

МОДИФИКАЦИЯ МИКРОСТРОЕНИЯ ПОЧВ КРИОЛИТОЗОНЫ В РАЙОНАХ НЕФТЕГАЗОРАЗВЕДКИ (БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКАЯ ТУНДРА)

© 2017 г. Г. В. Русанова, С. В. Денева

*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, Республика Коми, 167982 Россия.
E-mail: denewa@rambler.ru*

Поступила в редакцию 01.02.2016 г.

Рассмотрены результаты исследования микростроения криогенных почв буровых площадок в северной и южной частях Большеземельской тундры через 1 год и 20 лет после загрязнения нефтепродуктами. Почвы ерниковых мохово-лишайниковых тундр на легких породах – подбуры и подзолы, на суглинках – глееземы. Полугидроморфные и гидроморфные комплексы представлены торфяно-подзолами глеевыми, торфяно-глееземами, торфяными олиготрофными почвами плоских бугров. Фоновое содержание нефтяных углеводородов (НУ) в органических горизонтах составляет 1.2–2.2 г/кг, а на буровых площадках в 10–20 раз выше. Через год после загрязнения на 14 см увеличивается глубина сезонного оттаивания глеезема, происходит обволакивание черной пленкой коагуляционных агрегатов, фрагментов детрита, стенок пор, образование темных сгустков в органическом горизонте. В глеевом горизонте формируются черные ореолы. Через 20 лет в песчаных почвах отмечены консервация тяжелых фракций НУ, их криогенный метаморфизм. В торфяниках наблюдается уплотнение, отмечены аккумуляция сгустков и включения в полостях. В суглинистых почвах заметно окаймление трещин и каналов темно-коричневыми пленками, образование глинистых и Fe-глинистых натеков.

Ключевые слова: *микроморфологический метод, нефтяные углеводороды, криогенные почвы, буровые площадки, Большеземельская тундра.*

ВВЕДЕНИЕ

Оценка состояния окружающей среды в высоких широтах и определение влияния антропогенных изменений среды на экосистемы Арктики – важная проблема современности. Освоение нефтегазовых месторождений на севере ЕТР влияет на почвенный покров равнинной тундры, информация о состоянии которого необходима для мониторинга природной среды.

В работах, посвященных загрязненным нефтью почвам криолитозоны, рассматриваются уровни содержания нефтепродуктов, особенности их профильного распределения и закономерности миграции [1, 5, 6, 19, 20, 22]. Однако для разработки системы мониторинга нужна информация о комплексе показателей качества почв, включая микроморфологические, позволяющие обнаружить не выявляемые традиционными методами изменения. Микроморфологические исследования нефтезагрязненных почв немногочисленны. В условиях лабораторных и полевых экспериментов обнаружено изменение микроагрегации суглинков под влиянием загрязнения нефтепродуктами [24], возрастание роли физических

процессов в перестройке структурной организации почв [4].

Цель исследований – установление изменений в криогенных почвах под влиянием загрязнения нефтепродуктами, в том числе, перестройки организации почвенной массы на микроморфологическом уровне для выявления диагностических признаков нарушений и контроля над состоянием почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Антропогенное влияние на изменение микростроения почв изучалось на площадках буровых скважин, оставшихся после разведочного бурения, проводимого 1 год и 20 лет тому назад. Выбирались участки, визуально сходные по степени загрязнения (ложбины стока, стенки котлованов-отстойников, вблизи устья скважин). Почвы через 1 год после нарушения изучались в северной части Большеземельской тундры (Варандейский комплекс месторождений вблизи побережья Баренцева моря), в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Глубина оттаивания почв составляет: супесчано-песчаных 60–80, суглинистых – 40–60, торфяных – 20–40 см.

Исследования через 20 лет после окончания разведочных работ проводились вблизи дельты р. Печора (Ванейвисский комплекс месторождений), на северной границе подзоны южных гипоарктических тундр. Территория характеризуется холмистым и пологоувалистым рельефом, сплошным и островным распространением многолетней мерзлоты. В пределах торфяников отмечается широкое развитие термокарстовых процессов и процессов пучения торфа. Максимальные глубины протаивания составляют 0.5–0.7 м, в небольших западинах между буграми – до 1.2 м. На минеральных и минеральных заторфованных поверхностях широко развиты пятна-медальоны различного диаметра, приуроченные, как правило, к выположенным вершинам небольших сопок. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) в зависимости от наличия или отсутствия торфяной подушки изменяется от 1.2 до 2.0 м.

В подзоне северной тундры преобладают кустарничково-моховые сообщества, а в южной – кустарниковые ивняково-мелкоерниковые ассоциации. Формирование растительного покрова на территориях, нарушенных разведочным бурением, наряду с сохранением общей тенденции бореализации флоры и луговения ценозов носит ярко выраженный фрагментарный характер (площадки буровых скважин характеризуются 50–90% проективным покрытием растительностью), что обусловлено гетерогенностью местообитаний, широким варьированием типов физического нарушения и химического загрязнения [8].

Характерные почвы ерниковых мохово-лишайниковых тундр на легких породах – подбуры глееватые, подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые, на суглинках – глееземы. Торфяные олиготрофные деструктивные почвы плоских бугров также могут быть отнесены к автоморфному ряду. Полугидроморфные и гидроморфные почвы встречаются в виде комплексов, включающих торфяно-подзолы глеевые иллювиально-гумусовые, торфяно-глееземы, торфяные олиготрофные почвы. Спектр загрязненных почв состоит из антропогенно-преобразованных вариантов подзолов и подбуров как на однородных, так и на двучленных отложениях (мощность СТС 90–00 см), торфяно-подзолов глеевых (мерзлота на глубине 40 см), торфяно-глееземов (мощность СТС 60–80 см) и сухоторфяных почв плоскобугристых торфяников (мощность СТС – в среднем 36 см).

Почвообразующими породами служат моренные супеси и суглинки, верхнечетвертичные

морские, ледниково-морские, флювиогляциальные и озерно-аллювиальные отложения.

Образцы на микроморфологические исследования, ориентированные горизонтально и вертикально, отбирались по генетическим горизонтам профилей почв. Закрепление образцов для изготовления шлифов проводилось по методике с использованием естественных смол и органических растворителей [10]. Использование подобных смесей не оказывает влияния на перераспределение в почвенном материале загрязнителей [4]. Шлифы изучались под поляризационным микроскопом (увеличение 70, николи параллельны). Названия почв даны в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [7].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных исследований выявлены особенности почв, отражающие, кроме разнообразия геолого-геоморфологических условий, специфику мерзлотной обстановки. Подбуры и подзолы характеризуются проявлением криогенных процессов, оглеением нижней части профиля при близком (до 1 м) залегании мерзлоты. В профиле торфяно-глееземов выявляется слабая дифференциация по илу и содержанию оксидов Fe и Al. Полугидроморфным и гидроморфным почвам свойственны деструкция органического вещества и криогенная переработка материала.

На этапе разведочных работ (предэксплуатационная стадия) загрязнение почвенного покрова происходит за счет разлива дизельного топлива, отработанных буровых растворов, содержащих нефть и аккумулирующихся в котлованах-сборниках, а также газоконденсатной смеси легких углеводородов [20]. Как установлено, содержание нефтяных углеводородов (НУ) в фоновых почвах колеблется в пределах десятых долей грамма на 1 кг почвы, по мере приближения к техническим объектам их содержание повышается. На территориях месторождений происходит диффузия НУ на дневную поверхность из нефтегазоносных толщ, а также рассеяние из очагов загрязнения [12]. Наиболее высокие фоновые показатели НУ (около 2 г/кг) обнаружены в подзолах иллювиально-гумусово-железистых, формирующихся в супесях, подстилаемых суглинками, а также в почвах, занимающих подчиненное ландшафтно-геохимическое положение (торфяно-глееземы), на сорбционных, глеевых, механических, геохимических и физико-химических барьерах [11] (таблица). Низкое содержание НУ (1–1.4 г/кг) и высокая активность миграции установлены для почв

Накопление и миграция НУ в почвах и ландшафтах южной подзоны Большеземельской тундры (Ванейвисский комплекс месторождений)

Почва; почвообразующая порода	Растительный покров	Элемент рельефа, ландшафт	Содержание НУ в почвенных горизонтах, мг/кг	Группы почв по условиям накопления- миграции НУ
Подбур глееватый; моренные супесчано- легкосуглинистые отложения Подзол иллювиально- гумусовый; песчаные отложения	Ерниково- ивняково- лишайниково- моховой Ерниково- лишайниково- мохово-осоковый	Выпуклая часть бугра, пятнисто-бугор- коватая тундра Понижение мезобугра на склоне, бугоркова- тая тундра	О – 1 400 ВН – 83 В1 – 64 ВСg – 155 Т – 1 250 Е – 183 ВН – 104	I. Слабое накопление в профиле, благоприятные условия миграции
Подзол иллювиально- гумусово-железистый; супеси, подстилаемые суглинками с 30 см	Ивняково- ерниково- мохово- лишайниковый	Слабо пологий склон, подножье песчаного холма, ивняковая тундра	О – 2 190 Еg – 300 ВН – 770 ВС – 790 С – 800	II. Среднее накопление в профиле, затрудненные условия миграции
Глезем криогенно- ожелезненный; суглинистые отложения	Ерниково- ивняково- кустарничково- мохово- лишайниковый	Упложенная верхняя часть увала; пятнисто- бугорковатая тундра	О – 1 920 Gcf – 470 G – 820	

песчаного гранулометрического состава (подбуров и подзолов), аккумулирующих НУ в органо-генных и иллювиальных горизонтах, а также над мерзлотой. Почвы на моренных суглинках (глебеземы) характеризуются повышенным содержанием НУ по сравнению с почвами на песках. Увеличение содержания НУ с глубиной в суглинистых отложениях свидетельствует об их слабой латеральной миграции и склонности к консервации.

Исследования на буровых площадках в северной и южной тундре, проведенные через 1 год и 20 лет после завершения буровых работ, показали, что наиболее распространенными типами нарушений являются 1) химическое загрязнение нефтью, пластовыми водами, буровыми растворами, 2) физико-механическая деградация, 3) повреждения вследствие усиления экзогенных процессов (дефляция, солифлюкция, деградация мерзлоты). Степень нарушений колеблется от полного уничтожения экосистем до ухудшения в той или иной степени их качества [15]. Уже через год после начала разведочных работ наблюдаются все виды нарушений. Через 20 лет наиболее загрязненные участки обнаруживаются вблизи устьев скважин, котлованов-сборников и на полосах стока нефтесодержащих жидкостей.

В почвах буровых площадок водораздельных территорий установлено высокое, в 10–20 раз превышающее фон, локальное содержание нефтепродуктов (21–41 г/кг), сосредоточенных в органо-генных горизонтах, битуминозных корках пятен разливов, полосах стока загрязнителей, на стенках отстойников. Взаимодействие нефтепродуктов с почвенной средой осуществляется посредством интенсивной сорбции в гумусовом горизонте высокомолекулярных компонентов нефти, обволакивания углеводородами остатков растений на первых этапах, проникновения по почвенным порам и трещинам, образования непроницаемого экрана (битуминозной корки из смол и асфальтенов), с последующей аккумуляцией новых порций углеводородов на поверхности при многократных разливах [12]. Установлено [2, 3, 23], что сорбционная активность зависит от влажности почв: чем выше влажность, тем меньше сорбция углеводородов. Наблюдается аккумулятивный тип распределения техногенных углеводородов в профиле почв легкого гранулометрического состава водораздельных участков, равномерный в торфяниках; имеет место аккумуляция на глеевых и сорбционных барьерах в почвах на суглинистых отложениях.

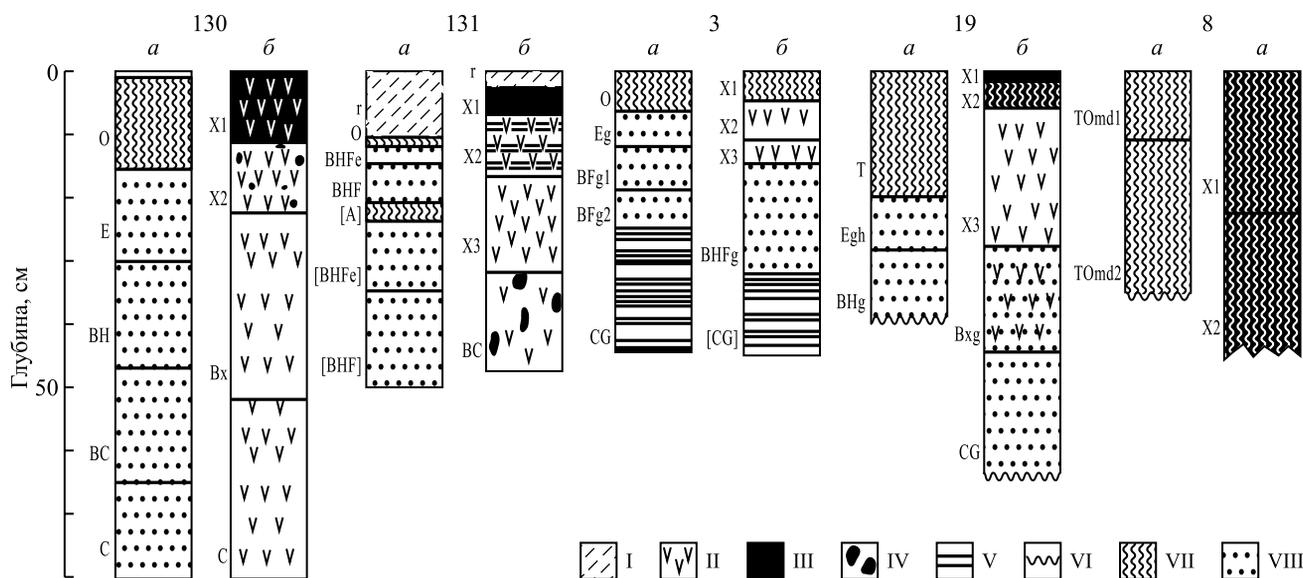


Рис. 1. Морфологическое строение фоновых (*a*) и нарушенных (*б*) почв Ванейвисского месторождения: I – нанос, II – химическое загрязнение, III – битуминозная корка, IV – темные пятна, V – слои, VI – граница мерзлоты, VII – подстильно-торфяные и торфяные горизонты, VIII – песок.

Почвы: 130: *a* – подзол иллювиально-гумусовый, *б* – химически-преобразованная по подзолу иллювиально-гумусовому; 131: *a* – подбур оподзоленный на подбуре оподзоленном, *б* – химически-преобразованная по подбуре оподзоленному на подбуре оподзоленном; 3: *a* – подзол глеевый иллювиально-железистый, *б* – химически-преобразованная по подзолу глеевому иллювиально-железистому; 19: *a* – торфяно-подзол глеевый иллювиально-гумусовый, *б* – химически-преобразованная по торфяно-подзолу глеевому иллювиально-гумусовому; 8: *a* – торфяная олиготрофная, *б* – химически-преобразованная по торфяной олиготрофной почве.

При загрязнении НУ происходят 1) трансформация морфологических свойств почв, сопровождающаяся стиранием черт естественного профиля (изменение окраски, уплотнение сложения, образование непроницаемой корки на поверхности) (рис. 1); 2) изменение физико-химических свойств (сдвиг в щелочную сторону кислотно-основных условий, почвенного поглощающего комплекса и увеличение содержания углерода); 3) увеличение мощности СТС. Трансформация почв зависит от количества поступающих загрязняющих веществ и сопровождается деградацией либо всего профиля, либо только верхней его части [15]. Однако загрязнение верхней части и, особенно, образование корки на поверхности, в свою очередь, вызывают оглеение профиля, что является техногенно-спровоцированным процессом.

Через 1 год после нарушения вблизи обваловки котлована сборника буровой скважины Варандейского комплекса (почва торфяно-глеезем) слой торфа (0–15 см) пропитан нефтью, окрашен в черный цвет. Ниже лежащий тиксотропный глеевый горизонт (15–30 см) маслянистый, вязкой консистенции, в нем имеются черные пятна на синем фоне. Глубина сезонного оттаивания увеличилась на 14 см по сравнению с ненарушенными почвами. Анализ микростроения показал, что

верхняя часть торфяного горизонта характеризуется интенсивным фрагментированием растительных остатков (рис. 2*a*). В его нижней части (10–15 см) происходят концентрация темных нефтепродуктов, обволакивание черной пленкой коагуляционных агрегатов, фрагментов детрита, стенок пор, образование крупных темноокрашенных сгустков, заполнение пор темной массой загрязнителя (рис. 2*б, в*). В глеевом горизонте локально наблюдаются черные ореолы и диффузное проникновение черной массы в минеральную часть профиля (рис. 2*г*).

Формирование гидрофобных пленок вокруг агрегатов и блокирование пор приводят к уменьшению аэрации почвы. Механизм трансформации почв начальной стадии загрязнения заключается в максимальной аккумуляции компонентов нефти в органогенном слое, измельчении растительных остатков, обволакивании пленкой агрегатов, растительных остатков, а в дальнейшем в проникновении в минеральную толщу, нарушении сложения.

В условиях полевых опытов [4] при внесении нефтепродуктов на поверхность криозема пылевато-суглинистого через 1 год после начала эксперимента также обнаружено измельчение

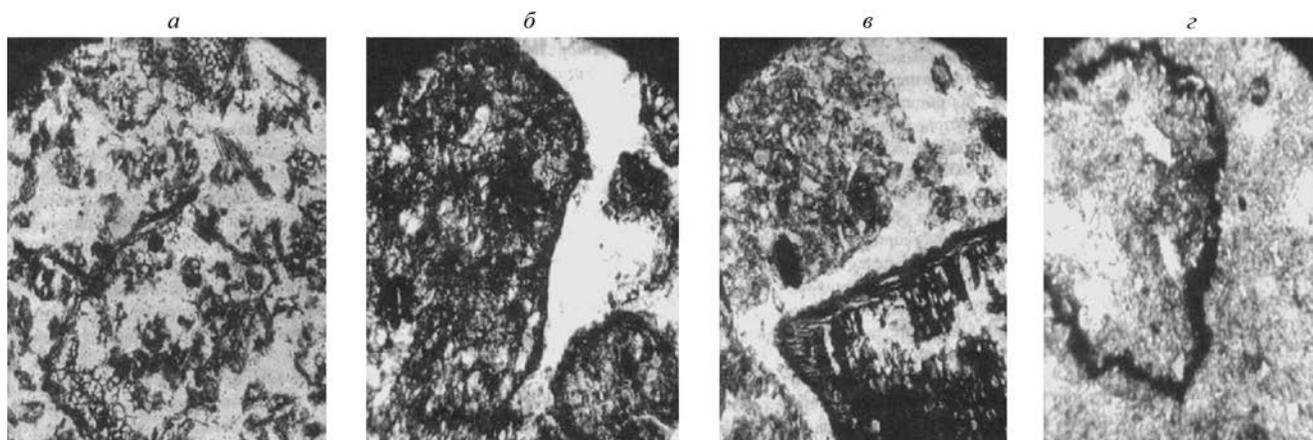


Рис. 2. Микростроение торфяно-глебезема через 1 год после загрязнения: *a* – фрагментирование растительных остатков, горизонт Т (0–10 см); *б, в* – обволакивание пленкой загрязнителя агрегатов, фрагментов детрита, горизонт Т (10–15 см); *г* – черный ореол, горизонт G (15–25 см).

растительных остатков, обволакивание агрегатов и накопление загрязнителя в порах.

Микроморфологическое строение почв Ваней-висского комплекса через 20 лет после нарушения в значительной степени трансформировано.

1. В песчаных подзолах иллювиально-гумусовых и подбурах глееватых четко проявляется хроматографическая картина профильного распределения нефтепродуктов: черный цвет в верхней, коричневый – в средней, светло-бурый обесцвеченный оглеенный – в нижней части. Оглеение нижней части профиля происходит вследствие блокирования пор верхнего наноса и создания анаэробных условий. Разрез подзола заложен на стенке котлована-сборника нефтепродуктов, генетические горизонты трансформированы. Консервация темных нефтепродуктов в верхнем минеральном горизонте (0–14 см) происходит в промежутках между скелетными зернами в виде включений НУ: черных микроучастков, сгустков с фестончатыми краями, мелкоагрегированных, вследствие криогенного дробления (рис. 3*а*). Освобождение подвижных компонентов НУ вследствие криогенного метаморфизма загрязнителей сопровождается аккумуляцией тяжелых фракций [9]. Ритмичные криогенные процессы способствуют выветриванию и преобразованию этих фракций, приобретающих наиболее устойчивую в природе форму в виде сфер, линз округло-овальных очертаний. На глубине 14–24 см фиксируются светло-коричневый материал более легких фракций в виде локальных микрозон флюидального облика, сгустки различной формы и мелкие агрегаты (рис. 3*б*). На зернах скелета – темно-бурые окаймления. Накопление

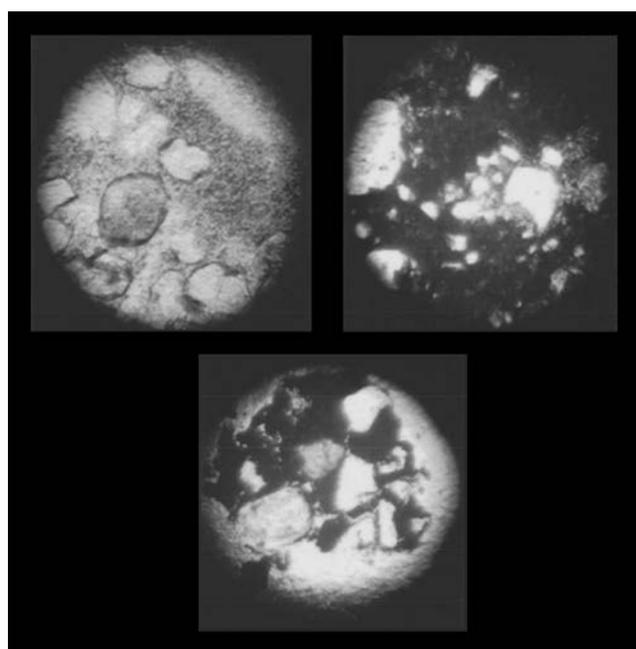


Рис. 3. Микростроение подзола иллювиально-гумусового через 20 лет после загрязнения: *a* – мелкоагрегированные черные включения в промежутках между скелетными зернами (0–14 см); *б* – коричневые микрозоны флюидального облика (14–24 см); *в* – локальные цементации зерен скелета темно-коричневой массой (24–35 см).

загрязнителя на глубине 24–35 см ограничено вследствие периодического подтягивания к фронту промерзания, а также вертикальной и латеральной миграции. Фиксируются неравномерность пропитки отдельных микрозон и формирование локальных цементаций зерен скелета темно-коричневой массой (рис. 3*в*). Смена супесчаного верхнего слоя на более уплотненный нижележащий сопровождается равномерным распределением в межскелетном пространстве,

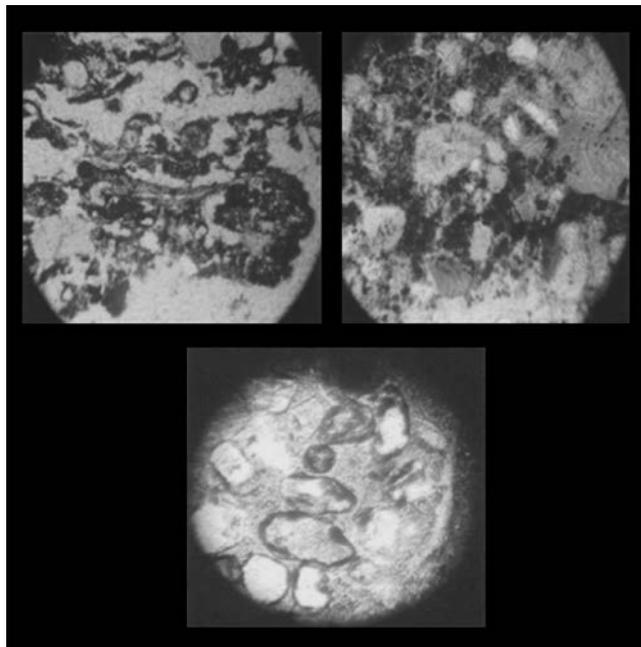


Рис. 4. Микростроение торфяно-подзола глеевого через 20 лет после загрязнения: *a* – деструкция и фрагментация, пропитка нефтепродуктами растительных остатков (2–6 см); *b* – криогенное дробление включений загрязнителя между зернами скелета (6–23 см); *в* – обволакивание зерен скелета (28–45 см).

образованием толстых оболочек и двухслойных пленок с ячеистым характером верхнего покрова.

2. Преимущественная аккумуляция нефтепродуктов в торфяно-подзолах глеевых иллювиально-гумусовых происходит на поверхности, где образуется битуминозная корка. Просачивание в нижележащие торфяные и минеральные горизонты сопровождается заполнением НУ полостей, корневых ходов, трещин. Иллювиально-гумусовый горизонт также несколько задерживает техногенные углеводороды, благодаря более плотному сложению. Происходит застаивание воды в нижней части профиля и надмерзлотное оглеение. Глубина мерзлоты, измеренная на фоновых и нарушенных участках, увеличивается на 25 см (с 40 до 65 см). Разрез торфяно-подзола глеевого заложен в ложбине стока, на поверхности битуминизированная корка нефти; профиль почвы погребен. В торфяном горизонте под битуминозной коркой (2–6 см) отмечаются деструкция и фрагментация криогенными процессами растительных остатков, пропитка и обволакивание их темно-бурыми нефтепродуктами, накопление загрязнителя в виде включений черных сгустков в пустотах (рис. 4*a*). В нижележащей минеральной толще (6–28 см) наблюдаются консервация черных обособлений нефтепродуктов в промежутках

между песчаными зернами, криогенное дробление включений загрязнителя на изометричные агрегаты, наличие светло-коричневых участков флюидального облика (рис. 4*b*). Вблизи кровли многолетней мерзлоты, на границе восстановленной и окисленной зон (28–45 см) присутствуют признаки обволакивания зерен скелета темно-бурыми нефтепродуктами (рис. 4*в*).

3. В почвах на суглинистых отложениях (глееземы) при загрязнении нефтепродуктами заметную барьерную роль играют органогенные горизонты (0–22 см). Агрегаты из мелких фрагментов растительных остатков образуются и в ненарушенных почвах тундры, лесотундры [14, 16], но в химически-преобразованных почвах на агрегатах из растительных остатков наблюдаются черные пленки и пропитка их НУ. Разрез заложен на полосе стока НУ с пятнообразными углублениями, мелкими депрессиями. Из органогенных горизонтов в нижележащую минеральную толщу (22–43 см) происходит диффузное проникновение НУ с последующим изменением исходной окраски и появлением черных пленок вдоль трещин, окаймлений поверхностей агрегатов и скелетных зерен, формированием мелких округлых обособлений и глинистых натеков. Образование специфических органо-глинистых натеков и пленок при взаимодействии битуминозных веществ с почвенным материалом обнаружено и Н.П. Солнцевой [18]. Трансформация структуры почв, разрушение микроагрегатов выявлены в полевых опытах [4] при загрязнении криоземов нефтепродуктами и в лабораторных экспериментах [24] с многократным промораживанием и внесением дизельного топлива. Наблюдаемые в шлифах натёки глины относительно свежие, так как не проявляют зернистости и тусклости [13]. В ненарушенных тундровых глееземах в связи с устойчивостью тонкодисперсной массы, обусловленной криогенной агрегацией материала, натёки представлены единичными мелкими обломками, очевидно, унаследованными от прошлых, более теплых фаз голоцена, и разрушенных при последующих похолоданиях [17].

4. В торфяных горизонтах нарушенного участка плоскобугристого торфяника изменения отражаются в виде уплотнения сложения, появления включений НУ, фрагментации растительных остатков. Возможно, отсутствие четких различий в окраске обязано сорбции нефтепродуктов темной торфяной массой, без цементации. Происходит углубление верхней границы мерзлоты в среднем на 7 см.

Разрез заложен на полосе стока нефтепродуктов по склону увала. Модификация микростроения поверхностных горизонтов торфа (0–24 см) заключается в фрагментации и диспергации растительных остатков, неупорядоченности сложения, появлении криотурбированных изогнутых форм, накоплении черных сгустков загрязнителя на отмерших растительных остатках (рис. 5а). С глубиной (24–30 см) отмечаются уплотнение сложения, субпараллельное залегание слоев, появление крупных включений НУ в виде черных сгустков неправильных форм (рис. 5б). Глубже (30–45 см) заметны сильная фрагментация и прокрашивание тканей, черное окаймление срезов корней, увеличение плотности сложения, обособление скоплений темно-коричневых включений в виде сгустков и пятен загрязнителя, заполнение ими полостей (рис. 5в).

Таким образом, профильное распределение техногенных углеводородов в почвах находится в зависимости от гранулометрического состава и структуры, определяющих поровое пространство; циклических криогенных процессов, вызывающих трансформацию и миграцию к фронту промерзания; а также наличия сорбционных, механических и геохимических барьеров. Максимальная концентрация углеводородов после загрязнения наблюдается в верхней части профиля, органических горизонтах, являющихся органико-сорбционным барьером [20]. Остаточное накопление в верхних горизонтах происходит за счет высокомолекулярных продуктов окислительной поликонденсации, смолисто-асфальтеновых веществ, способных цементировать почвенные горизонты, образовывать плотные твердые корки [12]. Легкие фракции, мигрирующие в нижележащие горизонты, длительное время сохраняются в анаэробной обстановке.

Модельными лабораторными экспериментами установлено [3], что перенос нефти в песках определяется структурой порового пространства и действием капиллярных менисковых сил. Очевидно, этим объясняется насыщение слоев грубодисперсного состава, перемежающихся с блокирующими их тонкодисперсными. Темные пятна в нижних горизонтах появляются вследствие заполнения нефтепродуктами различных полостей, трещин, корневых ходов. Отсутствие в некоторых случаях морфологических признаков аккумуляции нефти над экранирующими барьерами (мерзлота, подстилающие суглинки) обусловлено их перераспределением в результате латеральной миграции в соответствии с рельефом, а также движением к фронту промерзания [19].

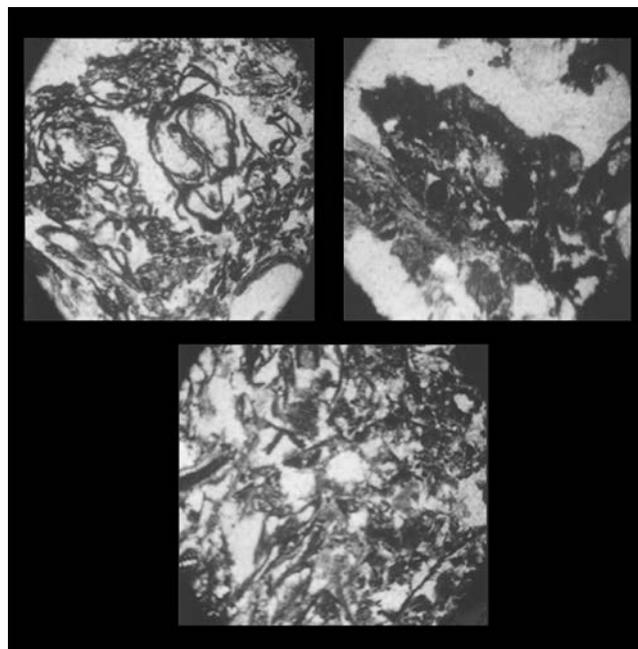


Рис. 5. Микростроение сухоторфяной почвы плоскобугристого торфяника через 20 лет после загрязнения: а – неупорядоченность сложения, криотурбация, пропитка тканей (0–24 см); б – уплотнение сложения, крупные включения загрязнителя (24–30 см); в – скопления темно-коричневых сгустков и пятен загрязнителя (30–45 см).

Достаточно интенсивная трансформация наблюдается в почвах пятен разливов нефти и котлованов-сборников, в которых произошла утрата морфологических признаков генетических горизонтов, уплотнение торфа (с 20 до 4 см).

В суглинистых почвах модификация микростроения является функцией циклов промерзания-оттаивания и концентрации загрязнителя, взаимодействующего с глинистыми минералами [25]. Трансформация микростроения глинистых почв происходит более интенсивно: в связи с миграцией влаги, деформацией порового пространства, разбуханием глин [21], разрушением структуры. Последнее способствует диспергации и миграции тонкодисперсной массы с подвижными НУ, отложению в нижележащих горизонтах в виде однородных глинистых натексов [18]. В течение года после загрязнения происходит физико-химическое, фотохимическое разложение НУ, улетучивание легких фракций, окисление и биodeградация [12]. Замедление этих процессов в последующем, обволакивание почвенных частиц и агрегатов, окисление битуминозных компонентов приводят к образованию твердой непроницаемой поверхностной корки. Заполнение порового пространства почв смолисто-асфальтеновыми компонентами способствует нарушению

водно-воздушного режима и преобладанию восстановительных условий.

Распределение техногенных углеводородов в торфяниках зависит от состояния их насыщенности водой в момент загрязнения, наличия и глубины мерзлоты, рельефа местности. При высоком содержании воды сорбционная емкость торфа ниже [1], а близость мерзлотного барьера способствует латеральному сбрасыванию загрязнений. При низком содержании воды в торфе преобладают абсорбция и гравитационный механизм профильной миграции. Низкая плотность торфа обеспечивает слабую капиллярную проводимость загрязнителей в крупных порах. При возрастании плотности капиллярная проводимость и абсорбция усиливаются, сорбционная емкость достигает максимальных величин [23]. Равномерное распределение нефтепродуктов в плоскобугристом торфянике, очевидно, объясняется насыщенностью водой в момент загрязнения. Загрязнение криогенных почв НУ имеет устойчивый характер ввиду биоклиматических условий, не способствующих быстрому разложению техногенных углеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования криогенных почв, проведенные в природных условиях на территории буровых площадок, позволили установить изменения не только их морфологии и физико-химических свойств при загрязнении нефтепродуктами, но и их микростроения.

Физико-химическое взаимодействие загрязняющих веществ с почвами криолитозоны сопровождается модификацией элементов микростроения вследствие развития комплекса процессов: сорбции, осаждения и диффузии, деформации порового пространства, криогенного разрушения включений загрязнителя и формирования изометричных агрегатов, распада исходной микроструктуры и усиления миграции тонкодисперсной массы, интенсификации глеевых процессов. Следует подчеркнуть значительную роль криогенеза в изменении микростроения. В начальной стадии загрязнения (через 1 год) преобладают процессы сорбции и криогенного измельчения детрита в гор. Т, диффузного проникновения НУ в минеральную толщу. С течением времени (через 20 лет) происходят консервация нефтепродуктов и их изменение под влиянием циклических криогенных процессов, выветривания и почвообразования. Воздействие текстурообразующего льда в загрязненных микроразделах, вызывающее

нарушение пор и каналов, способствует реорганизации и разрушению исходной микроструктуры, выносу тонкодисперсной массы.

Признаки модификации микростроения, последовательно изменяющиеся от верхних горизонтов профиля к нижним, могут служить в качестве диагностических показателей для разных типов криогенных почв, загрязненных нефтепродуктами.

Подзолы и подбуры: 1) фрагменты растительных остатков, пропитанные нефтепродуктами в органогенных горизонтах; 2) черные включения нефтепродуктов, раздробленные на мелкие изометричные отдельности в минеральной толще; 3) светло-коричневые, равномерно пропитанные микрзоны, с отдельными черными сгустками; 4) толстые черные оболочки и двухслойные пленки на зернах скелета; 5) локальная цементация зерен коричневыми нефтепродуктами.

Торфяно-подзолы глеевые: 1) деструкция и диспергация, обволакивание темно-бурым загрязнителем растительных остатков, черные сгустки в пустотах в горизонте торфа; 2) обособления черных включений нефтепродуктов в межскелетном пространстве в минеральной толще; 3) светло-коричневые включения флюидального облика (менее интенсивно окрашенные фракции НУ); 4) обволакивание черным ободком зерен скелета.

Глееземы: 1) измельчение и пропитка растительных остатков, обволакивание агрегатов пленками в органогенных горизонтах; 2) окаймление каналов, пустот, агрегатов и скелетных зерен темно-коричневыми пленками в минеральных горизонтах; 3) диффузное проникновение нефтепродуктов, пропитка агрегатов, образование ореолов и включений; 4) глинистые и Fe-глинистые флюидальные натеки в минеральной толще.

Торфяные почвы плоскобугристых болот: 1) физическая деструкция и криотурбация содержащих нефтепродукты отмерших растений; 2) нарушение исходного строения, фрагментация и уплотнение; 3) аккумуляция черных сгустков включений нефтепродуктов на растительных остатках, в пустотах; 4) черное окаймление фрагментов растений, срезов корней.

Проведенные исследования показали высокую информативность микроморфологического метода анализа и способность диагностировать изменения в криогенных почвах под влиянием загрязнения НУ. Использование микроморфологического метода диагностики (педоиндикация) актуально и перспективно для контроля

изменения почв при проведении мониторинга нефтезагрязненных территорий.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Комплексной программы УрО РАН № 15-12-4-45 “Функционирование и эволюция экосистем криолитозоны европейского северо-востока России в условиях антропогенных воздействий и изменения климата”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Братцев А.П. Поглощение нефти и нефтепродуктов торфяными почвами // Влияние геологоразведочных работ на природную среду Большеземельской тундры. Тр. Коми научного центра УрО АН СССР. № 90. Сыктывкар, 1988. С. 29–35.
2. Бреус И.П., Мищенко А.А., Неклюдов С.А., Бреус В.А. Сорбционная активность почв в отношении углеводородов // Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям: Тез. докл. Всерос. конф. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2002. С. 188–189.
3. Бутылкина М.А. Изучение переноса нефти в песках в лабораторных модельных экспериментах // Тез. докл. междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 11.
4. Губин С.В. Изменение структурной организации материала верхних частей профилей криоземов, загрязненных нефтепродуктами // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 1. С. 38–41.
5. Гусева О.А. Миграционные структуры почвенного покрова как основа оценки поведения битуминозных веществ в ландшафтах // Криопедология'97: Тез. докл. междунар. конф. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 1997. С. 170.
6. Денева С.В., Русанова Г.В. Трансформация нефтезагрязненных почв западного сектора Большеземельской тундры // Консервация и трансформация вещества и энергии в криосфере земли: Тез. докл. междунар. конф. Пушино: Объединенный научный Совет по криологии Земли РАН, 2001. С. 135.
7. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. Лавриненко И.А., Лавриненко О.В., Кулюгина Е.Е. Формирование вторичных растительных сообществ на площадках нефтегазоразведочных скважин в Большеземельской тундре // Сибирский экологический журнал. 1998. № 3–4. С. 275–284.
9. Микляева Е.С. Сезонное промерзание-протаивание почвогрунтов как фактор механического рассеивания нефтезагрязнений в криолитозоне // Приоритетные направления в изучении криосферы Земли: Тез. докл. междунар. конф. Пушино, 2005. С. 64–65.
10. Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. М.: Наука, 1977. 198 с.
11. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 768 с.
12. Пиковский Ю.И. Трансформация техногенных потоков нефти в почвенных экосистемах // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 7–23.
13. Ромашкевич А.И., Герасимова М.И. Микроморфология и диагностика почвообразования. М.: Наука, 1982. 125 с.
14. Русанова Г.В. Микроморфология почв восточно-европейского сектора Субарктики // Почвоведение. 1996. № 6. С. 793–802.
15. Русанова Г.В. Деграция криогенных почв в районах нефтегазоразведочных работ // Почвоведение. 2000. № 2. С. 253–261.
16. Русанова Г.В., Денева С.В. Почвы бассейна р. Хоседа-ю, Большеземельская тундра // Почвоведение. 2006. № 3. С. 261–272.
17. Русанова Г.В., Денева С.В., Шахтарова О.В. Особенности генезиса автоморфных почв северной лесотундры (юго-восток Большеземельской тундры) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 145–155.
18. Солнцева Н.П. Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели) // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 24–37.
19. Солнцева Н.П. Влияние добычи нефти на почвы Большеземельской тундры // Проблемы экологии при разработке нефтяных и газовых месторождений Крайнего Севера. М.: ВНИИГАЗ, 1995. С. 15–54.
20. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 370 с.
21. Chuvilin E.M. Migration of ions of chemical elements in freezing and frozen soils // Polar Record. 1999. V. 35. N 192. P. 59–66.
22. Sadov A.P. Peculiarities of distribution of technogenic hydrocarbons through the vertical profile of peat and tundra gley soils of forest-tundra landscapes in Western Siberia // Proc. Intern. Symp. on physics, chemistry and ecology of seasonally frozen soils. Alaska, 1997. P. 425–430.
23. Solntseva N.P., Guseva O.A. Distribution of oil and oil products in soils of tundra landscapes within the European territory of Russia // Proc. Intern. Symp. on physics, chemistry and ecology of seasonally frozen soils. Univ. of Alaska, Fairbanks, USA, 1997. P. 449–455.
24. White T.L., Coutard J.-P. Modification of silt microstructure by hydrocarbon contamination in freezing ground // Polar record. 1999. V. 35. N 192. P. 41–50.
25. White T.L., Williams P.J. The influence of soil microstructure on hydraulic properties of hydrocarbon-contaminated freezing ground // Polar record. 1999. V. 35. N 192. P. 25–32.

REFERENCES

1. Bratsev A.P. [Absorption of oil and oil products by the peat soils]. *Vliyanie geologorazvedochnykh rabot na prirodnyuyu sredy Bol'shezemel'skoi tundry* [The influence of geological survey on the environment in the Bol'shezemel'skaya tundra]. *Trudy Komi nauchnogo tsentra UrO AN SSSR* [Proc. of the Komi Scientific Center, Ural Branch AS USSR]. Syktyvkar, 1988, no. 90, pp. 29–35 (1988) (in Russian).
2. Breus I.P., Mishchenko A.A., Neklyudov S.A., Breus V.A. [Sorption activity of soils in relation to hydrocarbons]. *Tezisy dokladov Vserossiyskoi konferentsii "Ustoychivost' pochv k yestestvennym i antropogennym vozdeystviyam"* [Book of Abstracts of the All-Russian conf. "Soil resistance to natural and anthropogenic influence"]. Moscow, 2002, pp. 188–189 (in Russian).
3. Butylkina M.A. [The study of oil transfer in sands by laboratory modeling]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoi konferentsii studentov i aspirantov po fundamental'nym naukam* [Book of Abstracts of the Int. conf. of students and post-graduate students in basic sciences]. Moscow, 1996, p. 11 (in Russian).
4. Gubin S.V. *Izmeneniye strukturnoi organizatsii materiala verkhnikh chastei profilei kriozemov, zagryaznennykh nefteproduktami* [Change in the matter fabric arrangement in the upper parts of cryozem profiles polluted by oil products]. *Kriosfera Zemli*, 2005, vol. IX, no. 1, pp. 38–41 (in Russian).
5. Guseva O.A. [Migration structures of the soil cover as the basis for evaluation of the behavior of bituminous materials in landscapes]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoi konferentsii "Kriopedologiya'97"* [Book of Abstracts of the Int. conf. "Cryopedology'97"]. Syktyvkar, 1997, p. 170 (in Russian).
6. Deneva S.V., Rusanova G.V. [Transformation of soils polluted by oil in the west sector of the Bol'shezemel'skaya tundra]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy konferentsii "Konservatsiya i transformatsiya veshchestva i energii v kriosfere Zemli"* [Book of Abstracts of the Int. conf. "Conservation and transformation of substance and energy in the Earth cryosphere"]. Pushchino, 2001, p. 135 (in Russian).
7. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostic of soils in Russia]. Smolensk, Oikumena Publ., 2004, 342 p. (in Russian).
8. Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V., Kulyugina E.E. *Formirovaniye vtorichnykh rastitel'nykh soobshchestv na ploshchadkakh neftegazorazvedochnykh skvazhin v Bol'shezemel'skoi tundre* [Formation of the secondary plant communities in the areas of oil and gas exploring drillholes in the Bol'shezemel'skaya tundra]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1988, no. 3–4, pp. 275–284 (in Russian).
9. Miklyaeva E.S. [Seasonal freezing and thawing of soils as a factor of mechanical diffusion of oil pollution in permafrost zone]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoi konferentsii "Prioritetnyye napravleniya v izuchenii kriosfery Zemli"* [Book of Abstracts of the Int. conf. "Priorities in the study of the Earth cryosphere"]. Pushchino, 2005, pp. 64–65 (in Russian).
10. Parfyonova E.I., Yarilova E.A. *Rukovodstvo k mikromorfologicheskim issledovaniyam v pochvovedenii* [Guide to micromorphological studies in the soil science]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 198 p. (in Russian).
11. Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999, 768 p. (in Russian).
12. Pikovskii Yu.I. *Transformatsiya tekhnogennykh potokov nefiti v pochvennykh ekosistemakh* [Transformation of technogenic flows of oil in soil ecosystems]. *Vosstanovleniye neftezagryaznennykh pochvennykh ekosistem* [Reconstruction of soil ecosystems polluted by oil]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 7–23 (in Russian).
13. Romashkevich A.I., Gerasimova M.I. *Mikromorfologiya i diagnostika pochvoobrazovaniya*. [Micromorphology and diagnostics of soil formation]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 125 p. (in Russian).
14. Rusanova G.V. *Mikromorfologiya pochv vostochno-evropeiskogo sektora Subarktiki* [Soils micromorphology in the east-European sector of the Subarctic]. *Pochvovedenie*, 1996, no. 6, pp. 793–802 (in Russian).
15. Rusanova G.V. *Degradatsiya kriogennykh pochv v raionakh nefterazvedochnykh rabot* [Degradation of the cryogenic soils in oil-exploring districts]. *Pochvovedenie*, 2000, no. 2, pp. 253–261 (in Russian).
16. Rusanova G.V., Deneva S.V. *Pochvy basseina r. Khosedayu, Bol'shezemel'skaya tundra* [Soils of the Khosedayu River basin, the Bol'shezemel'skaya tundra]. *Pochvovedenie*, 2006, no. 3, pp. 261–272 (in Russian).
17. Rusanova G.V., Deneva S.V., Shakhtarova O.V. Specific features of the genesis of automorphic soils of the northern forest-tundra (southeast of the Bol'shezemel'skaya tundra). *Eurasian Soil Science*, 2015, v. 48, no. 3, pp. 128–138. doi: 10.1134/S1064229315020106.
18. Solntseva N.P. *Obshchie zakonomernosti transformatsii pochv v raionakh dobychi nefiti (formy proyavleniya, osnovnye protsessy, modeli)* [General regularities in soil transformation in the districts of oil extraction (forms of occurrence, general processes, models)]. *Vosstanovleniye neftezagryaznennykh pochvennykh ekosistem* [Reconstruction of the soil ecosystems polluted by oil]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 24–37 (in Russian).
19. Solntseva N.P. *Vliyaniye dobychi nefiti na pochvy Bol'shezemel'skoi tundry* [The influence of oil extraction on soils in the Bol'shezemel'skaya tundra]. *Problemy ekologii pri razrabotke neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii Krainego Severa* [Ecological problems in oil and gas fields development in the Far North of Russia]. Moscow, VNIIGAS Publ., 1995, pp. 15–54 (in Russian).
20. Solntseva N.P. *Dobycha nefiti i geokhimiya prirodnykh landshaftov* [Oil extraction and geochemistry of natural

- landscapes], Moscow, Lomonosov Moscow State Univ., 1998. 370 p. (in Russian).
21. Chuvilin E.M. Migration of ions of chemical elements in freezing and frozen soils. *Polar Record*, 1999, vol. 35, no. 192, pp. 59–66.
 22. Sadv A.P. Peculiarities of distribution of technogenic hydrocarbons through the vertical profile of peat and tundra gley soils of forest-tundra landscapes in Western Siberia. Proc. Int. Symp. on physics, chemistry and ecology of seasonally frozen soils. Alaska, 1997, pp. 425–430.
 23. Solntseva N.P., Guseva O.A. Distribution of oil and oil products in soils of tundra landscapes within the European territory of Russia. Proc. Int. Symp. on physics, chemistry and ecology of seasonally frozen soils. Alaska, 1997, pp. 449–455.
 24. White T.L., Coutard J.-P. Modification of silt microstructure by hydrocarbon contamination in freezing ground. *Polar record*. 1999, v. 35, no. 192, pp. 41–50.
 25. White T.L., Williams P.J. The influence of soil microstructure on hydraulic properties of hydrocarbon-contaminated freezing ground // *Polar record*. 1999, v. 35, no. 192, pp. 25–32.

MODIFICATION OF SOIL MICROFABRIC IN PERMAFROST ZONE WITHIN THE OIL AND GAS FIELDS (BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA)

G. V. Rusanova, S. V. Deneva

*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Kommunisticheskaya ul. 28, Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russia.
E-mail: denewa@rambler.ru*

Microfabric of permafrost-affected soils situated within drilling sites at 1 year and 20 years after having been contaminated by oil was studied. The microstructure of cryogenic soil was studied in the northern and southern parts of the Bolshezemelskaya tundra with hummocky to hummocky-undulated relief, continuous and insular distribution of permafrost. Soils in dwarf shrub mossy-lichen tundra are represented by Entic and Haplic Endogleyic Podzols developed on coarse-textured deposits; Gelic-Histic Gleysols, on loamy deposits; and Fibri-Cryic Histosol, on flat and undulating peatland. Background concentration of petroleum hydrocarbons (OH₃) comprises of 1.2–2.2 gkg⁻¹, and it is 10–20 times higher at the drilling sites. One year after the pollution, the seasonal thawing of Histic Gleysols went 14 cm deeper down the soil profile; coagulated aggregates, detritus fragments and pore walls got black films on surface; and dark clots formed in the organic horizon. The gley horizon acquired black aureoles. Twenty years after pollution, the conservation of heavy fractions of petroleum hydrocarbons and cryogenic metamorphism was registered in sandy soils. condensation and accumulation of clots and inclusions in cavities were noted in the peaty soils. In loamy soils, cracks and channels were covered by dark brown films, and argillans and ferriargillans were formed.

Key words: *micromorphological method, petroleum hydrocarbons, permafrost-affected soils, drilling sites, Bolshezemelskaya tundra.*