

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.340. + 631.4/665.6.

ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Е. М. Чувиллин, Е. С. Микляева*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, Россия*

** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
географический ф-т, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, Россия*

Представлены новые результаты исследования нефтяного загрязнения верхних горизонтов многолетнемерзлых пород (ММП) на опытной площадке в устье р. Печора (мыс Болванский), заложенной в 2000 г. Результаты опробования ММП показали, что через три года после начала полевого эксперимента нефтяное загрязнение фиксируется по всей глубине вскрытых многолетнемерзлых отложений (0,5–0,7 м). Концентрация его достигает 600–800 мг/кг, что сопоставимо с загрязнением слоя сезонного оттаивания. Полученные данные свидетельствуют, что шлировые криогенные текстуры мерзлых пород не препятствовали проникновению и накоплению углеводородных загрязнителей в ММП. На основе теоретических и экспериментальных исследований рассмотрены основные механизмы возможного проникновения нефтяного загрязнения в ММП.

Многолетнемерзлые породы, слой сезонного оттаивания, нефтяное загрязнение, концентрация нефтяного загрязнения, миграция углеводородного загрязнения, проницаемость мерзлых пород

FIELD EXPERIMENT: ESTIMATION OF OIL POLLUTION OF PERMAFROST UPPER LAYERS

E. M. Chuvilin, E. S. Miklyeva*

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, 119992, Moscow, Leninskie Gory, Russia

** Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119992, Moscow, Leninskie Gory, Russia*

In the present study we represent the new results of investigation of oil penetration in the upper horizons of permafrost on the testing bank (laid in 2000) in the entry of the river Pechora (Cape Bolvanskiy). The results of the permafrost sampling have shown that three years after the starting of the field experiment oil penetration was fixed throughout the depth of exposed permafrost (0,5–0,7 m). Its concentration reaches 600–800 mg/kg, which is comparable to the pollution of the layer of the seasonal defrostation. The received data have demonstrated that schlieren cryogenic textures of the frozen sediments did not inhibit the penetration and accumulation of hydrocarbon contaminants to the permafrost. Based on the theoretical and experimental data, the principal mechanisms of possible penetration of oil pollution into the permafrost have been considered.

Permafrost, active layer, oil contamination, concentration of oil pollution, migration of hydrocarbon contamination, permeability of frozen soils

ВВЕДЕНИЕ

Для Арктических регионов в последние десятилетия углеводородное загрязнение становится серьезной экологической проблемой в связи с широким хозяйственным освоением Севера и, прежде всего, развитием нефтедобывающего комплекса [Пиковский, 1993; Collins et al., 1993; Сомов, 1998; Давиденко, 1998; Солнцева, 1998; Biggar et al., 1998; Chuvilin et al., 2000]. Известно, что добыча, транспортировка и хранение нефти и нефтепродуктов сопровождаются аварийными и систематическими утечками, что приводит к обширному загрязнению ландшафтов и акваторий. В криолитозоне, харак-

теризующейся сложными инженерно-геокриологическими условиями, эта проблема особенно актуальна из-за повышенной аварийности инженерных объектов. Кроме того, в областях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) и глубокого сезонного промерзания воздействие углеводородных загрязнителей усугубляется высокой ранимостью и слабой восстановительной способностью ландшафтов [Андреева, 1981]. Поэтому разливы нефти здесь вызывают особо сильные, часто необратимые повреждения природных комплексов. В связи с этим важной инженерно-гео-

криологической и экологической задачей становится выявление ореолов распространения углеводородных загрязнителей в породах криолитозоны.

До недавнего времени исследования нефтяного загрязнения почв и пород криолитозоны, как правило, ограничивались сезонноталым слоем (СТС), так как кровля многолетнемерзлых пород традиционно считалась непроницаемым барьером для углеводородов (УВ) [Collins et al., 1993; Гусева, 1995; Солнцева, 1998]. Лишь в последние годы появились полевые и лабораторные данные, показывающие, что углеводородные соединения обладают значительной подвижностью в мерзлых грунтовых средах. Так, при проведении полевых исследований разливов дизельного топлива на севере Канады в 1990 г. Алертом и Исаченом, а также в 1995–1996 гг. К.В. Биггером [Biggar et al., 1998] в верхних горизонтах (первые метры) многолетнемерзлых пород были зафиксированы концентрации УВ до 1100 мг/кг при средних значениях 400–800 мг/кг [Biggar, 1995; Biggar et al., 1998].

На возможность миграции нефти в мерзлые породы указывают лабораторные экспериментальные исследования, которые были начаты на кафедре геокриологии МГУ в 1996 г. [Yershov et al., 1997]. В ходе экспериментов получены данные о проникновении углеводородов нефти в мерзлые породы с различной степенью заполнения пор льдом, а также оценено влияние ряда факторов (состава и криогенного строения мерзлых пород, состава и свойств нефти, температурных условий среды) на процессы переноса нефтяных компонентов в мерзлых породах [Chuvilin et al., 2001, 2003].

Специальный полевой эксперимент по изучению миграции нефтяного загрязнения в породах криолитозоны был поставлен в 2000 г. в устье р. Печора на геокриологическом стационаре Болванский (мыс Болванский). Этот проект являлся результатом сотрудничества исследователей из России и Норвегии в области изучения поведения нефти в слое сезонного оттаивания и верхних горизонтах ММП [Ананьева и др., 2003]. В течение трех лет на опытной площадке проводились наблюдения за динамикой распределения нефтяного загрязнения в слое сезонного оттаивания. В данной статье представлены новые результаты полевого эксперимента, полученные в сентябре 2003 г., в которых основное внимание уделено загрязнению верхних горизонтов ММП.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная площадка расположена в области сплошного распространения ММП в устье р. Печора (мыс Болванский) на относительно ров-



Рис. 1. Расположение опытной нефтяной площадки (фото из статьи [Ананьева и др., 2003, с. 51]).

ной водораздельной поверхности, занятой пятнистой мохово-лишайниковой тундрой (рис. 1). Поверхностные отложения здесь представлены среднечетвертичными ледово-морскими опесчаненными суглинками, сильно оторфованными в верхней части, с большим количеством обломочного материала (5–10%). Породы слоя сезонного оттаивания имеют характерную комковатую структуру и специфическую посткриогенную трещиноватость. По данным наблюдений на стационаре Болванский среднегодовая температура ММП в ландшафтных условиях, близких к экспериментальной площадке, составляет $-2,2^{\circ}\text{C}$, минимальная температура пород деятельного слоя на глубине 1 м равна -11°C . Глубина сезонного оттаивания в пределах площадки в среднем 1,2 м. В мерзлых суглинистых отложениях преимущественно развиты сетчатые и слоисто-сетчатые криогенные текстуры [Ананьева и др., 2003].

В основу методики проведения полевого эксперимента положен принцип налива нефти в специальный контейнер без дна, устанавливаемый на поверхности почвы со снятым растительным покровом. Всего на экспериментальной площадке установлено 13 наливных контейнеров – „тестов“. Для искусственных наливов использовалась нефть Варандейского месторождения (175 км к востоку от стационара Болванский) с низкой температурой застывания -27°C , температурой начала кипения 48°C , вязкостью 32 мПа·с при 20°C и плотностью d_4^{20} , равной 0,8643. Легкие фракции составляют 5,8% (их температура кипения 48–130 $^{\circ}\text{C}$), тяжелые фракции – 9,6% (130–200 $^{\circ}\text{C}$). Углеводородный состав нефти Варандейского месторождения: алканы – 53%, нафтены – 40%, ароматические соединения – 7%*. Наливы нефти в контейнеры осу-

* Анализы по определению характеристик нефти выполнены канд. геол.-мин. наук Е.В. Соболевой (геологический факультет МГУ).

ществлялись одновременно. В соответствии с программой полевых исследований на участки наливов нефти „тесты” вскрывались в разные моменты времени после начала эксперимента для изучения динамики распределения нефтяного загрязнения в сезонноталом слое.

Основная цель исследований, выполненных в сентябре 2003 г. (через 36 месяцев после начала эксперимента), – опробование на углеводородное загрязнение верхних горизонтов многолетнемерзлых пород. Для этого проводилось ручное бурение с отбором керна в пределах „тестов” на участках, не затронутых шурфами. Всего пробурено 6 скважин, которыми был пройден слой сезонного оттаивания на всю глубину (123–135 см) и вскрыты верхние горизонты ММП на глубину 50–70 см. Отбор проб на нефте- и влагосодержание осуществлялся как в слое сезонного оттаивания, так и в мерзлых породах. В сезонноталом слое образцы отбирались из верхней (10–20 см), центральной (40–60 см) и нижней (подшвы) частей СТС. В мерзлых породах пробы отбирались с интервалом 10–15 см. Общее углеводородное содержание в пробах определялось в лабораторных условиях методом хлороформной экстракции. Анализы выполнены сотрудником кафедры геологии и геохимии горючих полезных ископаемых Е.В. Соболевой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было показано ранее [Ананьева и др., 2003], в ходе опытных наливов нефти загрязнение уже через 5 дней после начала эксперимента проникло на всю глубину слоя сезонного оттаивания и даже фиксировалось в кровле (первые сантиметры) мерзлых пород. При этом в верхних 20 см от поверхности содержание нефти достигало 20 000 г/кг, к подошве СТС оно снижалось до 6000 мг/кг.

Через несколько месяцев после начала эксперимента концентрации нефти в сезонноталом слое уменьшились. Особенно ярко это прослеживалось в средней и нижней частях СТС, где значения понизились на порядок и более [Ананьева и др., 2003]. Однако в дальнейшем интенсивность падения концентраций существенно замедлилась. Данные последнего опробования СТС (сентябрь 2003 г.) показали, что характер распределения загрязнителя по глубине остался таким же: максимальные содержания нефти (5000–10 000 мг/кг) характерны для верхних оторфованных горизонтов, ниже по разрезу содержания нефти резко снижаются во всех исследованных скважинах и на подошве СТС составило 50–300 мг/кг (рис. 2).

Результаты опробования верхних горизонтов многолетнемерзлых пород показали присутствие нефтяного загрязнения по всей глубине вскрытых отложений. Содержания нефти здесь колеблются

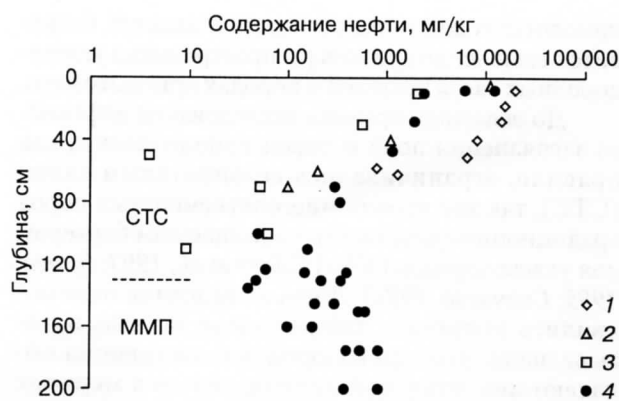


Рис. 2. Распределение нефтяного загрязнения в сезонноталом слое (СТС) и верхних горизонтах многолетнемерзлых пород (ММП) на опытной площадке (с использованием ранее опубликованных данных).

После начала эксперимента прошло: 1 – 5 дней, 2 – 2 месяца, 3 – 15 месяцев, 4 – 36 месяцев. Штриховой линией отмечена средняя глубина протаивания в сентябре 2003 г.

от 10 до 840 мг/кг. Наиболее часто встречаются значения 400–800 мг/кг (см. рис. 2). Следует отметить, что присутствие нефти фиксируется в мерзлых горизонтах с различным криогенным строением, в том числе с горизонтально-шлировыми и сетчатыми криогенными текстурами. Так, скважиной 2, заложенной в пределах „теста” 4, был вскрыт многолетнемерзлый суглинистый горизонт с горизонтально-шлировой криогенной текстурой (рис. 3, а). Толщина шлиров составляла 0,5–0,7 см, расстояние между ними 0,5–1,5 см. В минеральных прослоях на глубине 150–155 см нефтяное загрязнение составило 620 мг/кг, ниже по разрезу (173–176 см) наблюдалось некоторое увеличение углеводородного содержания до 840 мг/кг. В скважине 3, пробуренной в пределах „теста” 10, с глубины 123 см вскрыт мерзлый суглинок (более 70 см) (см. рис. 3, б). До глубины 155 см в разрезе наблюдались отдельные крупные прослои льда толщиной 1–2 см. В минеральных прослоях между ними фиксировалась тонкошлировая мелкосетчатая криогенная текстура (толщина шлиров 0,1–0,3 см). Нефтяное загрязнение в этой скважине также было обнаружено по всей глубине вскрытого мерзлого суглинка. В интервале 123–150 см содержание нефти в грунтовых прослоях достигало 350–400 мг/кг, а на глубинах 170–180 и 190–195 см оно составляло 550 и 850 мг/кг соответственно (см. рис. 3, б).

Нефтяное загрязнение было зафиксировано и для случая, когда верхний горизонт ММП представлен однородной супесью с массивной криогенной текстурой (скважина 4, „тест” 7). Распределение углеводородов по глубине здесь было доста-

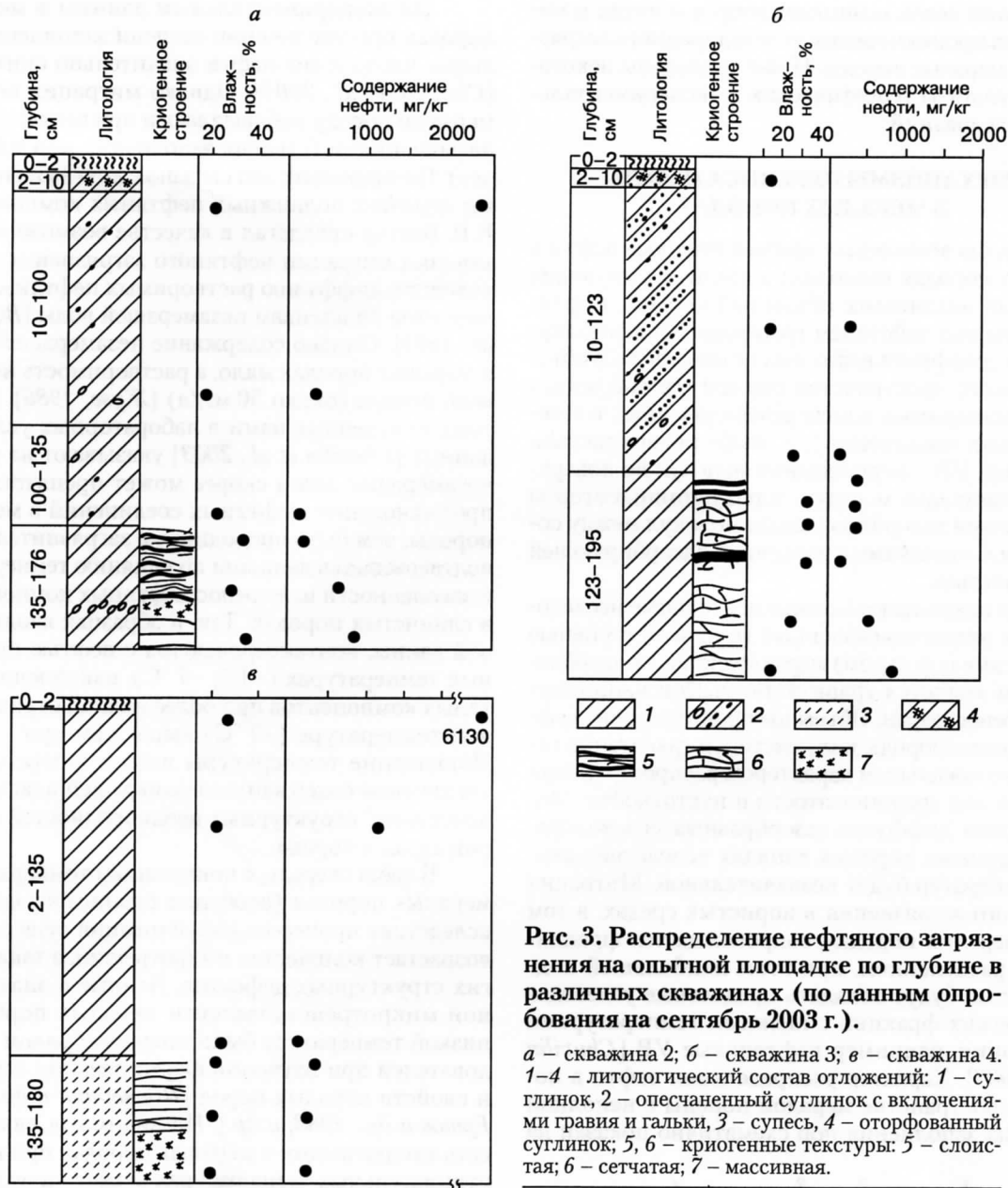


Рис. 3. Распределение нефтяного загрязнения на опытной площадке по глубине в различных скважинах (по данным опробования на сентябрь 2003 г.).

а – скважина 2; *б* – скважина 3; *в* – скважина 4. 1–4 – литологический состав отложений: 1 – суглинок, 2 – опесчаненный суглинок с включениями гравия и гальки, 3 – супесь, 4 – оторфованный суглинок; 5, 6 – криогенные текстуры: 5 – слоистая; 6 – сетчатая; 7 – массивная.

точно однородным, а их содержания не превышали 300 мг/кг (см. рис. 3, *в*). Возможно, большая однородность мерзлой породы и отсутствие деструктивных зон способствует меньшей миграции загрязнителя.

В целом полевые исследования показали, что при поверхностном нефтяном загрязнении в верхних горизонтах ММП происходит накопление загрязняющих углеводородов, их концентрация может составлять более 800 мг/кг, что по многим классификациям соответствует загрязненным грунтам. По полевым данным нефтяное загрязнение проникло в ММП как минимум на глубину

70 см (глубина опробования). При этом шлировые криогенные текстуры не являлись препятствием для миграции загрязнителя. Нефтяное загрязнение верхних горизонтов ММП сопоставимо с загрязнением слоя сезонного оттаивания и даже может превышать его. Можно предположить, что в мерзлых породах нефтяные компоненты в меньшей степени подвержены процессам деградации (вымыванию, биологическому и химическому разрушению и т. д.), чем в сезоннооттаивающих грунтах, поэтому нефтяное загрязнение в мерзлоте будет сохраняться более длительное время и может стать источником вторичного загрязнения.

В этой связи возникает вопрос о путях и механизмах проникновения углеводородного загрязнения в мерзлые породы. Ниже приведены некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований.

МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА НЕФТИ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Анализ возможных причин переноса нефти в мерзлых породах позволяет выделить следующие основные механизмы: объемный перенос нефтяной фазы под действием гравитации и капиллярных сил; диффузия нефтяных компонентов в объеме порового пространства породы (газообразных УВ и растворимых в воде углеводородных и гетероатомных соединений), а также поверхностная диффузия УВ – перемещение молекул по поверхности слагающих мерзлую породу компонентов за счет скачков адсорбированных молекул между соседними площадками с различной адсорбирующей способностью.

Как показывают экспериментальные исследования, в невлагонасыщенных (с низкой степенью заполнения пор льдом) мерзлых породах преобладающим является гравитационный и капиллярный перенос нефти. Объемное проникновение нефти в мерзлые породы под действием гравитации ограничено локальным характером распространения крупных зон трещиноватости и пустотности. Молекулярная диффузия газообразных углеводородов в крупных поровых каналах вследствие низких температур будет незначительной. Миграция нефтяного загрязнения в пористых средах, в том числе мерзлых породах, сопровождается фракционным разделением, при этом наибольшей подвижностью будут обладать предельные углеводороды легких фракций с низкими температурами застывания, например нафтеновые УВ [Chuvilin et al., 2003]. Характер распределения нефти в поровом пространстве мерзлой породы с неполной степенью заполнения пор схематично показан на рис. 4.

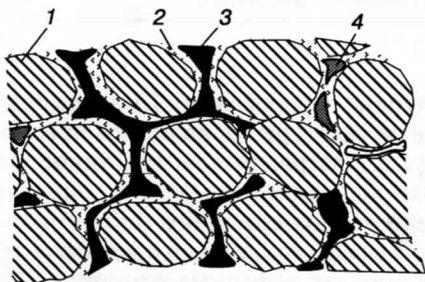


Рис. 4. Характер накопления нефтяного загрязнения в мерзлых породах с неполной степенью заполнения пор льдом.

1 – минеральные частицы; 2 – лед и незамерзшая вода; 3 – нефть; 4 – воздух.

По экспериментальным данным в мерзлых породах при увеличении степени заполнения пор льдом накопление нефти значительно снижается [Chuvilin et al., 2001]. Однако миграция нефти в мерзлую породу наблюдалась и при высокой льдонасыщенности (степень заполнения пор 0,8 и более). По-видимому, это связано с другими способами переноса подвижных нефтяных компонентов. К.В. Биггер предлагал в качестве возможного механизма миграции нефтяного загрязнения в этих условиях диффузию растворимых нефтяных компонентов по пленкам незамерзшей воды [Biggar et al., 1998]. Однако содержание незамерзшей влаги в мерзлых породах мало, а растворимость нефти в воде низкая (около 50 мг/л) [Жузе, 1986]. Кроме того, полученные нами в лабораторных условиях данные [Chuvilin et al., 2003] указывают на то, что незамерзшая влага скорее может препятствовать проникновению нефтяных соединений в мерзлые породы, чем быть проводником загрязнителя. Это подтверждается данными по влиянию температуры и засоленности на перенос нефтяных компонентов в глинистых породах. Так, в образцах каолинитовой глины, контактировавших с нефтью при разных температурах ($-1,5$; -7 °С), накопление нефтяных компонентов при более низкой отрицательной температуре (-7 °С) выше, чем при $-1,5$ °С. Повышение температуры влечет значительное увеличение содержания незамерзшей влаги и „залечивание” структурных неоднородностей и микротрещин в породе.

В свою очередь, с понижением температуры в мерзлых породах (особенно глинистого состава) вследствие процессов охрупчивания существенно возрастает количество микротрещин, а также других структурных дефектов. Данные о значительной микротрещиноватости мерзлых пород при низкой температуре были получены рядом исследователей при изучении формирования строения и свойств мерзлых пород [Шушерина и др., 1975; Ершов и др., 1988; и др.]. По-видимому, связанная сеть микротрещин в мерзлых породах при низких отрицательных температурах может являться основным проводником для нефтяного загрязнения. Возможные пути переноса нефтяных компонентов в мерзлом глинистом грунте показаны на рис. 5.

Движение нефтяных компонентов в микротрещинах и других деструктивных зонах может осуществляться как за счет капиллярного переноса (нефть имеет низкие значения поверхностного натяжения, в 2–3 раза ниже воды, соответственно, для капиллярного переноса ей требуются гораздо более тонкие каналы), так и посредством молекулярной поверхностной диффузии в виде отдельных молекул и нефтяных пленок. Несмотря на то что скорость поверхностного переноса значительно меньше скорости капиллярного, его роль в условиях очень тонких пор и микротрещин может

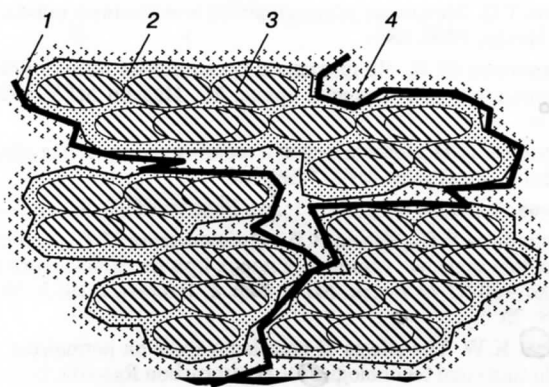


Рис. 5. Основные пути переноса нефтяного загрязнения в тонкодисперсной льдонасыщенной породе.

1 – микротрещины и микропустоты (преобладают гравитационный, капиллярный и поверхностно-капиллярный виды переноса соединений и фракций нефти); 2 – зона контакта между частицами и кристаллами льда (преобладает перенос компонентов нефти посредством молекулярной поверхностной диффузии); 3 – пылевато-глинистые агрегаты; 4 – лед.

быть весьма существенной. По данным исследований в нефтяной геологии [Жузе, 1986; Де-Бур, 1970] именно капиллярно-поверхностный перенос углеводородного вещества является главным механизмом в ультра- и микропорах горных пород. По-видимому, это во многом справедливо применительно к мерзлым породам.

Причинами переноса нефтяного загрязнения при наличии в мерзлых породах шлировых криогенных текстур могут быть невыдержанность по простиранию ледяных прослоев, присутствие в них характерных вытянутых воздушных включений, существование микротрещин и других структурных дефектов в сегрегационных ледяных образованиях. Возможно, сегрегационное льдообразование создает дополнительные деструктивные зоны, по которым может происходить миграция загрязнителя.

Как известно, верхние горизонты многолетнемерзлых пород в течение годового цикла испытывают существенные температурные колебания, что приводит к возникновению в них объемно-градиентных напряжений. Вследствие этого, по-видимому, и формируются системы макро- и микротрещин, которые играют важную роль в процессах переноса и накопления нефтяного загрязнения в верхних горизонтах ММП.

В работе представлены новые результаты исследования нефтяного загрязнения верхних горизонтов ММП на опытной площадке в устье р. Печора (мыс Болванский), заложенной в 2000 г. Результаты опробования ММП показали, что через три года после начала полевого эксперимента неф-

тяное загрязнение фиксируется по всей глубине вскрытых многолетнемерзлых отложений (0,5–0,7 м). Концентрация его достигает 600–800 мг/кг, что сопоставимо с загрязнением слоя сезонного оттаивания.

Полученные данные свидетельствуют, что шлировые криогенные текстуры мерзлых пород не препятствовали проникновению и накоплению углеводородных загрязнителей в ММП.

На основе теоретических и экспериментальных работ в статье рассмотрены основные механизмы возможного проникновения нефтяного загрязнения в ММП.

ВЫВОДЫ

На основе данных, полученных при исследовании нефтяного загрязнения верхних горизонтов ММП на опытной площадке в устье р. Печора, можно сделать следующие заключения.

1. Получены натурные данные по проникновению нефтяного загрязнения в верхние горизонты ММП. Так, через три года после начала полевого эксперимента нефтяное загрязнение зафиксировано по всей глубине вскрытых многолетнемерзлых отложений (0,5–0,7 м от кровли ММП) и, скорее всего, может быть обнаружено и в более глубоких горизонтах. Концентрация углеводородного загрязнения многолетнемерзлых пород достигала 600–800 мг/кг, что сопоставимо с загрязнением слоя сезонного оттаивания. Анализ распределения углеводородного загрязнения по глубине опробования показывает, что минимальное содержание загрязнителя характерно для нижнего горизонта СТС, что может указывать на более длительную сохранность нефтяного загрязнения в многолетнемерзлых породах.

2. Выявлено, что шлировые криогенные текстуры многолетнемерзлых пород не прерывают проникновение нефтяного загрязнения в мерзлые породы. Присутствие нефтяного загрязнения фиксируется в мерзлых горизонтах с различным криогенным строением, в том числе с горизонтально-шлировыми и сетчатыми криогенными текстурами.

3. Рассмотрены основные механизмы возможного проникновения нефтяного загрязнения в ММП. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что в мерзлых породах преобладают гравитационный (при наличии достаточной пустотности) и капиллярно-поверхностный механизмы переноса компонентов нефти. При этом основными путями переноса нефтяного загрязнения в мерзлых породах являются не заполненные льдом и незамерзшей водой поровое пространство, микротрещины и другие структурные дефекты. Наличие структурных дефектов (прежде всего микротрещиноватости) в верхних горизонтах ММП, по-видимому, связано с температурными объемно-градиентными напряжениями, возни-

кающими здесь при существенных колебаниях температуры в течение годового цикла.

Авторы признательны начальнику отряда ИКЗ СО РАН Г.В. Ананьевой за помощь в организации полевых работ.

Постановка и начальный этап полевого эксперимента по исследованию поведения нефти в слое сезонного оттаивания и верхних горизонтах ММП осуществлены при поддержке Норвежского геотехнического института.

Исследования 2003 г. выполнены при поддержке РФФИ (грант № 03-05-64462) и гранта „Ведущие научные школы России” (№ НШ-2067.2003.5).

Литература

Ананьева Г.В., Дроздов Д.С., Инстанес А., Чувилин Е.М. Нефтяное загрязнение слоя сезонного оттаивания и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород на опытной площадке „мыс Болванский” в устье р. Печора // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 49–59.

Андреева Е.Н. Нефть и загрязнение среды на Американском Севере // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1981, № 3, с. 86–97.

Гусева О.А. Опытное моделирование процессов миграции нефти и нефтепродуктов в разных типах тундровых почв ЕТР // Геоэкология в нефтяной и газовой промышленности: Тез. докл. науч.-техн. конф. М., ГАНГ им. И.М. Губкина, 1995, с. 8–9.

Давиденко Н.М. Проблемы экологии нефтегазоносных и горнодобывающих регионов севера России. Новосибирск, Наука, 1998, 360 с.

Де-Бур Я.Х. Подвижность молекул в пористых системах и ее связь с избирательностью катализа // Основы предвидения каталитического действия: Тр. IV Междунар. конгресса по катализу. М., Наука, 1970, т. 1, с. 11–16.

Ершов Э.Д., Лебеденко Ю.П., Чувилин Е.М., Язынин О.М. Микростроение мерзлых пород. М., Изд-во МГУ, 1988, 186 с.

Жузе Т.П. Миграция углеводородов в осадочных породах. М., Недра, 1986, 186 с.

Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М., Изд-во МГУ, 1993, 202 с.

Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М., Изд-во МГУ, 1998, 368 с.

Сомов А. Слово и дело // Нефть России, 1998, № 2, с. 5–8.

Шушерина Е.П., Рогов В.В., Заболотская М.И. Микростроение мерзлых глинистых пород при их охлаждении от –5 до –50 °С // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 1975, № 6, с. 23–29.

Biggar K.W. The effects of petroleum spills on permafrost // Techniques and technologies for Hydrocarbon Remediation in Cold and Arctic Climates: Proc. of the Conf. at the Royal Military College of Canada (Kingston, Ontario) / Ed. K.W. Biggar. Kingston, Federal Government Printer, 1995, p. 2–11.

Biggar K.W., Haider S., Nahir M., Jarrett P.M. Site investigations of fuel spill migration into permafrost // J. Cold Regions Eng., 1998, vol. 12, No. 2, p. 84–104.

Chuvilin E.M., Miklyayeva E.S. An experimental investigation of the influence of salinity and cryogenic structure on the dispersion of oil and oil products in frozen soil // Cold Region Sci. and Technology, 2003, vol. 37, p. 89–95.

Chuvilin E.M., Naletova N.S., Miklyayeva E.S., Kozlova E.V. Factors affecting spreadability and transportation of oil in regions of frozen ground // Polar Record, 2001, vol. 37, No. 20, p. 229–238.

Chuvilin E.M., Yershov E.D., Naletova N.S., Miklyayeva E.S. The use of permafrost for the storage of oil and oil products and the burial of toxic industrial wastes in the Arctic // Polar Record, 2000, vol. 36, No. 198, p. 211–214.

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. Hanover, NH // Cold Regions Res. and Eng. Laboratory, 1993. (CRREL / Rep. 93-13).

Yershov E.D., Chuvilin E.M., Smirnova O.G., Naletova N.S. Interaction of oil with frozen soils // Ground freezing-97: Frost action in soils. Lulea, Sweden, 1997, p. 381–384.

*Поступила в редакцию
25 августа 2004 г.*