



ГЕОЛОГИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 97–102

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 97–102

<https://geo.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-2-97-102>, EDN: OMWDII

Научная статья

УДК [504.5:55:622](98)(045)

О миграции нефтезагрязнений в деятельном слое и возможность их проникновения в многолетнемерзлые породы

М. Г. Губайдуллин, Т. А. Турובה 

Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17

Губайдуллин Марсель Галиуллинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, m.gubaidulin@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4413-4807>

Турובה Татьяна Александровна, аспирант, turobova.t@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5626-5807>

Аннотация. В статье дан анализ изученности проблемы миграции нефтезагрязнений в верхней части геологической среды в условиях Крайнего Севера, где перемещение нефтезагрязнений происходит преимущественно в слое сезонного промерзания и оттаивания криолитозоны. Рассмотрены факторы, влияющие на растекаемость и перенос нефти, в том числе акцентировано внимание на процессы формирования возможных миграционных путей в мерзлые породы. Был сделан вывод о том, что наибольшее влияние на характер и распределение нефтезагрязнений оказывают процессы оттаивания и промерзания деятельного слоя за счет вытеснения нефти из зоны промерзания в зону оттаивания. Сделано заключение о возможности проникновения нефтезагрязнения из загрязненного деятельного слоя в нижележащие многолетнемерзлые породы.

Ключевые слова: Крайний Север, разлив нефти, геологическая среда, миграция нефтезагрязнения, деятельный слой, многолетнемерзлые породы

Для цитирования: Губайдуллин М. Г., Турובה Т. А. О миграции нефтезагрязнений в деятельном слое и возможность их проникновения в многолетнемерзлые породы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 97–102. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-2-97-102>, EDN: OMWDII

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

On the migration of oil pollution in the active layer and the possibility of their penetration into permafrost

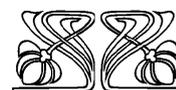
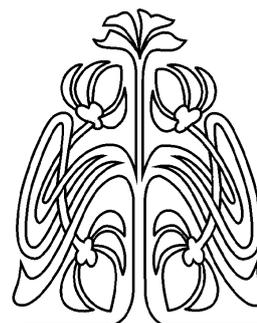
М. G. Gubaidullin, T. A. Turobova 

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, 17 Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk 163002, Russia

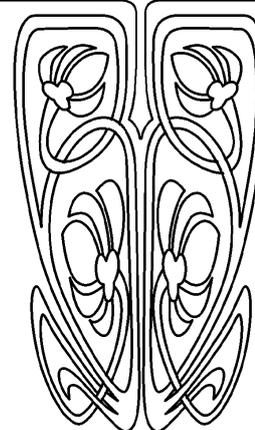
Marsel G. Gubaidulin, m.gubaidulin@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4413-4807>

Tatyana A. Turobova, turobova.t@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5626-5807>

Abstract. Based on the review of the published data, the article analyzes the study of the problem of oil pollution migration in the upper part of the geological environment in the conditions of the Far North, where the movement of oil pollution occurs mainly in the layer of seasonal freezing and thawing of the cryolithozone. The factors influencing the spreadability and transport of oil, including the focus on the processes of formation of possible migration routes into frozen rocks are considered. It was concluded that the processes of thawing and freezing of the active



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





layer due to the displacement of oil from the freezing zone into the thawing zone have the biggest impact on the nature and distribution of oil pollution. The conclusion is made about the possibility of penetration of oil pollution from the contaminated active layer into the underlying permafrost.

Keywords: Far North, oil spill, geological environment, oil pollution migration, active layer, permafrost

For citation: Gubaidullin M. G., Turobova T. A. On the migration of oil pollution in the active layer and the possibility of their penetration into permafrost. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 97–102 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-2-97-102>, EDN: OMWDI1

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Большая часть исследований по загрязнению почв углеводородами проводилась за пределами районов многолетней мерзлоты, в местах с положительными среднегодовыми температурами почвы [1, 2]. Основное внимание в этих исследованиях уделялось негативному влиянию разливов нефти на биоту, свойства почвы, а также на поверхностные и подземные воды.

За последние годы исследователями [3–5] были предприняты значительные усилия в понимании закономерностей миграции нефтезагрязнений в геологической среде, подверженной распространению многолетнемерзлых пород. Эти усилия основаны на желании лучше охарактеризовать их возможные последствия и подобрать наиболее эффективные методы санации последствий от разливов нефти.

Многолетняя мерзлота, надмерзлотные воды, тундра, устойчивые к холоду микроорганизмы, короткое лето, длительная и темная зима, низкие температуры воздуха и грунта, ежегодное замерзание и оттаивание деятельного слоя – вот лишь некоторые специфические экологические характеристики регионов Крайнего Севера. Их распространённость ограничивает практическое применение имеющихся методов восстановления и существенным образом отражается на миграции нефтезагрязнений, при этом механизмы будут отличаться от условий в умеренном климате [6].

Для выработки тактики реагирования на нештатные ситуации и подбора наиболее подходящих технологий очистки верхней части геологической среды (ГС) от нефтезагрязнений в условиях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) необходимо знать факторы, влияющие на техногенный поток и его распределение в горизонтальном и вертикальном направлениях криолитозоны. Понимание подвижности загрязняющих веществ (ЗВ) в этих средах становится актуальным, если учесть высокую стоимость проведения исследований и мероприятий по очистке арктических регионов [7]. Наряду с этим, имеющаяся неопределённость в отношении того, какие мероприятия по ликвидации нефтеразливов могут повысить мобильность ЗВ и деградацию экосистемы из-за нарушения хрупкого теплового баланса, вызывает дополнительные вопросы при подборе

способа санации нефтезагрязнённых территорий Крайнего Севера.

Цель настоящей статьи – сбор и анализ имеющейся информации о закономерностях миграции нефтезагрязнений в деятельном слое, а также рассмотрение вопроса о возможности проникновения нефтезагрязнителей в многолетнемерзлые породы.

Методы исследования

Сбор научной информации по изучаемой проблеме осуществлялся при помощи следующих поисковых систем и научных электронных библиотек: Google Scholar, ScienceDirect, eLIBRARY.RU, ЛАНЬ. В статье пристальное внимание уделялось научным статьям на английском и русском языках, опубликованных в изданиях с высоким импакт-фактором. Охват анализа с 1997 г. Поиск научных источников производился по следующим ключевым словам: миграция нефти, деятельный слой, многолетнемерзлые породы, биodeградация.

Поведение нефтезагрязнений в деятельном слое

Общепринято, что в деятельном слое (слое сезонного оттаивания и промерзания) скапливается наибольшее количество нефтезагрязнений, поэтому он является преобладающим местом биологической активности [6]. Деятельный слой подвергается сезонному промерзанию и оттаиванию в зависимости от времени года. Следовательно, распределение и размеры нефтяного загрязнения в арктических регионах напрямую зависят от того, в какое время года может произойти разлив нефти.

В периоды, когда деятельный слой замерзает, на миграцию нефти будет сильно влиять наличие льда в грунте, поэтому зимой нефтезагрязнение распространяется главным образом по поверхности снежного покрова или мерзлой почвы; при этом зимний разлив может охватить большую площадь поверхности, чем летний [8].

Летом боковое распределение вероятностного разлива нефти снижается за счет ее задержания растительным покровом. Инфильтрация атмосферного осадка может увеличить проникновение нефти в талые породы. Нефтяное загрязнение может распространяться в боковом направлении, когда оно проникает дальше в грунт и достигает поверхности мерзлых грунтов, насыщенных



льдом (поверх слоя многолетней мерзлоты). Стоит также добавить, что ЗВ могут накапливаться в зонах с повышенной глубиной оттаивания, где могут наблюдаться сезонные водонасыщенные зоны.

Распространение разливов нефти в районах с ММП в летних и зимних условиях с разными временными интервалами иллюстрирует рис. 1. В летнее время (см. рис. 1, а) нефть на поверхности оттаявшей почвы растекается и проникает в сезонно оттаявший слой, достигая верхней части мерзлоты. Нефть концентрируется на замерзшей поверхности, и начинает распространяться, накапливаясь в местных понижениях и через таликовые зоны. В этом случае появляется вероятность проникновения углеводородов в ММП [9].

Напротив, во время разлива, когда отсутствует сезонный слой оттаивания, нефть растекается только по поверхности мерзлой почвы (см. рис. 1, б). Просачивания нефтезагрязнения вниз, когда в холодные месяцы сезонно-талый слой отсутствует, не происходит. Только отдельные компоненты нефти все же могут проникать внутрь.

Миграция нефти в незамерзший грунт. В породах с плохим дренажом мощность деятельного слоя будет минимальной (от сантиметров

до 2,5 м), в зависимости от местных условий. Деятельный слой начинает оттаивать во время весеннего таяния снега и продолжает возрастать до достижения максимальной толщины в конце августа или сентябре [11]. По мере оттаивания деятельного слоя образуется водонасыщенный слой, мощность которого может достигать всей оттаявшей толщины. Из-за высокой водонасыщенности грунта и низкой относительной проницаемости для нефти ее нисходящий поток будет затруднен. При этом происходит увеличение потока через приповерхностный слой с частично разложившейся растительностью, который обычно присутствует во многих арктических экосистемах.

Результаты полевых исследований [11, 12], когда нефть попадала в незамерзший грунт, иллюстрируют, как высокое содержание воды в плохо дренированных почвах препятствует миграции нефти вниз. Однако даже в этих условиях нефть способна просочиться вниз через нижележащие минеральные породы. В районах больших скоплений нефти грунтовые воды будут вытесняться, и нефть будет переходить в породы с низким содержанием минеральных веществ. Кроме того, со временем нефть может мигрировать глубже в нижележащий горизонт по мере замерзания и оттаивания активного слоя.

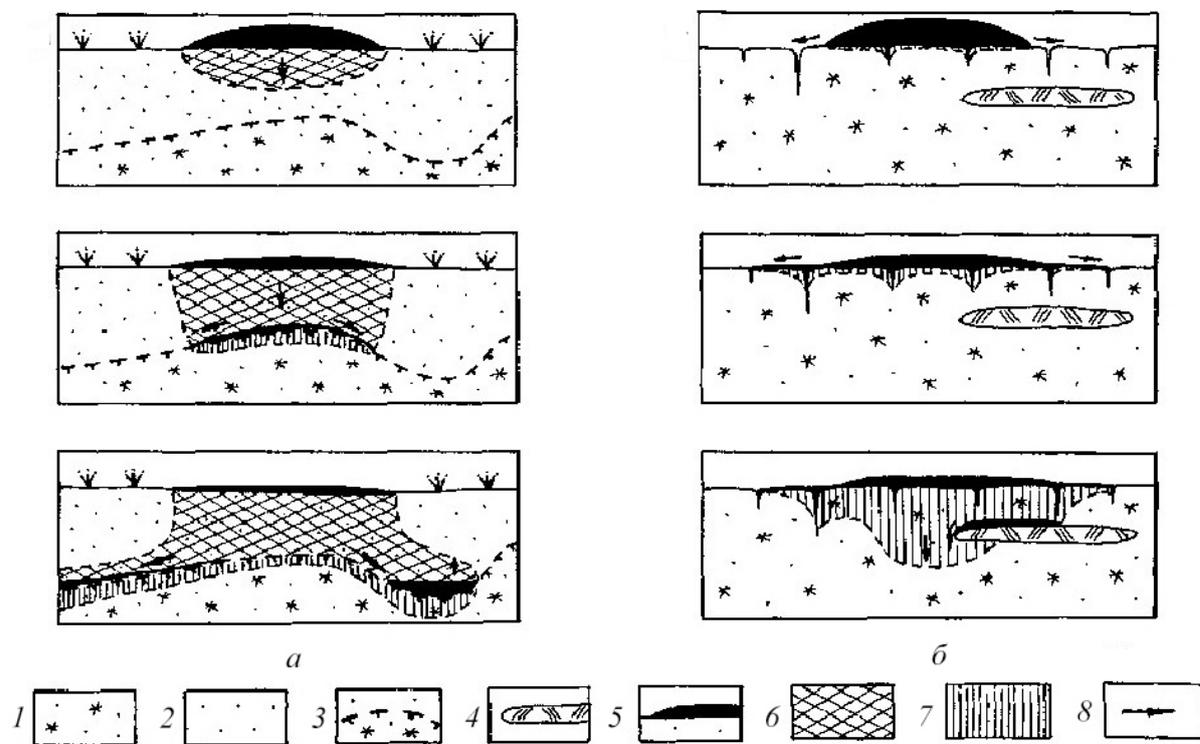


Рис. 1. Схема распределения нефтяного загрязнения в результате разлива в пределах зоны распространения многолетней мерзлоты [10]: а – с поверхности сезонно-талых грунтов в летнее время; б – с поверхности мерзлых грунтов в зимнее время; 1 – мерзлые грунты; 2 – незамерзшие грунты; 3 – граница талых и мерзлых грунтов; 4 – линза подземного льда; 5 – разлив нефти; 6 – загрязнение талых грунтов нефтью; 7 – загрязнение мерзлых грунтов нефтью; 8 – направление миграции нефти



Напротив, испытание с попаданием нефти на поверхность талых ненасыщенных водой грунтов показало возможность проникновения нефти в верхнюю часть линии замерзания или до уровня грунтовых вод [13]. В дальнейшем нефть перемещалась вниз по градиенту (вниз по уклону) через относительно тонкий горизонтальный слой проницаемых грунтов непосредственно над линией замерзания.

Колебания уровня грунтовых вод, цикличность замерзания и оттаивания, неоднородность состава пород, а также их проницаемость является существенными факторами распределения нефти в грунтах. Под воздействием этих факторов в деятельном слое с малой толщиной насыщенной зоны происходит формирование тонкой пленки нефти, характеризующейся сравнительно большей начальной подвижностью, что может привести к более интенсивному боковому распределению нефти.

Миграция нефти в промерзающий грунт
На миграцию нефти в результате ее попадания в мерзлые грунты значительное влияние оказывает содержащийся в грунте поровый лед, который будет действовать как твердое вещество, изменяя геометрию пор и, следовательно, капиллярность и проницаемость пород. Зависимость предельной нагрузки от температуры грунта показана на рис. 2. Эта зависимость обратно пропор-

циональна: чем выше температура, тем ниже прочность грунта, и наоборот.

Предельная нагрузка зависит также от влажности грунта и степени его заморозки, т. е. от температуры постоянного нахождения в среде. Грунты, находящиеся при более низкой температуре, подвержены в меньшей степени возможности потери своей устойчивости и разрушения от внешних нагрузок [14].

Лед оказывает существенное влияние на распределение нефти в мерзлых грунтах. Присутствующий в порах пород лед воздействует на пути техногенного потока, проходимого просачивающейся нефтью, что приводит к расширенному вертикальному распределению и, возможно, более глубокому проникновению по разрезу, поскольку нефть движется преимущественно по путям с относительно низким содержанием льда. В слоистых мерзлых грунтах будет развиваться сложное распределение нефти, поскольку просачивающаяся нефть сталкивается со слоями пород, насыщенными поровым льдом. Сегрегированный лед (ледяные линзы) образующийся в мелкозернистых породах, также повлияет на пути техногенного потока за счет создания эффекта непроницаемого барьера [12]. Во время оттаивания нефть, попадающая в мерзлую толщу, будет перераспределяться по мере изменения свойств пористой среды и уровня воды в резуль-

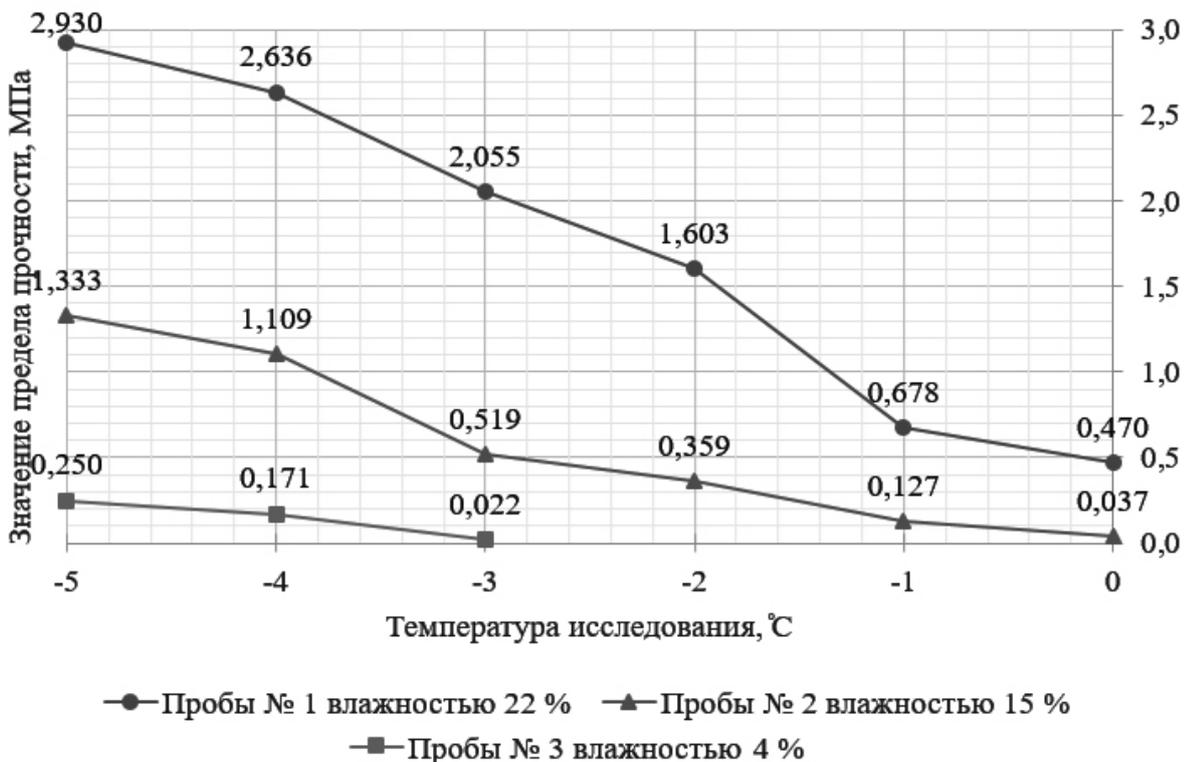


Рис. 2. Результаты исследования прочностных характеристик проб грунтов (сост. по: [14])



тате таяния льда и инфильтрации тающего снега и льда на земной поверхности

Влияние цикла промерзания-оттаивания на миграцию нефти. Как известно, промерзание-оттаивание сопровождаются структурообразующими процессами, которые приводят к изменению свойств пород, что, в свою очередь, влияет на перераспределение и трансформацию (фракционирование) нефти в верхней части геологической среды. Результаты экспериментальных исследований Е. М. Чувиллина с соавторами [12, 13] показали возможность криогенного вытеснения нефти из зоны замерзания в зону оттаивания промерзающих грунтов. Д. Барнс с соавторами [3, 4] отметили, что основной способ нисходящей нефтяной миграции в промерзающий грунт происходит за счет образования льда в поровом пространстве, в результате которого происходит удаление нефти из пор по мере заполнения пустоты льдом. Результирующего давления кристаллизации обычно достаточно для вытеснения нефти из-за неполярной природы жидкости, приводящей лишь к незначительному взаимодействию с минеральными частицами.

Распределение нефти в поровом пространстве, ее состав, начальное содержание в почвах и скорость замерзания – все это влияет на эффективность криогенного перемещения. Коэффициент вытеснения нефти, равный отношению вытесненной нефти к исходному ее содержанию, может быть использован для количественной оценки эффективности криогенного вытеснения [12] Частично можно предположить, что криогенное вытеснение связано с «криогенной метаморфизацией» нефти – отделением более подвижных углеводородных компонентов, например нафтенов. Однако данный процесс плохо изучен. В природе криогенное вытеснение может быть значительным фактором, способствующим продвижению нефти и ее дальнейшему рассеиванию.

Миграция нефтезагрязнения в ММП

До недавнего времени многолетнемерзлые породы было принято считать практически непроницаемым барьером как для минеральных, так и для органических загрязнителей [6]. Позднее было установлено, что наличие ненасыщенных пустот и трещин в мерзлых грунтах может способствовать миграции углеводородов из загрязненного деятельного слоя в нижележащие ММП [9]. Об этом свидетельствуют также результаты полевых и лабораторных исследований, которые показывают, что нефтяные загрязнители обладают достаточно высокой подвижностью в мерзлых грунтах, а это позволяет мигрировать им вертикально вниз [10, 13].

Полевые исследования нефтяных разливов в 1995–1996 гг. на территории канадской Арктики показали, что даже насыщенные льдом грунты

не в полной мере препятствуют миграции нефтезагрязнений [5]. В то же время отмечено, что ледяные шлиры препятствовали миграции, так как над ними наблюдалась высокая концентрация загрязняющих веществ. В качестве механизмов миграции нефтезагрязнений в данном исследовании предполагается диффузия водорастворимых компонентов нефти в пленках незамерзшей воды, а также их перенос по неоднородностям пород, заполненным воздухом. Возможность проникновения нефти в льдонасыщенные грунты (со степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой до 0,8 и выше) также была экспериментально показана в работе [11].

Нефтяные углеводороды были обнаружены в многолетней мерзлоте (по результатам [12] нефтяное загрязнение проникло в породы многолетней мерзлоты на глубину 70 см – глубина опробования), хотя миграция нефти в ММП обычно должна быть минимальной из-за высокой насыщенности мерзлых пород льдом. Присутствие нефтяных углеводородов объяснялось перемещением нефти в свободной фазе через соединенные воздушные пустоты в мерзлом грунте. Эти воздушные пустоты могут образовываться в результате трещин, возникающих в процессе термического сжатия.

Мерзлые мелкозернистые почвы могут содержать незамерзшую воду. При отсутствии путей для адвективного поступления нефти в богатую льдом многолетнюю мерзлоту возможным механизмом транспортировки является диффузия нефтяных углеводородов через незамерзшую воду. Диффузия в водной фазе является относительно медленным процессом переноса по сравнению с адвекцией. Вклад, который вносит этот транспортный механизм в перемещение загрязняющих веществ в многолетнемерзлые породы, скорее всего, минимален.

Результаты экспериментов подтвердили [10, 11], что нефтяные загрязнители все же могут проникать в мерзлые породы. Объем пор в мерзлых породах может не быть насыщенным льдом, и микротрещины, существующие в насыщенных льдом мерзлых грунтах, могут объяснить транспортировку и распространение углеводородов в ММП. Наличие объема пор, не заполненного льдом, может привести к проникновению нефти в мерзлую породу не только под действием гравитационных сил, но и под действием поверхностных сил минерального скелета [4].

То, что насыщенные льдом грунты не являются абсолютным непроницаемым барьером для проникновения нефти, было подтверждено также рядом лабораторных экспериментов [3] и полевыми исследованиями [12]. Было показано, что хотя наличие ледяных линз и порового льда является важным препятствием для переноса и распространения нефтяного загрязнения в мерзлых грунтах, миграция загрязняющих веществ не прерывается полностью. Перенос



загрязняющих веществ в насыщенных льдом грунтах, скорее всего, вызван наличием пленок незамерзшей воды на поверхности минеральных частиц и льда. Незамерзшая вода может быть средой для транспортировки водорастворимых компонентов нефти.

Заключение

Характер поведения и распределения нефтезагрязнения в арктических регионах зависит в первую очередь от сезона, в который произошёл разлив нефти. При этом миграционный путь нефтезагрязнения будет определяться свойствами слагающих геологический разрез пород (литологический состав, проницаемость, пористость, наличие льда), а также свойствами самой нефти (фракционный состав, температура застывания). Летом нисходящий поток нефти будет затруднен высокой насыщенностью деятельного слоя грунтовой водой. В зимние же месяцы из-за высокого содержания порового льда миграция нефти в сезонно промерзающий слой в большинстве случаев должна быть минимальной.

Следует добавить, что существенное влияние на распределение нефтезагрязнений оказывают процессы оттаивания и промерзания деятельного слоя. Здесь имеет место криогенное вытеснение нефти. Распределение нефти в поровом пространстве, ее состав, начальное содержание и скорость застывания – все это влияет на эффективность криогенного удаления нефти из зоны промерзания в зону оттаивания.

Кроме того, анализ опубликованных работ позволяет утверждать о возможности проникновения нефтезагрязнений из загрязненного деятельного слоя в нижележащие многолетнемерзлые породы. Это связано с диффузией компонентов нефти в поверхностных пленках частиц незамерзшей воды, а также с гравитационным течением через соединенные воздушные пустоты в мерзлом грунте. Эти воздушные пустоты могут образовываться в трещинах, возникающих в результате термического сжатия.

Библиографический список

1. Губайдуллин М. Г., Крайнева О. В. Оценка возможного загрязнения геологической среды нефтью с учетом ее свойств. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2015. 132 с.
2. Середин В. В. Оценка геоэкологических условий санации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродук-

тами. Пермь : Пермский государственный технический университет, 1998. 153 с.

3. Barnes D. L., Biggar K. W. Movement of petroleum through freezing and frozen soils // *Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Cold Regions*. 2008. Vol. 21. P. 55–68. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535956.004>
4. Barnes D. L., Chuvilin E. Migration of petroleum in Permafrost-Affected Regions // *Permafrost Soils*. 2009. Vol. 16. P. 263–278. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69371-0_18
5. Biggar K. W., Haidar S., Nahir M., Jarrett P. M. Site investigations of fuel spill migration into permafrost // *Journal of Cold Regions Engineering*. 1998. Vol. 12. P. 84–104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1998\)12:2\(84\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1998)12:2(84))
6. Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. Москва : Издательство Московского университета, 1998. 376 с
7. Губайдуллин М. Г., Макарский Н. А., Хамидов Б. Х. Методы защиты верхней части геологической среды на основе локального мониторинга при эксплуатации нефтяных месторождений Европейского Севера России. Архангельск : ИПЦ САФУ, 2013. 168 с.
8. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. Москва : ИНФРАМ, 2019. 207 с.
9. Chuvilin E. M., Miklyaeva E. S. An experimental investigation of the influence of salinity and cryogenic structure on the dispersion of oil and oil products in frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2002. Vol. 37, № 2. P. 89–95. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00063-6)
10. Chuvilin E. M., Naletova N. S., Miklyaeva E. S. Factors affecting spreadability and transportation of oil in regions of frozen ground // *Polar Record*. 2001. Vol. 37, № 202. P. 229–238. <https://doi.org/10.1017/S003224740002725X>
11. Collins C. M., Racine C. H., Walsh M. E. Fate and Effects of Crude Oil Spilled on Subarctic Permafrost Terrain in Interior Alaska: Fifteen Years Later // *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*. 1993. Vol. 93, № 13. P. 1–20.
12. Yershov E. D., Chuvilin E. M., Smirnova O. G., Naletova N. S. Interaction of oil with frozen soils // *Ground Freezing*. 1997. Vol. 97. P. 381–384.
13. William W. Mohn, Gordon R. Stewart. Limiting factors for hydrocarbon biodegradation at low temperature in Arctic soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2000. Vol. 32. P. 1161–1172. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00032-8)
14. Губайдуллин М. Г., Пашилов М. В. Анализ динамики изменения температурного режима верхней части многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяного месторождения на Европейском Севере России // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2018. № 1. С. 35–40.

Поступила в редакцию 20.02.2023; одобрена после рецензирования 04.03.2023; принята к публикации 13.03.2023
The article was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 04.03.2023; accepted for publication 13.03.2023