опасность техногенное засоление представляет для почв пойменных экосистем. Ландшафтные особенности аллювиальных почв – близкий подпор грунтовых вод, механическая суффозия, сезонная пульсация, эрозионно-аккумулятивные процессы и, как следствие, накопление поллютантов, привнесённых с почв автономных позиций, создают токсичную среду для роста и развития растений. Таким образом, особенности нефтесолевого загрязнения создают возможность развития сопутствующего солончакового процесса наряду с основными процессами, формирующими профиль аллювиальных почв (пойменного, аллювиального, дернового). Анализируя полученные данные, можно расположить преобладающие ионы в почвах, загрязнённых сырой нефтью, в следующий ряд:  $\text{HCO}_3^- < \text{Mg}^{2+} < \text{Cl}^- < \text{Ca}^{2+} < \text{Na}^+ + \text{K}^+ < \text{SO}_4^{2-}$ . Для почв, загрязнённых минерализованными жидкостями (сеноманскими водами), характерно следующее распределение:  $\text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{HCO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{Cl}^- < \text{Na}^+ + \text{K}^+$ .

Для нефтезагрязнённых почвенных прикопок характерно преобладание ионов  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  при  $\text{pH} < 8,5$ , а также постепенное снижение содержания солей в поверхностном горизонте почв при движении от эпицентра к границе загрязнения (рис. 5). Доминирующее положение в почвах, загрязнённых минерализованными жидкостями, занимают ионы натрия и хлора. Концентрации солей данных ионов снижаются при продвижении от эпицентра разлива к его периферии.



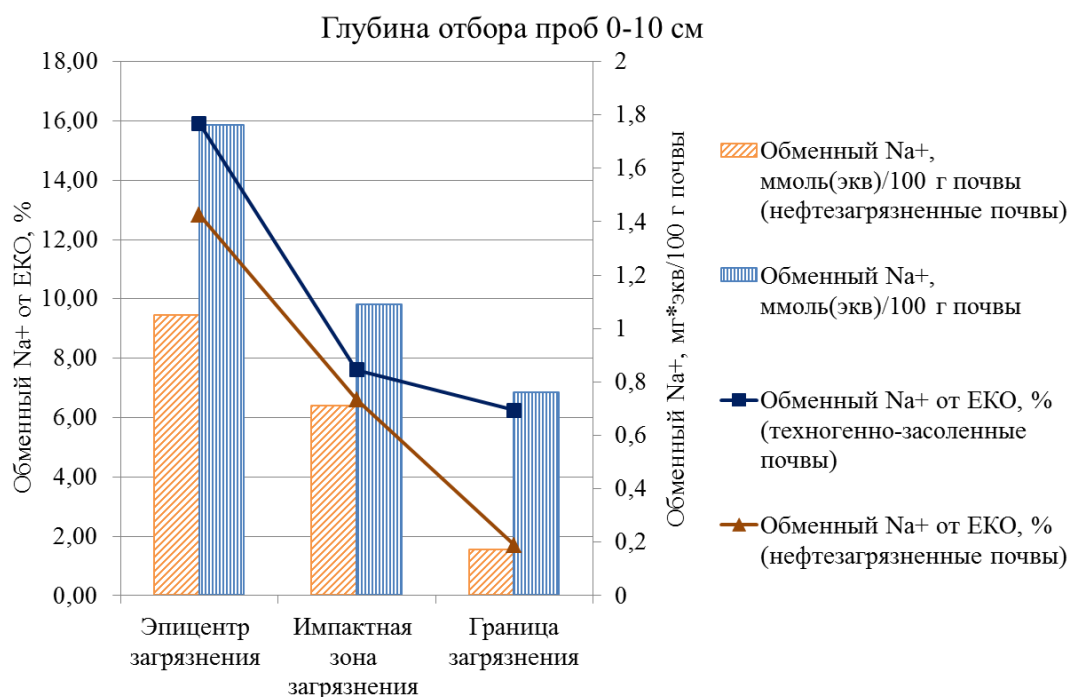
**Рисунок 5.** Распределение солей в нефтезагрязненной аллювиальной почве и техногенно-засоленной подзолистой почве.

В таёжных районах нефтедобычи в силу биоклиматических условий создаются условия для промывного водного режима. В связи с этим, можно предположить, что техногенно привнесенные в почвы соли, обладающие высокой миграционной способностью, например, хлориды, будут довольно быстро выноситься из профиля почв, вследствие чего их содержание с глубиной будет возрастать. Данная тенденция наблюдается относительно всех ионов, которые входят в состав водной вытяжки загрязнённых почв, кроме ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ .

Сравнивая два типа загрязнения почв – обводненной сырой нефтью и минерализованными жидкостями (сеноманскими водами) можно выявить следующие особенности. На разливах сырой

нефти максимальное содержание солей приурочено только к верхним корнеобитаемым горизонтам, в нижележащих горизонтах их концентрации невелики. Ведущую роль в процессе фракционирования солей играют ионы  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Na}^+$ . В целом, распределение солей в пределах почвенного профиля равномерное. В почвах, загрязнённых минерализованными жидкостями (сеноманскими водами), процесс распределения солей менее равномерен. Максимум солей смещён до глубины 130 см, формируя за счёт интенсивного выноса  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  горизонт соленакопления.

Процесс техногенного засоления сопровождается ответными реакциями, обусловленными техногенным осолонцеванием. В верхних горизонтах почв обоих типов загрязнения содержание обменного натрия в ППК и его доля от ЕКО позволяют судить о различном уровне солонцеватости (рис. 6). В техногенно-засоленных почвах с глубиной профиля содержание водорастворимых солей и насыщенность ППК натрием постепенно снижаются. При нефтяном загрязнении насыщенность почв поглощённым катионом натрия возрастает с увеличением степени нефтезагрязнения. При перемещении к периферии при обоих типах загрязнения содержание обменного  $\text{Na}^+$  уменьшается. Состав обменных оснований почв обоих типов загрязнения представлен ионами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  при полном отсутствии катионов  $\text{H}^+$  и  $\text{Al}^{3+}$ , характерных для почвенного поглощающего комплекса фоновых почв. Степень проявления солонцового процесса в нефтезагрязнённых почвах в различных зонах загрязнения изменяется в следующем ряду: солонцеватые (эпицентр) > слабосолонцеватые (импактная зона) > не солонцеватые (граница загрязнения). Степень и характер проявления солонцеватости в верхних горизонтах техногенно-засоленных почв выражены в большей степени.



**Рисунок 6.** Изменение содержания обменного натрия и его доли от емкости катионного обмена (ЕКО) в поверхностном горизонте почв (0–10 см) различных зон загрязнения.

В условиях гумидного почвообразования для почв характерен ирригационный водный режим, что препятствует развитию процессов техногенного засоления и осолонцевания. Однако при этом происходит трансформация состава обменных катионов поверхностных горизонтов в сторону накопления натрия за счёт вытеснения части обменного кальция. При отсутствии дренажа или неэффективной его работе промывной ирригационный режим может приводить к подъёму грунтовых вод выше критического уровня, создавая предпосылки для развития вторичного осолонцевания и засоления почв.

## ВЫВОДЫ

1. Специфической особенностью почв, загрязнённых в процессе добычи нефти, является накопление легкорастворимых солей, о чем свидетельствует величина плотного остатка в пределах ореола загрязнения (0,3–1,57%), позволяющая отнести все загрязнённые почвы к категории

засоленных. На разливах обводненной подтоварными водами сырой нефти максимальное содержание солей приурочено только к верхним корнеобитаемым горизонтам. Ведущую роль в процессе фракционирования солей играют ионы  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Na}^+$  (сульфатно-натриевый химизм засоления). В почвах, загрязнённых минерализованными жидкостями (сеноманскими водами), максимум солей смещён до глубины 130 см, формируя за счет интенсивного выноса  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$  горизонт соленакпления (хлоридно-натриевый химизм засоления). Наряду с процессами техногенного засоления, в почвах протекают процессы техногенного осолонцевания. В нефтезагрязнённых почвах данные процессы связаны с появлением обменного натрия в ППК, составляющего 0,98–12,83% от емкости катионного обмена (ЕКО). Степень проявления солонцового процесса в техногенно-засоленных почвах более выражена по сравнению с почвами, загрязнёнными сырой нефтью. Доля обменного натрия в ППК достигает практически 16% от ЕКО.

2. В хемоземе нефтезагрязнённом токсичные техногенные соли накапливаются в корнеобитаемом горизонте и представлены  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgCl}_2$ , в хемоземах по подзолистой почве –  $\text{NaHCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . С глубиной профиля их сумма ( $\Sigma_{\text{токс}}$ ) возрастает, достигая 1,15% в нижних горизонтах, что характерно для солончакового типа засоления. Засоление в условиях гумидного климата является наложенным почвообразовательным процессом, формирующим посредством пульсации восходящих потоков грунтовых вод дополнительный риск засоления почв, обычно нехарактерного для почв с промывным типом водного режима.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупное действие процессов техногенного засоления и техногенного осолонцевания формирует одну из главных проблем при сдаче рекультивированных участков контролирующим органам – сложность создания равномерного по густоте и площади растительного покрова. В связи с этим, накопление данных о специфике протекании процессов техногенного загрязнения почв является одной из наиболее актуальных задач. Учёт характера загрязнения, химизма засоления и положения почв в ландшафтно-геохимической катене позволит адаптировать методы рекультивации техногенно-засоленных почв для конкретного участка загрязнения, что в дальнейшем будет способствовать оптимизации процессов восстановления почв в ходе рекультивационных работ.

В настоящее время рекультивация загрязнённых пластовой жидкостью земель официально не проводится. Локальные попытки восстановить техногенно-засоленные почвы, как правило, проводятся без достаточного научного обоснования и без учёта комплексной оценки загрязнённой территории. Описанные в литературе методы борьбы с осолонцеванием почв по большей части встречаются в работах сельскохозяйственного направления.

Ликвидация последствий аварийных разливов пластовых вод на почвенный покров проводится зачастую такими способами, в результате которых происходит необратимое уничтожение и без того уже «угнетённого» (в результате проникновения солевых растворов в глубь горизонтов) плодородного слоя почвы, частичная деградация, а то и полная гибель биогеоценоза. Возникшая проблема формирует представление о необходимости составления чёткого структурированного плана экологических мероприятий, направленных на снижение концентраций солей физическими методами, а также внесением определенных компонентов, способных катализировать процесс рассоления почвы в связи с аварийными выбросами пластовых вод.

### ЛИТЕРАТУРА

- Геннадиев А.Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2009. № 6. С. 30–39.
- Зайдельман Ф.Р. Мелиорация почв. Учебник. 4-е изд. испр. и доп. Москва: КДУ, 2017. 290 с.
- Ковда В.А. Генезис и география подзолистых почв Западной Сибири // Почвоведение. 1963. № 7. С. 25–37.
- Роде А.А. Почвы Западной Сибири. Москва: Издательство Академии наук СССР, 1957. 320 с.
- Середина В.П., Андреева Т.А., Алексеева Т.П., Бурмистрова Т.И., Терещенко Н.Н. Нефтезагрязнённые почвы: свойства и рекультивация. Томск: НИ ТПУ, 2006. 270 с.
- Середина В.П., Колесникова Е.В., Кондыков В.А., Непотребный А.И., Огнев С.А. Особенности влияния нефтяного загрязнения на почвы средней тайги Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2017. № 5. С. 108–112. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-5-108-112>
- Солнцева Н.П. Эволюционные тренды почв в зоне техногенеза // Почвоведение. 2002. № 1. С. 9–16.

Фоминых Д.Е. Техногенное засоление почв как геоэкологический фактор при разработке нефтяных месторождений Среднего Приобья. Диссертация ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2013. 165 с.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Capra G.F., Ganga A., Grilli E., Vacca S., Buondonno A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 15. P. 1602–1618. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1110-x>

Nosova M.V., Seredina V.P., Rybin A.S., 2020. Ecological State of Technogeneous Saline Soil of Oil-Contaminated Alluvial Ecosystems and Their Remediation Techniques // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 921. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/921/1/012018>

Nosova M.V., Seredina V.P., Fedorchuk I.M. Transformation features of the main physicochemical and physical parameters of oil-contaminated alluvial soils in humid soil formation environment (Western Siberia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. 052029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/5/052029>

Wiens J.A. Oil in the environment: legacies and lessons of the Exxon Valdez oil spill. United Kingdom: Press Cambridge University, 2013. 482 p.

IUSS Working Group WRB. 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.

Поступила в редакцию 14.10.2024

Принята 27.11.2024

Опубликована 04.12.2024

#### Сведения об авторах:

**Носова Мария Владимировна** – кандидат биологических наук, ведущий инженер отдела оценки воздействия на окружающую среду АО «ТомскНИПИнефть» (г. Томск, Россия); [NosovaMV@tomsknipi.ru](mailto:NosovaMV@tomsknipi.ru)

**Середина Валентина Петровна** – доктор биологических наук, профессор кафедры почвоведения и экологии почв ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск, Россия); [seredina\\_v@mail.ru](mailto:seredina_v@mail.ru)

**Стоббуник Сергей Анатольевич** – главный специалист Управления экологии АО «ТомскНИПИнефть» (г. Томск, Россия); [NosovaMV@tomsknipi.ru](mailto:NosovaMV@tomsknipi.ru)

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## Technogenic salinization of podzolic and alluvial soils of the middle taiga subzone of West Siberia

© 2024 M. V. Nosova <sup>1</sup>, V. P. Seredina <sup>2</sup>, S. A. Stobbunik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company «TomskNIPIneft», Mira Ave., 72, Tomsk, 634027, Russia. E-mail: [NosovaMV@tomsknipi.ru](mailto:NosovaMV@tomsknipi.ru)

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: [seredina\\_v@mail.ru](mailto:seredina_v@mail.ru)

**The aim of the study** was to identify the main trends and patterns of migration and accumulation of oil pollutants (petroleum products, easily soluble salts) in soils of the middle taiga subzone of West Siberia.

**Location and time of the study.** Soil geography and genesis were studied in 2019 and 2023 in the middle taiga subzone of West Siberia in the middle part of the Ob River in various elementary landscapes.

**Methods.** Oil compounds were determined in hexane extracts from soil using Fluorat-2 apparatus. The qualitative composition of salts was assessed in water extracts.

**Results.** Highly mineralized waters were found to have a more significant impact on the properties of podzolic and alluvial soils in West Siberia than the crude oil. Combined oil and salt pollution was accompanied by a high content of toxic salts in the root-inhabited horizons. The discharge of mineralized water during emergency spills under the conditions of waterlogged taiga landscapes in West Siberia led to the formation of technogenically salinized soils in areas where the natural development of salinization is impossible. Therefore, soil salinization in a humid climate can be considered a superimposed soil-forming process.



**Conclusions.** *The results allow assessing the ecological state of soils (their chemistry, degree of salinity, reserve of toxic salts) and develop proposals for the remediation of oil and salt contaminated soils. The combined effect of halogenesis and alkalization processes is not typical for humid soil formation zones, where natural processes of salinization and halogenesis are not developed due to excess moisture and flushing water regime. Technogenic salinization associated with oil production is often found in such regions and does not depend on climatic conditions. Due to the lack of industrial reclamation of soils subjected to technogenic salinization in the middle taiga subzone of West Siberia, the studies of soil ecology in the contaminated areas are one of the urgent tasks of soil science and ecology. At the same time, taking into account the nature of pollution, the chemistry of salinization and soils catenary positions in the landscape will allow adapting the reclamation methods of technogenically saline soils for a specific contaminated area, which will subsequently allow completing soil restoration during reclamation activities.*

**Keywords:** soils; combined oil and salt pollution; mineralized water; easily soluble salts; technogenic salinization; technogenic alkalization; salinity chemistry.

**How to cite:** Nosova M.V., Seredina V.P., Stovbunik S.A. Technogenic salinization of podzolic and alluvial soils of the middle taiga subzone in West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(4). e284. DOI: [10.31251/pos.v7i4.284](https://doi.org/10.31251/pos.v7i4.284) (in Russian with English abstract).

## REFERENCES

- Gennadiev A.N. Oil and the environment. *Lomonosov Geography Journal*. 2009. No. 6. P. 30–39. (in Russian).
- Zaidelman F.R. Soil reclamation. Textbook. 4th ed. corr. and additional. Moscow: KDU, 2017. 290 p. (in Russian).
- Kovda V.A. Genesis and geography of podzolic soils of Western Siberia. *Pochvovedenie*. 1963. No. 7. P. 25–37. (in Russian).
- Rode A.A. Soils of Western Siberia. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1957. 320 p. (in Russian).
- Seredina V.P., Andreeva T.A., Alekseeva T.P., Burmistrova T.I., Tereshchenko N.N. Oil-contaminated soils: properties and remediation. Tomsk: NI TPU, 2006. 270 p. (in Russian).
- Seredina V.P., Kolesnikova E.V., Kondykov V.A., Nepotrebny A.I., Ognev S.A. Peculiarities of oil pollution influence on soils of middle taiga in Western Siberia. *Oil Industry*. 2017. No. 5. P. 108–112. (in Russian). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-5-108-112>
- Solntseva N.P. Evolutionary trends of soils in the zone of technogenesis. *Pochvovedenie*. 2002. No. 1. P. 9–16. (in Russian).
- Fominykh D.E. Technogenic soil salinization as a geo-ecological factor in the development of oil fields in the Middle Ob region. Dissertation ... Cand. of Geological and Mineralogical Sci. Tomsk, 2013. 165 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Capra G.F., Ganga A., Grilli E., Vacca S., Buondonno A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. *Journal of Soils and Sediments*. 2015. Vol. 15. P. 1602–1618. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1110-x>
- Nosova M.V., Seredina V.P., Rybin A.S., 2020. Ecological State of Technogeneous Saline Soil of Oil-Contaminated Alluvial Ecosystems and Their Remediation Techniques. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 921. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/921/1/012018>
- Nosova M.V., Seredina V.P., Fedorchuk I.M. Transformation features of the main physicochemical and physical parameters of oil-contaminated alluvial soils in humid soil formation environment (Western Siberia). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. 052029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/5/052029>
- Wiens J.A. Oil in the environment: legacies and lessons of the Exxon Valdez oil spill. United Kingdom: Press Cambridge University, 2013. 482 p.
- IUSS Working Group WRB. 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.

Received 14 October 2024  
Accepted 27 November 2024  
Published 04 December 2024



**About the authors:**

**Maria V. Nosova** – Candidate of Biological Sciences, Leading Engineer of the Environmental Impact Assessment Department of TomskNIPIneft (Tomsk, Russia); [NosovaMV@tomsknipi.ru](mailto:NosovaMV@tomsknipi.ru)

**Valentina P. Seredina** – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Soil Science and Soil Ecology of the National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia); [seredina\\_v@mail.ru](mailto:seredina_v@mail.ru)

**Sergey A. Stovbunik** – Chief Specialist of the Ecology Department of TomskNIPIneft (Tomsk, Russia); [NosovaMV@tomsknipi.ru](mailto:NosovaMV@tomsknipi.ru)

*The authors read and approved the final manuscript*



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)