

УДК 504.064

ТРАНСФОРМАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННО ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ГУМИДНОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

М. В. Носова¹, В. П. Середина², С. А. Стовбунник¹

¹ Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа
(«ТомскНИПИнефть»)
634027, Томск, пр. Мира, 72

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: NosovaMV@tomsknipi.ru, nsmvsh@mail.ru, seredina_v@mail.ru, StovbunikSA@tomsknipi.ru

Поступила в редакцию 03.09.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2025 г.

Сопоставлены два типа засоления – минерализованными сеноманскими водами и подтоварными водами сырой нефти в различных зонах загрязнения (эпицентр, импактная зона, граница). Систематическое положение почв определяли по «Классификации и диагностике почв России» (Шишов и др., 2004) и «World Reference Base for Soil Resources» (IUSS..., 2022). Загрязненные почвы классифицируются как техногенно засоленные подзолистые почвы (Chloridictechnic Salictechnic Gleyic Podzol) и техногенно засоленные аллювиальные почвы (Salictechnic Chloridictechnic Technic Gleyic Fluvisol). Для выявления особенностей накопления солей при засолении минерализованными сеноманскими водами и подтоварными водами сырой нефти заложено два почвенных разреза (Р-1, Р-2 соответственно) в наиболее трансформированной зоне – эпицентре. Пробы отобраны по всей глубине почвенного профиля. В эпицентре, импактной зоне, на границе загрязнения также заложены ряд почвенных прикопок (П-1.1, П-1.2, П-1.3; П-2.1, П-2.2, П-2.3). Глубина отбора проб составила 0–10 и 10–30 см. В большинстве случаев нефтезагрязненные почвы характеризуются сульфатным типом засоления по анионному составу и натриевым типом засоления по катионному составу. Токсичные соли представлены NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂. Для техногенно засоленных почв характерны сульфатно-хлоридный и натриевый типы засоления. Токсичные соли представлены NaHCO₃, Na₂SO₄, MgCl₂. Степень засоления в обоих типах загрязнения варьирует в широких пределах: от слабой до сильной. В нефтезагрязненных почвах выявлено, что увеличение содержания нефтепродуктов находится в тесной связи с увеличением степени засоления почв на достоверно значимом уровне ($p < 0.05$). Предложен метод по восстановлению техногенно засоленных почв, основанный на мероприятиях, используемых в мелиоративной практике (обустройство системы дренажных траншей, канав; гипсование; внесение удобрений). Комплекс мероприятий целесообразно дополнять биологическим этапом рекультивации с использованием солетолерантной растительности. При добыче нефти в качестве химического реагента для повышения отдачи нефтяного пласта используется хлорорганические соединения. Хлорид-ион (основной компонент данных реагентов) также является доступным и хорошим растворителем, способным удалять парафиновые отложения в скважинах, а также обладает высокой миграционной способностью. В связи с этим именно данный ион был выбран основным показателем, характеризующим эффективность применяемых решений по рекультивации. В последующие годы проведен мониторинг содержания хлорид-ионов на различных участках (фоновом, экспериментальном и контрольном). Выявленные особенности изменения экологического состояния почв (развитие процесса техногенного галогенеза и процессов техногенного осолонцевания) целесообразно учитывать при проведении новых масштабных опытно-промышленных испытаний новых природоохранных мероприятий в среднетаежной подзоне Западной Сибири.

Ключевые слова: минерализованные сеноманские воды, подтоварные воды сырой нефти, легкорастворимые соли, техногенное осолонцевание, химизм засоления, опытно-промышленные испытания.

DOI: 10.15372/SJFS20250307

© Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А., 2025

ВВЕДЕНИЕ

В «Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 19 апреля 2017 года № 176 (2017), указано на необходимость обеспечения экологической безопасности производства, включая аварийные ситуации на экологически опасных объектах. При этом борьба с последствиями негативного изменения и ухудшения качества окружающей среды, необходимость принятия мер по очистке и оздоровлению нарушенных земель является одной из наиболее приоритетных задач. Решение данной проблемы осуществимо только с помощью сокращения площадей загрязненных земель. В настоящее время, нормативным документом, используемым при рекультивации загрязненных почв, является ГОСТ Р 57447-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами» (2017). Согласно положениям данного документа, восстановление загрязнённых земель возможно только при понимании механизмов трансформации почв под действием поллютантов, а также при внедрении новых, эффективных природоохранных мероприятий. Несмотря на значительное количество работ (Гаджиев, Овчинников, 1977; Солнцева, 1982, 1998; Пиковский, 1993; Пиковский и др., 2019; Pikovskiy et al., 2019; Аветов, Трофимов, 2000; Гольдберг и др., 2001; Середина и др., 2006, 2017), посвящённых исследованию влияния нефтяного загрязнения на свойства почв таёжных ландшафтов Западной Сибири, закономерности поведения минерализованных вод (подтоварных и сеноманских), а также их влияние на экологическое состояние почв практически не изучены. В том числе отсутствует комплексный способ очистки почв техногенного засоления в условиях средне-таёжной подзоны Западной Сибири.

Цель настоящего исследования – выявить тренды развития процесса техногенного галогенеза в почвах среднетаёжной подзоны Западной Сибири и оценить динамику изменения Cl-иона в ходе проведения рекультивационных мероприятий.

В задачи исследования входило:

1. Изучить воздействие нефтяного загрязнения, техногенного галогенеза на химическое состояние аллювиальных и подзолистых почв.
2. Выявить основные тренды и закономерности миграции и аккумуляции в почвах нефтяных

загрязнителей (нефтепродуктов, солей техногенного происхождения).

3. Сформировать методические рекомендации по рекультивации техногенно засоленных почв на основании существующих технических решений.

4. Провести опытно-промышленные испытания по авторской технологии рекультивации почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом данного исследования выступили почвы двух типов загрязнения. Очаги загрязнения возникли после порыва промысловых трубопроводов (нефтяное загрязнение) в центральной части поймы р. Обь и при аварийном отказе водовода высокого давления (загрязнение минерализованными водами) на водораздельной равнине левобережья р. Обь. На каждом участке заложено по 1 почвенному разрезу в эпицентре загрязнения и ряд почвенных прикопок в сопряженных зонах (импактная зона, граница загрязнения).

Пробы в загрязненных почвах отбирались в течение недели с момента аварийных разливов минерализованных вод (П-1.1, П-1.2, П-1.3) и нефти (П-2.1, П-2.2, П-2.3). Почвенные разрезы заложены спустя 2 мес после аварии (Р-1, Р-2). На участках загрязнения минерализованными водами (сеноманскими водами, Р-1) и подтоварными водами сырой нефти (Р-2) с целью ограничения площади распространения поллютантов были проведены работы по обвалованию контура загрязнения. С момента аварии до момента отбора проб поймы р. Обь не затопливалась, соответственно все мероприятия по ограничению миграции загрязнителей в сопряженные экосистемы были выполнены в полном объеме. Из-за невозможности дифференциации границ генетических горизонтов в почве, загрязненной углеводородами нефти (Р-2, П-2.1, П-2.2, П-2.3), пробы отбирались послойно.

Итоговый перечень исследованных почв выглядит следующим образом.

Хемозем техногенно засоленный по подзолистой иллювиально-железистой почве (Р-1, Chloridic technic Salic technic Gleyic Podzol). Профиль имел следующее морфологическое строение:

OT_{s,x} (0–7 см). Органогенный верхний слой с белой солевой коркой. Состоит из остатков травянистой растительности и мхов. Присутствует пылевидная россыпь солей. Мокрый, рыхлый, легкосуглинистый.

EL_{s,x} (7–27 см). Элювиальный горизонт, светло-серый, с буроватым оттенком. Наблюдаются белесые отложения солей. Рыхлый, легкосуглинистый, с единичными корнями.

BE_{L_{Fe,s,x}} (27–50 см). Буровато-охристый горизонт с включениями оксидов железа, серых пятен органического вещества и накоплением солей по граням структурных отдельностей. Ореховатая структура, легкосуглинистый.

BT_{1_{Fe,s,x}} (50–70 см). Охристо-бурый горизонт с включениями оксидов железа, наблюдаются белесые налеты солей. Среднесуглинистый, плотный, ореховатой структуры.

BT_{2_{Fe,s,x}} (70–90 см). Охристо-бурый горизонт с включениями оксидов железа, наблюдаются белесые налеты солей. Среднесуглинистый, плотный, ореховатой структуры.

BT_{3_{Fe,s,x}} (90–110 см). Светло-бурый слой с включениями оксидов железа, остатками органического вещества и выраженным засолением хлоридно-натриевого и сульфатного типа. Среднесуглинистый, более плотный, ореховатой структуры.

BC_{Fe,s,x} (110–136 см). Буроватый супесчаный горизонт с сероватым оттенком. Бесструктурный, рыхлый, с остаточными пылевидными отложениями солей.

Почвенный разрез заложен в эпицентре загрязнения, отбор проб проводился из генетических горизонтов по всей глубине почвенного профиля до грунтовых вод ($n = 8$).

Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве (P-2, Salictechnic Chloridotechnic Technic Gleyic Fluvisol). Профиль имел следующее морфологическое строение:

1–10 см. Однородный, темно-серый, почти черный. Бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, мокрый, уплотненный. Присутствуют глыбистые агрегаты (3.5–5 см) с маслянистыми пленками, битумная корка на поверхности почвы, сильный запах нефти, корни растительных остатков.

10–20 см. Однородный, темно-серый, почти черный. Бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный. Присутствуют глыбистые агрегаты (3.5–5 см), пропитан нефтью с сильным запахом.

20–40 см. Неоднородный, темно-серый, с буроватым оттенком. Бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный. Степень загрязнения ниже, чем в верхних горизонтах.

40–60 см. Темно-серый, с охристыми и сизыми пятнами оглеения. Бесструктурный, тяжелосуглинистый, влажный, уплотненный. Загрязнение определяется визуально и по запаху.

60–80 см. Темно-палево-бурый, с охристыми и сизыми пятнами оглеения. Бесструктурный, тяжелосуглинистый, с глыбистыми агрегатами (до 3 см). Загрязнение определяется визуально и по запаху.

80–100 см. Темно-палевый, с охристыми и сизыми пятнами оглеения. Бесструктурный, среднесуглини-

стый, влажный, уплотненный. Загрязнение заметно визуально и по запаху.

Пробы отобраны в эпицентре загрязнения из генетических горизонтов почв по всей глубине почвенного профиля до видимых признаков загрязнения ($n = 6$).

Хемоземы техногенно засоленные по подзолистой иллювиально-железистой мелкоосветленной легкосуглинистой почве (Chloridotechnic Salictechnic Gleyic Podzol). Профиль имел следующее морфологическое строение:

OT_{s,x} (0–10 см). Органогенный верхний слой с белесой солевой коркой. Состоит из остатков травянистой растительности и мхов. Присутствует пылевидная россыпь солей. Мокрый, рыхлый, легкосуглинистый.

EL_{s,x} (10–30 см). Элювиальный горизонт, светло-серый, с буроватым оттенком. Наблюдаются белесые отложения солей. Рыхлый, легкосуглинистый, с единичными корнями.

Почвенные прикопки отобраны до глубины 30 см, в эпицентре (П-1.1, $n = 20$), импактной зоне загрязнения (П-1.2, $n = 20$) и на границе (П-1.3, $n = 20$).

Хемоземы нефтезагрязненные по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве (Salictechnic Chloridotechnic Technic Gleyic Fluvisol). Профиль имел следующее морфологическое строение:

1–10 см. Однородный, темно-серый, почти черный. Бесструктурный, с цементированными глыбистыми включениями, с маслянистыми пленками на гранях агрегатов, тяжелосуглинистый, на поверхности присутствует битумная корка, вязкий, мокрый, уплотнен, разномышленные корни растительных остатков, встречаются глыбистые агрегаты (d 3.5–5 см), пропитан нефтью с характерным сильным запахом, переход по окраске и структуре незаметен, границы не дифференцируются.

10–30 см. Однородный, темно-серый, почти черный. Бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотнен, присутствуют корни растительных остатков, встречаются глыбистые агрегаты (d 3.5–5 см), пропитан нефтью с характерным сильным запахом, переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.

Пробы почв отобраны до глубины 30 см, в эпицентре (П-2.1, $n = 20$), импактной зоне загрязнения (П-2.2, $n = 20$) и на границе (П-2.3, $n = 20$).

Эффективность предлагаемых мероприятий по постепенному рассолению почв подтверждается результатами локальных опытно-промышленных испытаний. В качестве объекта исследования выбран техногенно засоленный участок

Таблица 1. Объекты исследования

Наименование почвы/участка	Зона загрязнения	Вид загрязнения	Цель
Установление трендов техногенных трансформации при нефтяном загрязнении и техногенном засолении			
Хемозем техногенно засоленный по подзолистой иллювиально-железистой почве (Chloridictechnic Salictechnic Gleyic Podzol)	Эпицентр (P-1)	Техногенное засоление	Изучение качественного и количественного распределение солей в различных зонах загрязнения
Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне-мелкой почве (Salictechnic Chloridictechnic Technic Gleyic Fluvisol)	Эпицентр (P-2)	Нефтяное загрязнение	
Прикопки хемозема техногенно засоленного по подзолистой иллювиально-железистой мелко осветленной легкосуглинистой почве (Chloridictechnic Salictechnic Gleyic Podzol)	Эпицентр (П-1.1)	Техногенное засоление	
	Импактная зона загрязнения (П-1.2)		
	Граница загрязнения (П-1.3)		
Прикопки хемозема нефтезагрязненного по аллювиальной серогумусовой типично-глееватой средне- мелкой почве (Salictechnic Chloridictechnic Technic Gleyic Fluvisol)	Эпицентр (П-2.1)	Нефтяное загрязнение	
	Импактная зона загрязнения (П-2.2)		
	Граница загрязнения (П-2.3)		
Опытно-промышленные испытания авторской технологии ремедиации почв			
Эксперимент 1	Объединенная проба	Техногенное засоление	Изучение рассоления почв при применении авторской технологии рекультивации
Контроль 1	» »	То же	Изучение естественного рассоления почв на техногенно засоленном участке без рекультивации
Фон 1	» »	Загрязнение отсутствует	Оценка фонового уровня засоления для определения допустимых концентраций солей

площадью 0.6 га (Эксперимент 1), находящийся на водораздельном пространстве р. Обь. На данном участке был проведен полный комплекс по рекультивации почв по авторской технологии.

В качестве контроля выбран техногенно засоленный участок площадью 0.24 га (Контроль 1), находящийся на водораздельном пространстве р. Обь. Рекультивационные мероприятия на данном участке не проводились. На участке выполнен комплекс первичных мероприятий по ликвидации последствий аварийных разливов сеноманских вод – обустроено обвалование.

Фоном выступила подзолистая иллювиально-железистая почва, формирующаяся на наиболее дренированной поверхности под темнохвойными лесами с зеленомошным наземным покровом (Фон 1).

Таким образом, объектами исследования выступили различные почвы (табл. 1).

При выборе контрольного и фоновое участков соблюдалось требование максимальной однородности факторов почвообразования – почвообразующих пород, элементов рельефа и характера растительности.

В рамках исследования проводились поиск и анализ научно-технической, нормативно-правовой документации по методам рекультивации техногенно засоленных почв (Широкова и др., 2007; Фоминых, 2013; Мустафаев и др., 2015). Нефтепродукты в почве определялись флуориметрическим методом (ПНД Ф 16.1: 2.21-98). Установление содержания и состава солей выполнены методом водной вытяжки в соответствии с требованиями государственных стан-

дартов – ГОСТ 26423-85 (1985), ГОСТ 26424-85 (1985), ГОСТ 26425-85 (1985), ГОСТ 26426-85 (1985), ГОСТ 26427-85 (1985), ГОСТ 26428-85 (1985). В связи с отсутствием утвержденного СанПин, степень засоления оценивалась с помощью классификации Ф. Р. Зайделямана (2017). На основании собранного массива данных был проведен сравнительный статистический анализ. Проверка на нормальность распределения признаков проводилась с помощью критерия Шапиро – Уилка (Shapiro – Wilk Normality Test), а также с помощью гистограмм. Признаки имели нормальное распределение, в расчете использованы параметрические методы исследования (коэффициент корреляции Пирсона между содержанием нефтепродуктов и солей).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поступление высокоминерализованных вод и нефтепродуктов приводит к формированию сложных ореолов загрязнения. По качественной реакции на наличие легкорастворимых солей установлено, что подтоварные воды сырой нефти и высокоминерализованные сеноманские воды, используемые при извлечении нефти, это источники засоления в рассмотренных техногенно загрязненных почвах. Данное исследование уже представлено в ранее опубликованных работах (Носова, 2024). Для повышения однородности выборки всю совокупность полученных данных поделили на две группы: в первую группу вошли данные лабораторных анализов образцов почв, загрязненных минерализованными сеноманскими водами (Р-1, П-1.1, П-1.2, П-1.3); во вторую группу – образцы почв, загрязненных подтоварными водами сырой нефти (Р-2, П-2.1, П-2.2, П-2.3) (табл. 2).

В почвенном профиле отмечается вынос ионов Cl^- и Na^+ при слабой миграции других солей, что свидетельствует о прогрессивном засолении нижних горизонтов почв, а также об остаточном засолении корнеобитаемых горизонтов.

Тип химизма в техногенно засоленной почве сульфатно-хлоридный натриевый, что характерно для загрязнения минерализованными сеноманскими водами. Концентрация всех солей, в особенности Cl^- и Na^+ , с глубиной возрастает и снижается от эпицентра разлива к его периферии (импактная зона, граница загрязнения). Хлорид-ион занимает доминирующие положение среди прочих анионов. Его доля в мигра-

ционных потоках составляет около 80 %, доля натрий-ионов – практически 95 %.

Стоит отметить, что согласно внутренним регламентам нефтедобывающих компаний, а также в ходе государственных проверок нарушенных земель, проводимых органами госнадзора, при аварийных разливах обычно проводят мониторинг исключительно хлорид-ионов. В хемоземах по подзолистой почве токсичные техногенные соли представлены NaHCO_3 , Na_2SO_4 , MgCl_2 .

Хемоземы по подзолистой почве (Р-1) отличаются сильной степенью засоления (рис. 1).

Хемоземы по аллювиальной почве (Р-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 плотного остатка и нефтяными углеводородами ($R = 0.9$ (на глубине 0–10 см) и 0.86 (на глубине 10–30 см), $p = 0.05$). Солевой профиль хемозема нефтезагрязненного представлен на рис. 2.

В отличие от хемоземов по подзолистой почве, в хемоземах по аллювиальной почве концентрация солей достигает максимума в поверхностном, корнеобитаемом, слое и остается постоянной по всей глубине в эпицентре загрязнения. Такой эффект может быть связан с миграцией солей до горизонтов тяжелого гранулометрического состава (на глубине 60 см), а также прогрессирующим засолением почв вместе с подъемом грунтовых вод, которые равномерно распределяют соли по всему почвенному профилю. Токсичные соли представлены NaCl , Na_2SO_4 , MgCl_2 .

Таким образом, привнесенные вместе с минерализованными потоками техногенные соли создают токсичную среду для роста и развития растений не только в корнеобитаемом горизонте, но и по всему профилю почв в отдельных горизонтах соленакопления.

Процесс техногенного засоления сопровождается ответными реакциями, обусловленными техногенным осолонцеванием – внедрением Na^+ в почвенно-поглощающий комплекс почв. Степень и характер проявления солонцеватости в верхних горизонтах техногенно засоленных почв выражен в большей степени (табл. 2).

Специфическая особенность состава обменных катионов для почв обоих типов загрязнения – появление в почвенно-поглощающем ком-

Таблица 2. Тип засоления почв различных зон загрязнения

Плотный остаток, %	Степень засоления	Тип засоления		Обменный Na ⁺ от ЕКО, %	Содержание НП, г/100 г почвы	pH _{вод}	Токсичные соли
		Анионный состав	Катионный состав				
Загрязнения минерализованными сеноманскими водами							
Э п и ц е н т р з а г р я з н е н и я							
Глубина 0–10 см, Р-1, горизонт соленакопления							
1.58	Сильная	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	14.54	Менее 2.5	7.45	NaHCO ₃ , Na ₂ SO ₄ , MgCl ₂
Глубина 0–10 см, П-1.1, n = 20							
$\frac{1.58-1.66}{1.22}$	Сильная	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	11.6–15.91	Менее 2.5	6.26–7.28	NaHCO ₃ , Na ₂ SO ₄ , MgCl ₂
Глубина 10–30 см, П-1.1, n = 20							
$\frac{0.58-0.88}{0.76}$	От средней до слабой	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	9.39–10.32	Менее 2.5	6.32–6.81	–
И м п а к т н а я з о н а з а г р я з н е н и я							
Глубина 0–10 см, П-1.2, n = 20							
$\frac{0.34-1.68}{0.74}$	От сильной до слабой	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	7.2–7.61	Менее 2.5	6.04–6.73	MgCl ₂
Глубина 10–30 см, П-1.2, n = 20							
$\frac{0.30-0.84}{0.46}$	От средней до слабой	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	4.52–6.57	Менее 2.5	5.94–6.39	–
Г р а н и ц а з а г р я з н е н и я							
Глубина 0–10 см, П-1.3, n = 20							
$\frac{0.3-0.45}{0.6}$	Слабая	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	3.82–6.24	Менее 2.5	6.01-6.61	–
Глубина 10–30 см, П-1.3, n = 20							
$\frac{0.33-10.3}{0.3}$	От средней до слабой	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	3.57–4.96	Менее 2.5	5.44-6.19	–
Загрязнения подтоварными водами сырой нефти							
Э п и ц е н т р з а г р я з н е н и я							
Глубина 0–10 см, Р-2, горизонт соленакопления							
0.35	Сильная	Сульфатно-хлоридный	Натриевый	11.01	16.23	7.82	NaCl, Na ₂ SO ₄ , MgCl ₂
Глубина 0–10 см, П-1.2, n = 20							
$\frac{0.35-1.57}{0.95}$	От средней до сильной	Сульфатный	Натриевый	10.72–2.83	$\frac{46.23-72.26}{68.01}$	7.6–8.5	NaCl, Na ₂ SO ₄ , MgCl ₂
Глубина 10–30 см, П-1.2, n = 20							
$\frac{0.45-1.15}{0.49}$	От слабой до средней	Сульфатный	Натриевый	7.39–8.02	$\frac{11.82-65.61}{49.85}$	6.9–8.4	NaCl, Na ₂ SO ₄ , MgCl ₂
И м п а к т н а я з о н а з а г р я з н е н и я							
Глубина 0–10 см, П-2.2, n = 20							
$\frac{0.45-0.55}{0.44}$	От слабой до средней	Сульфатный	Натриевый	4.61–6.61	$\frac{11.53-68.12}{51.12}$	6.3–7.5	Na ₂ SO ₄ , MgCl ₂
Глубина 10–30 см, П-2.2, n = 20							
$\frac{0.3-0.75}{0.34}$	От слабой до средней	Сульфатный	Натриевый	4.54–5.07	$\frac{4.39-50.23}{42.44}$	5.9–6.6	–
Г р а н и ц а з а г р я з н е н и я							
Глубина 0–10 см, П-2.3, n = 20							
$\frac{0.3-0.45}{0.36}$	Слабая	Сульфатный	Натриевый	1.8–1.7	$\frac{4.41-13.74}{12.96}$	6.1–6.4	–
Глубина 10–30 см, П-2.3, n = 20							
$\frac{0.15-0.44}{0.24}$	От слабой до незасоленной	Сульфатный	Натриевый	1.08–0.98	$\frac{3.98-7.08}{5.05}$	5.4–6.6	–

Примечание. ЕКО – емкость катионного обмена.

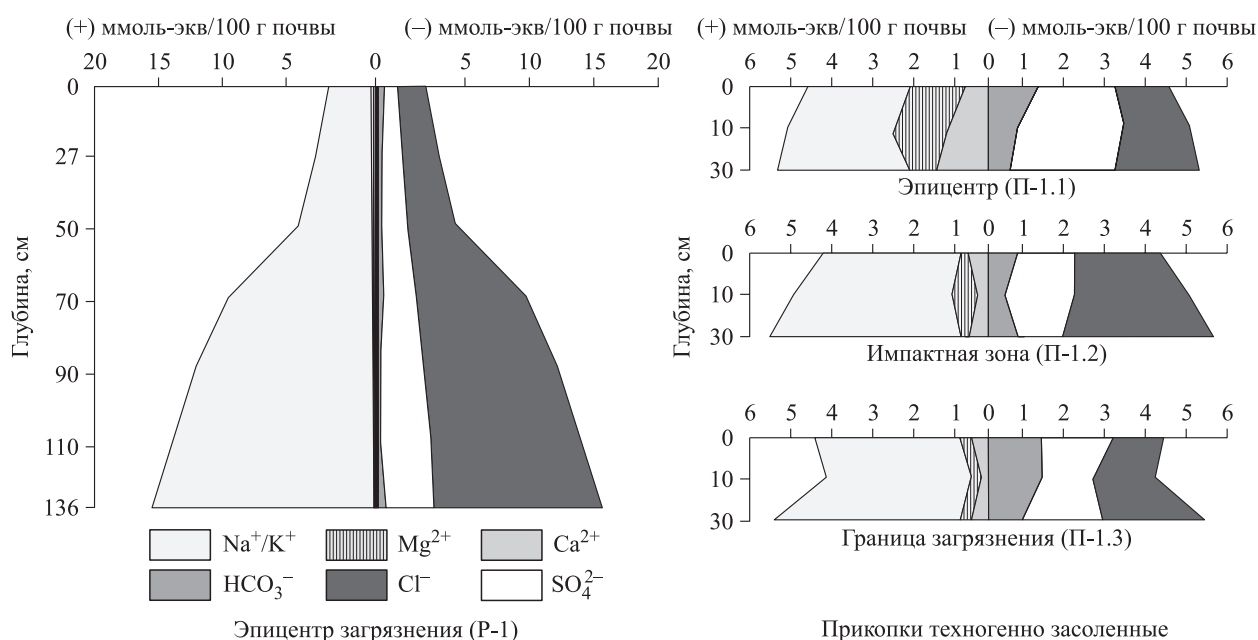


Рис. 1. Распределение солей в техногенно засоленных почвах.

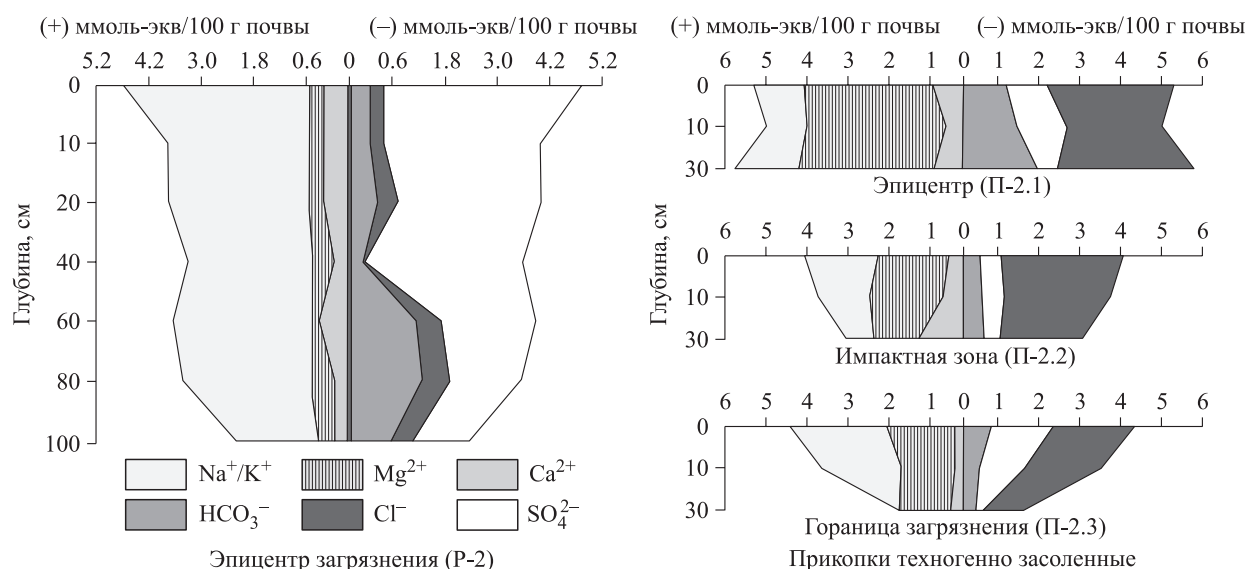


Рис. 2. Распределение солей в нефтезагрязненных почвах.

плексе (ППК), наряду с обменными катионами Ca^{2+} и Mg^{2+} , обменного Na^+ , наличие которого не характерно для почв гумидного почвообразования. Содержание Ca^{2+} , Na^+ значительно ниже содержания магния, хотя их распределение по почвенным горизонтам аналогично и подчиняется одной закономерности: уменьшается с глубиной. Таким образом, в результате действия нефтепродуктов изменяется соотношение поглощенных катионов в составе ППК. Корреляционная связь между Ca^{2+} и НП ослабевает от эпицентра к границе загрязнения ($R = 0.66, 0.49, 0.38$). Более сильная связь формируется между содержанием Mg^{2+} и НП ($R = 0.76, 0.73,$

0.69). При этом во всех зонах загрязнения в слое 0–10 см наблюдается тесная корреляционная связь ($R = 0.93, 0.78, 0.83$) между содержанием НП и обменным Na^+ .

В условиях гумидного почвообразования для почв характерен ирригационный водный режим, что препятствует развитию процессов техногенного галогенеза и осолонцевания. Однако при этом происходит трансформация состава обменных катионов поверхностных горизонтов в сторону накопления обменного натрия (Na^+) за счет вытеснения части обменного кальция. При отсутствии дренажа или неэффективной его работе промывной ирригационный режим может

приводить к подъему грунтовых вод выше критического уровня, создавая предпосылки для развития вторичного осолонцевания и засоления почв.

Таким образом, в почвах обоих типов загрязнения зафиксировано два наиболее ярких тренда – развитие процесса техногенного галогенеза и процесса техногенного осолонцевания. Очевидна необходимость последовательной очистки таких почв от засоления путем проведения рекультивационных работ. Предложенные в научной литературе (Широкова и др., 2007; Фоминых, 2013; Мустафаев и др., 2015; Зайдельман, 2017) методы восстановления почв засоленного ряда включают себя ряд мероприятий: промывкой почв пресной водой, гипсованием, выемкой загрязненных грунтов, внесением удобрений и посевом трав. Данные приемы в основном связаны с мелиорацией агрогенных почв, однако они также могут быть инструментом для рекультивации техногенно засоленных почв.

Главная задача проводимых опытно-промышленных испытаний – сбор доказательной базы по восстановлению почв с помощью мероприятий, используемых в мелиоративной практике. Комплекс проводимых этапов направлен на активизацию самовосстановительного потенциала почв в ее наиболее уязвимом и более продуктивном слое – корнеобитаемом горизонте (до 30 см).

Наблюдения за снижением степени засоления проводились относительно исходного состояния загрязненного участка, относительно контрольного участка, где мероприятия по рекультивации не проводились, а также по сравнению с фоновой почвой, отобранной на незагрязненном участке, находящемся за территорией месторождения. Дополнительно был организован мониторинг за восстановлением проективного покрытия почв. На контрольном участке проводились наблюдения за восстановлением проективного покрытия, отбор проб на содержание хлорид-ионов проведен трехкратно – в начале рекультивационных мероприятий на участке и после окончания проведения рекультивационных мероприятий (в первый и последний год мониторинга участка).

Работы по восстановлению техногенно засоленного участка велись в течение нескольких лет. Комплекс мероприятий постепенной очистки техногенно засоленных почв состоял из следующих этапов: устройство замкнутого дренажа с помощью системы траншей и последующее осушение участка (подготовительный этап, с 2010 до середины сентября 2011 гг.); механиз-

ированная обработка почв с последующим гипсованием, фрезерованием и внесением гипсовых удобрений (технический этап, конец сентября 2011–2012 гг.); внесение минеральных удобрений с фиторемедиацией участка аборигенной солетолерантной растительностью (биологический этап, с 2012–2013 гг.). В последующие годы был организован мониторинг с отбором проб (2014–2023 гг.). Содержание солей на контрольном и на фоновом участках представлена на рис. 3.

В условиях проводимого эксперимента установлено следующее. Основная масса солей вымывается из почв во время подготовительного этапа за счет обустройства по всей площади загрязненного участка системы дренажных траншей. Вымывание происходит в перехватывающую дренажную канаву, обустроенную по контуру загрязненного участка, куда поступают засоленные промывочные воды. Механизм рассоления почв базируется на процессе естественного вымывания солей из почвенного профиля дождевыми и талыми водами без дополнительного подвоза пресных вод. Откачка засоленных вод происходила в ассенизаторские машины с последующим вывозом собранной воды на объекты подготовки нефти. Переход к следующему этапу осуществлялся после достижения устойчивых концентраций, т. е. тех концентраций, при которых рассоления участка за счет миграции легкорастворимых солей не происходит. В рамках данного эксперимента переход к техническому этапу осуществлен при достижении концентраций ~ 861 ммоль-экв/100 г почвы на июнь 2011 г. и ~ 884 ммоль-экв/100 г почвы на сентябрь 2011 г. После окончания подготовительного этапа участок был осушен, а система, состоящая из траншей и дренажной канавы, спланирована в единую плоскость.

Для восстановления исходного $pH_{\text{вод}}$ и устранения остаточного действия солей проведена механизированная обработка почв (технический этап). Комплекс проводится последовательно: фрезерование осушенных площадей с внесением гипса, рыхление в защитных зонах и повторное гипсование. Выполнение данных действий позволило снизить концентрацию хлорид-ионов с ~ 884 ммоль-экв/100 г почвы на сентябрь 2011 г. до ~ 159 ммоль-экв/100 г почвы на июнь 2013 г.

В ходе биологического этапа совместно с минеральными удобрениями в почву внесены семена солетолерантной растительности (овсяница луговая ~ 55 %, полынь обыкновенная ~ 15 %,



Рис. 3. Содержание хлорид-ионов в почвах при проведении опытно-промышленных испытаний.

чина лесная ~ 15 %, клевер луговой ~ 15 %). Итоговый состав трав сформирован не только по материалам инженерно-экологических изысканий для данной территории, но и с учетом аборигенных, местных видов растений, встречающихся на территории проведения эксперимента.

При мониторинге участка установлено повышение содержания хлорид-ионов с ~ 159 до 281 ммоль-экв/100 г почвы в сентябре 2015 г., что связано с постепенной миграцией солей из нижней толщи почвы в корнеобитаемые горизонты. Данный процесс можно оценивать как положительный эффект от проведения рекультивационных мероприятий: в почве активизировались процессы естественного самовосстановления и рассоления глубинных горизонтов.

В последующие годы наблюдается активное снижение концентрации хлорид-ионов и постепенное восстановление проективного покрытия почв. В 2023 г. площадь зарастания участка местной растительностью достигла примерно 90 %, а концентрации хлорид-ионов составила ~ 1 ммоль-экв/100 г почвы, что сопоставимо с количеством солей (~ 0.01 ммоль-экв/100 г почвы) на фоновом участке. На контрольном участке количество солей составляет ~ 4000 ммоль-экв/100 г почвы, а на поверхности почвы присутствуют выцветы солей.

Таким образом, мероприятия по рекультивации техногенно загрязненных почв демонстрируют эффективное снижение концентрации хлорид-ионов и постепенное восстановление проективного покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для почв, загрязненных в процессе добычи нефти, характерно накопление солей, о чем свидетельствует количество плотного остатка в пределах ореола загрязнения (0.3–1.57 %), позволяющее отнести все загрязненные почвы к категории засоленных. Ведущую роль в процессе фракционирования солей играют ионы SO_4^{2-} и Na^+ (сульфатно-натриевый химизм засоления). В почвах, загрязненных минерализованными сеноманскими водами, максимум солей смещен до глубины 130 см, формируя за счет интенсивного выноса Cl^- и Na^+ горизонт соле-накопления (хлоридно-натриевый химизм засоления).

Опасность техногенного засоления связана с токсичностью солей для высших растений. В хемоземе нефтезагрязненном токсичные техногенные соли накапливаются преимущественно в корнеобитаемом горизонте и представлены NaCl , Na_2SO_4 , MgCl_2 , в хемоземах по

подзолистой почве – NaHCO_3 (только в образцах с $\text{pH} > 7.2$), Na_2SO_4 , MgCl_2 . Засоление в условиях гумидного климата является наложенным почвообразовательным процессом, формирующим пульсацией восходящих потоков грунтовых вод дополнительный риск развития в почвах техногенного галогенеза и вторичного засоления, т. е. явлений, не характерных для почв данной территории.

Наряду с процессами техногенного галогенеза в почвах протекают процессы техногенного осолонцевания. В нефтезагрязненных почвах данные процессы связаны с появлением обменного натрия в ППК, составляющего 1–13 % от ЕКО. Степень проявления солонцового процесса в техногенно засоленных почвах более выражена по сравнению с почвами, загрязненными сырой нефтью. Доля обменного натрия в ППК достигает практически 16 % от ЕКО.

Ремедиация таких почв может быть проведена различными мелиоративными методами, адаптированными к условиям гумидного почвообразования. Разработанные методические регламенты, а также проведенные опытно-промышленные испытания рекультивации почв, загрязненных техногенными солями, подтверждают, что предложенный комплекс ремедиации почв позволяеткратно снизить содержание хлорид-ионов в верхних горизонтах почв и восстановить растительный покров рекультивированной территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аветов Н. А., Трофимов С. Я. Особенности почвообразования и структура реки Большой Салым (Западная Сибирь) // Почвоведение. 2000. № 5. С. 500–547.
- Гаджиев И. М., Овчинников С. М. Почвы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 150 с.
- Гольдберг В. М., Зверев В. П., Арбузов А. И. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. М.: Недра, 2001. 94 с.
- ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. Дата введения 01.01.1986. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 8 с.
- ГОСТ 26424-85. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке. Дата введения 01.01.1986. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 4 с.
- ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке. Дата введения 01.01.1986. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 9 с.
- ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке. Дата введения 01.01.1986. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 7 с.
- ГОСТ 26427-85. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке. Дата введения 01.01.1986. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 4 с.
- ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке. Дата введения 01.01.1986. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 8 с.
- ГОСТ Р 57447-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Дата введения 12.01.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.
- Зайдельман Ф. Р. Мелиорация почв: учеб. 4-е изд., испр. и доп. М.: КДУ, 2017. 290 с.
- Мустафаев Ж. С., Козыкеева А. Т., Безбородов Ю. Г., Карлыханов Т. К., Абдашев К. Б. Технология промывки засоленных почв с учетом экологического ограничения // Проблемы управления водными и земельными ресурсами: Материалы междунар. науч. форума, Москва, 30 сент. 2015 г. М.: Рос. гос. агр. ун-т – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2015. Т. 2. С. 31–41.
- Носова М. В. Влияние нефтесолевого загрязнения на экологическое состояние почв поймы реки Оби в условиях среднетаежной подзоны Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук: 1.5.15. Томск: Нац. иссл. Том. гос. ун-т, 2024. 213 с.
- Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 206 с.
- Пиковский Ю. И., Смирнова М. А., Геннадиев А. Н., Завгородняя Ю. А., Жидкин А. П., Ковач Р. Г., Кошовский Т. С. Параметры нативного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307–1321.
- Середина В. П., Андреева Т. А., Алексеева Т. П., Бурмистрова Т. И., Терещенко Н. Н. Нефтезагрязненные почвы: свойства и рекультивация. Томск: Том. политех. ун-т, 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 // Нефт. хоз-во. 2017. № 5. С. 108–112.
- Солнцева Н. П. Геохимическая устойчивость природных систем к техногенным нагрузкам (принципы и методы изучения, критерии прогноза) // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С. 181–215.
- Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: МГУ, 1998. 376 с.
- Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176. М., 2017.
- Фоминых Д. Е. Техногенное засоление почв как геоэкологический фактор при разработке нефтяных месторождений Среднего Приобья: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36. Томск: Нац. иссл. Том. политех. ун-т, 2013. 22 с.
- Широкова Ю. И., Полуашова Г., Ражабов К., Кошеков Р. Эффективность промывных поливов // Исследования в сфере ирригации и дренажа: Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию со дня созд. Межгосударств. координац. водохозяйств. комис. Центр. Азии (МКВК), Алматы, Казахстан, 23–28 апр. 2007 г. Алматы, 2007. С. 1–14.

Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Int. Union Soil Sci. (IUSS). Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Pikovskiy Yu. I., Smirnova M. A., Gennadiev A. N., Zavgorodnyaya Yu. A., Zhidkin A. P., Kovach R. G., Koshovskii T. S. Parameters of the native hydrocarbon status of soils in different bioclimatic zones // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. Iss. 11. P. 1333–1346 (Original Rus. Text © Yu. I. Pikovskiy, M. A. Smirnova, A. N. Gennadiev, Yu. A. Zavgorodnyaya, A. P. Zhidkin, R. G. Kovach, T. S. Koshovskii, 2019, publ. in Pochvovedenie. 2019. N. 11. P. 1307–1321).

TRANSFORMATION CHANGES IN THE PROPERTIES OF TECHNOGENIC-SALINE SOILS UNDER CONDITIONS OF HUMID SOIL FORMATION IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE OF WESTERN SIBERIA

M. V. Nosova¹, V. P. Seredina², S. A. Stovbunik¹

¹ Tomsk Scientific Research and Projecting Institute of Oil and Gas (TomskNIPINEFT)
Prospekt Mira, 72, Tomsk, 634027 Russian Federation

² National Research Tomsk State University
Prospekt Lenina, 36, Tomsk, 634050 Russian Federation

E-mail: NosovaMV@tomsknpi.ru, nsmvsh@mail.ru, seredina_v@mail.ru, StovbunikSA@tomsknpi.ru

Two types of salinization are compared: mineralized Cenomanian waters and crude oil bottom waters in different pollution zones (epicenter, impact zone, boundary). The systematic position of soils was determined according to the Classification and Diagnostics of Soils of Russia (Shishov et al., 2004) and the World Reference Base for Soil Resources (IUSS..., 2022). Contaminated soils are classified as technogenically saline podzolic soils (*Chloridic technic Salic technic Gleyic Podzol*) and technogenically saline alluvial soils (*Salic technic Chloridic technic Technic Gleyic Fluvisol*). To identify the features of salt accumulation during salinization by mineralized Cenomanian waters and crude oil bottom waters, two soil profiles (P-1, P-2, respectively) were laid in the most transformed zone – the epicenter. Samples were taken along the entire depth of the soil profile. In the epicenter, impact zone, pollution boundary, a number of soil pits are also laid (P-1.1, P-1.2, P-1.3; P-2.1, P-2.2, P-2.3). The sampling depth was 0–10 cm and 10–30 cm. In most cases, oil-contaminated soils are characterized by the sulfate type of salinization with anionic composition and the sodium type of salinization with cationic composition. Toxic salts are represented by NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂. For technogenically saline soils, sulfate-chloride and sodium types of salinization are characteristic. Toxic salts are represented by NaHCO₃, Na₂SO₄, MgCl₂. The degree of salinization in both types of pollution varies widely: from weak to strong. In oil-contaminated soils, it was found that an increase in the content of oil products is closely related to an increase in the degree of soil salinization at a reliably significant level ($p < 0.05$). A method for restoring technogenically saline soils is proposed, based on measures used in melioration practice (arrangement of a system of drainage trenches, ditches; gypsum application; fertilization). It is advisable to supplement the set of measures with a biological stage of reclamation using salt-tolerant vegetation. In oil production, organochlorine compounds are used as a chemical reagent to increase the recovery of the oil reservoir. Chloride ion (the main component of these reagents) is also an available and good solvent capable of removing paraffin deposits in wells. In this regard, this ion was chosen as the main indicator characterizing the efficiency of the applied reclamation solutions. In subsequent years, monitoring of the dynamics of changes in the content of chloride ions in various areas (background, experimental and control) was carried out. The identified features of changes in the ecological state of soils (development of the process of technogenic halogenesis and processes of technogenic alkalization) should be taken into account when conducting new large-scale pilot industrial tests of new environmental protection measures in the middle taiga subzone of Western Siberia.

Keywords: mineralized Cenomanian waters, crude oil bottom waters, easily soluble salts, technogenic alkalization, salinization chemistry, pilot industrial tests.

How to cite: Nosova M. V., Seredina V. P., Stovbunik S. A. Transformation changes in the properties of technogenic-saline soils under conditions of humid soil formation in the middle taiga subzone of Western Siberia // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2025. N. 3. P. 64–74 (in Russian with English abstract and references).