

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.340 + 631.4/665.6

НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ СЛОЯ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ
И ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
НА ОПЫТНОЙ ПЛОЩАДКЕ „МЫС БОЛВАНСКИЙ“ В УСТЬЕ р. ПЕЧОРА

Г. В. Ананьева, Д. С. Дроздов, А. Инстанес*, Е. М. Чувилин**

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

** Норвежский геотехнический институт, 0806, Осло, Норвегия*

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

В июле 2000 г. в устье р. Печора была оборудована опытная площадка для проведения полевого эксперимента по изучению поведения нефти в деятельном слое и оценке ее проникновения в верхние горизонты многолетнемерзлых пород после поверхностных заливок. Последовательное вскрытие и изучение разрезов пород деятельного слоя через 5 дней, два месяца и 15 месяцев после поверхностного нефтяного загрязнения позволили изучить скорость проникновения нефти в поверхностные отложения при наличии близкозалегающего криогенного водоупора, определить конфигурацию нефтяного пятна, концентрацию нефтепродуктов в различных горизонтах СТС и ММП и их изменение во времени, оценить влияние нефтяного загрязнения на глубину сезонного протаивания.

Многолетнемерзлые породы, деятельный слой, нефтяное загрязнение, концентрация нефтепродуктов, миграция углеводородного загрязнения, глубина протаивания

OIL CONTAMINATION OF THE SEASONALLY THAWED LAYER AND OF THE UPPER HORIZONS
OF PERMAFROST ON THE EXPERIMENTAL SITE „BOLVANSKIY CAPE“, PECHORA RIVER MOUTH

G. V. Ananjeva, D. S. Drozdov, A. Instanes*, E. M. Chuvilin**

Institute of Cryosphere Earth, SB RAS, 625000, Tyumen, P.O. Box 1230, Russia

** Norwegian Geotechnical Institute, 0806 Oslo, P.O.Box 3930, Ullevaal stadion, Norway*

*** Moscow State University, Department of Geology, 119992, Moscow, GSP-2, Leninskie Gory, Russia*

In July 2000 an experimental site was equipped at the Pechora River mouth in order to carry out the field experiment on the oil behavior in the active layer and to estimate the oil penetration into the upper permafrost horizons after the surface oil injection. Active layer profiles were sequentially exposed and investigated for 5 days, 2 months and 15 months after the experiment. This made it possible to study the rate of oil penetration into surface sediments in the presence of an adjacent permafrost aquiclude, to determine oil spot configuration and oil concentration in different horizons of seasonally thawed and permafrost layers and their temporal changes, to evaluate the influence of oil contamination on the seasonally thawed layer thickness.

Permafrost, active layer, oil contamination, oil products concentration, migration of hydrocarbon contamination, depth of thawing

ВВЕДЕНИЕ

Для районов криолитозоны, где осуществляется добыча, хранение и транспортировка нефти, большую актуальность представляют вопросы распространения углеводородного загрязнения в деятельном слое и по поверхности многолетнемерзлых пород (ММП), а также его проникновения и накопления в верхних горизонтах ММП. Несмотря на то, что проблема углеводородного загрязнения криолитозоны интересует многих специалистов (геохимиков, биологов, почвоведов, геоботаников и др.), до настоящего времени

специальному (с геоэкологических позиций) изучению поведения нефти в сезонноталых и мерзлых породах посвящено крайне ограниченное количество работ [Солнцева, 1998; Давиденко, 1998]. Лишь в последнее десятилетие появились отдельные полевые и экспериментальные работы, в которых делаются попытки оценить распространение нефтяного загрязнения в областях криолитозоны. Так, при изучении нефтяных разливов на Аляске Х. Коллинс с соавторами отмечал различия в характере распростра-



Рис. 1. Обзорная карта района работ.

нения нефтяного загрязнения при летнем и зимнем разливах, а также влияние нефтяного загрязнения на геокриологические условия территорий [Collins et al., 1993].

По данным К. Биггера, проводившего изучение нефтяных разливов на территории Канадской Арктики, нефтяное загрязнение проникает не только в породы слоя сезонного оттаивания, но и в нижележащие льдистые мерзлые породы [Bigger, 1995; Bigger et al., 1998].

В последние годы с целью изучения процессов, протекающих при взаимодействии нефти с мерзлыми и промерзающими породами, и выявления основных закономерностей и механизмов переноса нефти в криогенных средах выполнен ряд лабораторных экспериментов [Ершов и др., 1996; Yerzhov et al., 1997; Chuvilin et al., 2001a,b]. Результаты этих исследований создают определенную основу для проведения специального полевого эксперимента, направленного на изучение во времени поведения нефтяного загрязнения в активном слое и верхних горизонтах ММП. Проведение данного полевого эксперимен-

та стало возможным в июле 2000 г. в рамках российско-норвежского сотрудничества на геокриологическом стационаре „Болванский“ в устье р. Печора (рис. 1). Здесь была оборудована опытная площадка, в пределах которой проведены поверхностные нефтяные заливки.

В качестве программы осуществления полевого эксперимента была использована методика, предложенная Н. П. Солнцева [1998]; в технической реализации данной методики принял активное участие студент 3-го курса географического факультета МГУ С. Ю. Ермаков.

Постановка и проведение первого этапа этого эксперимента осуществлялись при непосредственном участии Е. М. Чувилина и А. Инстанеса. Последующие этапы полевого изучения и опробования осуществлялись Г. В. Ананьевой и Д. С. Дроздовым при финансовой поддержке Норвежского геотехнического института.

В задачи полевого эксперимента входило:

— изучение скорости проникновения нефти в отложения слоя сезонного оттаивания;

— наблюдение во времени за характером распределения нефтяного загрязнения в СТС и верхних горизонтах ММП;

— оценка влияния нефтяного загрязнения на глубину сезонного протаивания.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ ОПЫТНОЙ ПЛОЩАДКИ

Для проведения натурального эксперимента по изучению поведения нефти в талых и мерзлых породах в районе распространения многолетне-мерзлых пород (м. Болванский, подзона южной тундры) была выбрана опытная площадка размером 75 × 60 м, расположенная на слабовыпуклой вершине пологого холма, сложенного су-глинистыми отложениями и занятого пятнистой кустарничковой мохово-лишайниковой тундрой (рис. 2).

Инженерно-геокриологические условия дан-ного участка изучались в 1985—1990 гг. при обустройстве геокриологического стационара „Болванский“. Разрез поверхностных отложе-



Рис. 2. Местоположение опытной нефтяной площадки.

ний, характеристика ММП и их основные свой-ства приведены на рис. 3.

Поверхностные отложения представлены среднечетвертичными ледово-морскими песча-

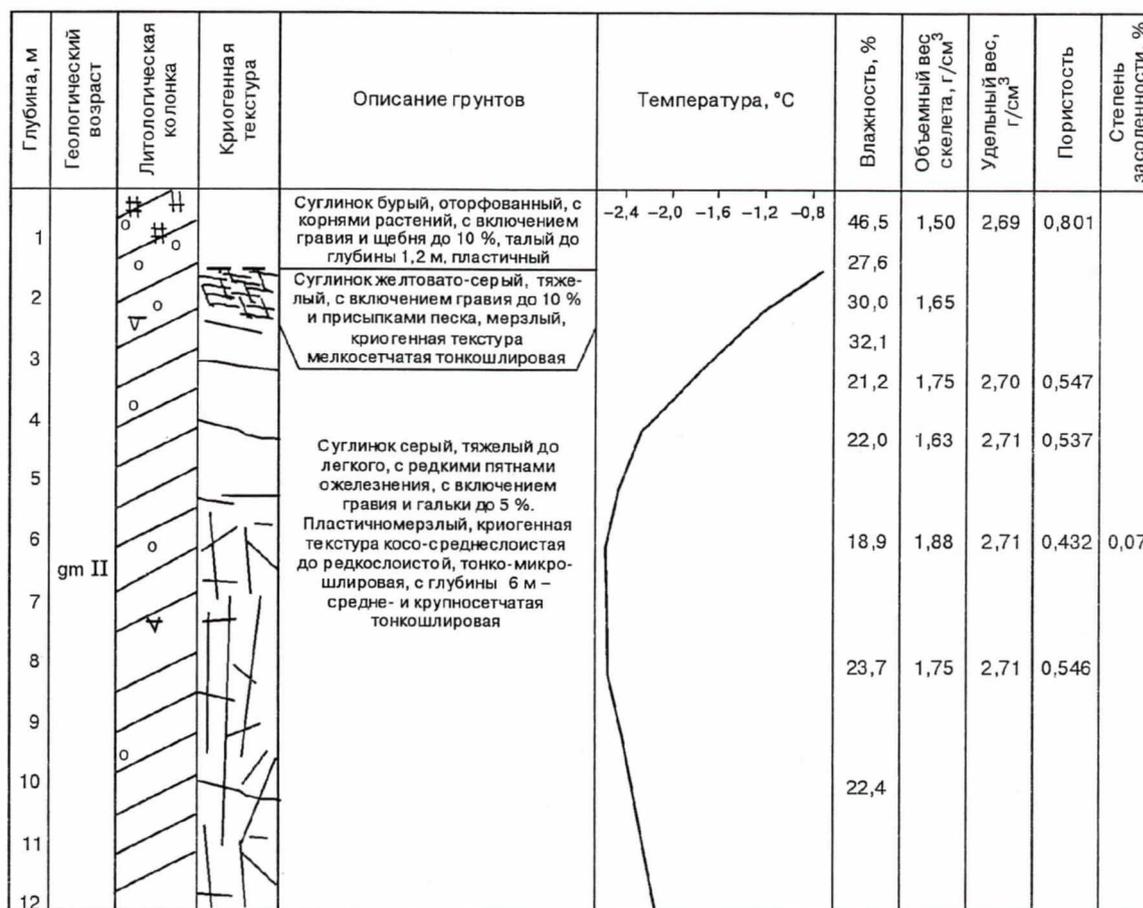


Рис. 3. Инженерно-геокриологическая характеристика поверхностных отложений в районе опытной площадки (абс. отм. 30 м).

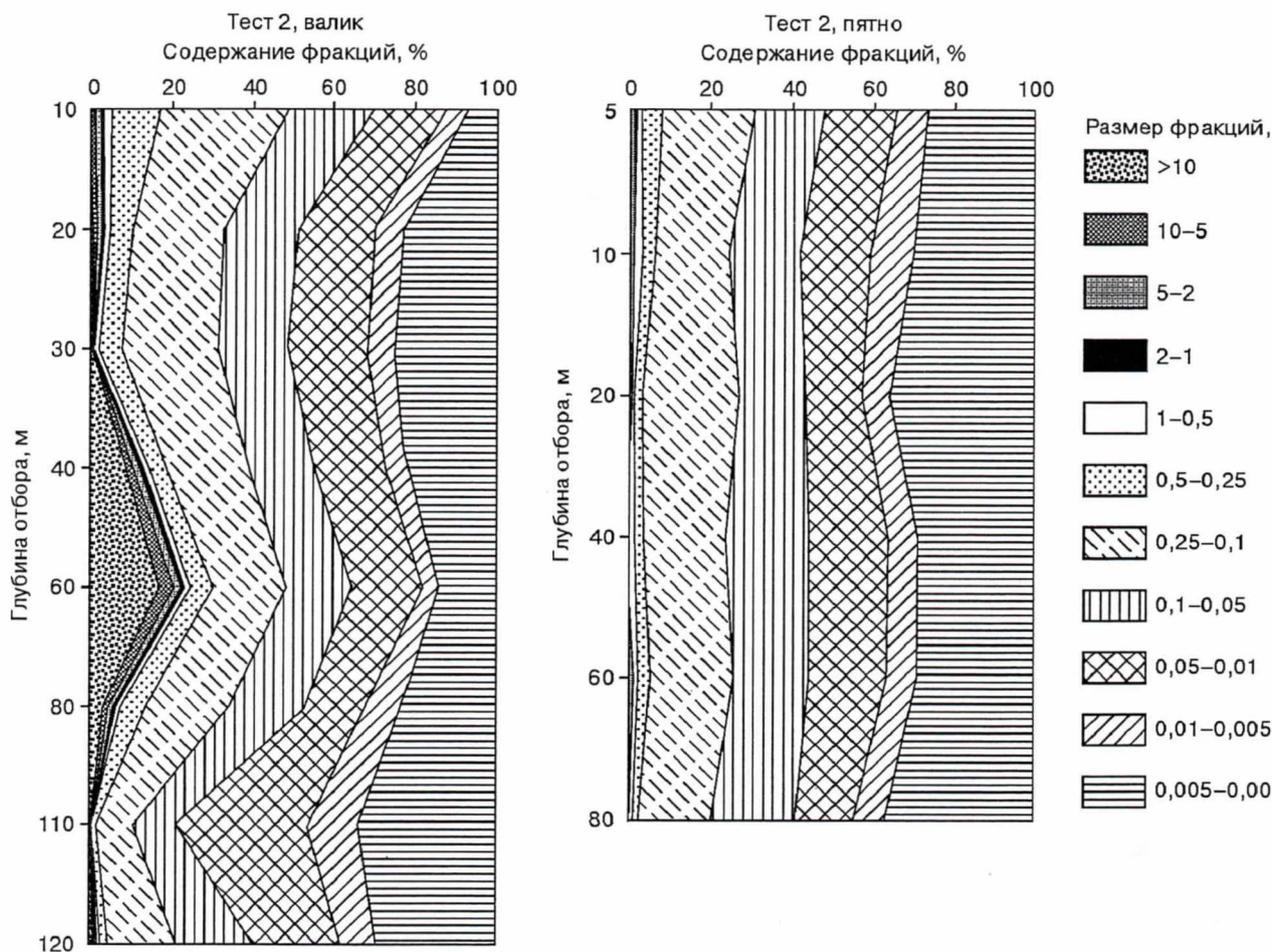


Рис. 4. Гранулометрический состав пород сезонноталого слоя опытной площадки на валике и в пятне-медальоне.

ненными суглинками с включением обломочного материала (5—10 %), с редкими пятнами ожелезнения. В верхней части разреза залегает оторфованный бурый суглинок. Мощность слоя сезонного оттаивания составляет около 1,2 м. Ниже суглинок находится в мерзлом и пластично-мерзлом состоянии. До глубины 2,5 м суглинистые отложения имеют тонкошлировые мелкосетчатые криогенные текстуры, до глубины 6 м характерны тонкошлировые редко- и косо-слоистые, ниже — тонкошлировые средне- и крупносетчатые криогенные текстуры. Суммарная влажность мерзлых грунтов колеблется от 18,9 до 32,1 %, пористость — от 0,43 до 0,55. Наибольшая влажность и пористость наблюдаются у оторфованного суглинка в сезонноталом слое (СТС) — соответственно 46,5 % и 0,80.

По данным многолетних стационарных наблюдений, среднегодовая температура ММП на глубине 10 м в данных ландшафтных условиях

составляет $-2,2$ °С, минимальные температуры пород деятельного слоя на глубине 1 м достигают -11 °С, а средняя температура воздуха самого холодного месяца — $-17,5$ °С.

Более детально разрез пород СТС изучался на нефтяной площадке в ненарушенных условиях. Шурфы, пройденные до поверхности ММП в июле 2000 и в сентябре 2001 г., закладывались поперек пятен и валиков с учетом микрорельефа поверхности.

При описании разрезов пород СТС необходимо обратить внимание на комковатую структуру и микротрещиноватость грунтов в верхних 40—60 см, что является характерным для верхних горизонтов деятельного слоя после оттаивания. Ниже грунты имеют мягкопластичную консистенцию, а на самой границе с ММП — текучую. Породы СТС содержат большое количество крупнообломочного материала — щебня и глыб скальных пород размером до 10—

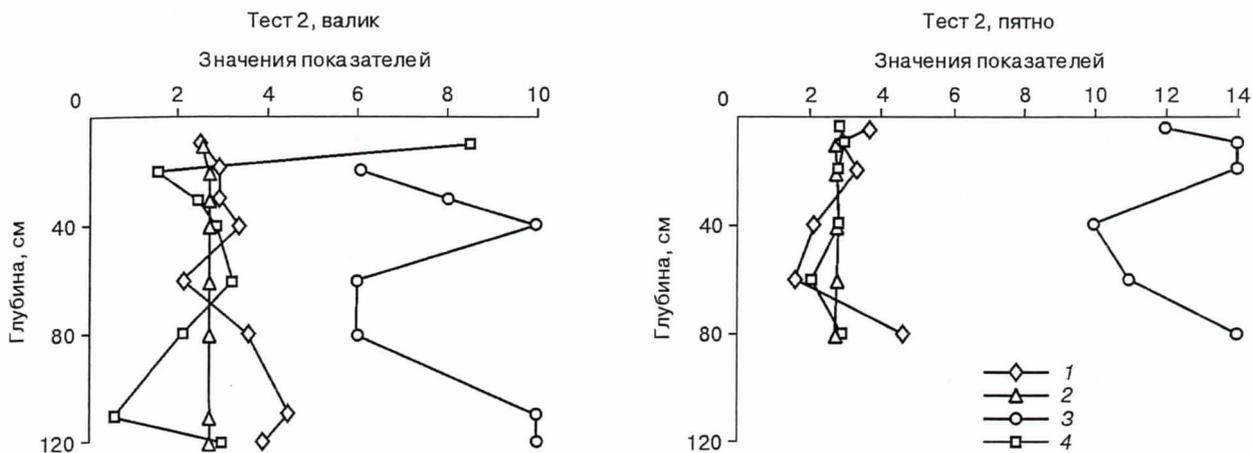


Рис. 5. Результаты определения водно-физических свойств пород сезонноталого слоя в пределах опытной площадки.

1 — гигроскопическая влажность, %; 2 — плотность, г/см³; 3 — число пластичности; 4 — потери при прокаливании, %.

20 см, пронизаны корнями растений, что еще больше разуплотняет породы. В разрезе наблюдаются линзы и косые прослои толщиной до 8 см, которые прослеживаются за счет различного оторфованности или ожелезнения суглинка, иногда встречаются линзы супеси мощностью до 10 см, присыпки пылеватого песка.

Лабораторные анализы показали, что суглинистые отложения слоя сезонного оттаивания характеризуются пестрым гранулометрическим составом, включая валуны и гравийный материал (рис. 4). Несколько лучше отсортированными оказываются грунты в разрезе пятна. Здесь значительно меньше крупнообломочных фракций, но несколько больше глинистых частиц.

Результаты определения водно-физических свойств, показанные на рис. 5, свидетельствуют, что число пластичности пород в образцах разреза валика изменяется от 6 до 10, что соответствует легким суглинкам или тяжелым супесям, в разрезе пятна число пластичности достигает 10—14, что характерно для средних суглинков. Плотность и гигроскопическая влажность пород в разрезе валика и пятна примерно одинаковы. Потеря веса грунта при прокаливании изменяется в зависимости от оторфованности отдельных горизонтов. Этот показатель значительно выше в образцах, отобранных в разрезе валика.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика полевых экспериментальных исследований, принятая в данной работе, основана на методических разработках Н. П. Солнцевой [1998], которые были опробованы ею в раз-

личных регионах и позволяют в полевых условиях изучать процессы переноса и накопления нефти в слое сезонного оттаивания и в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород. В основу этой методики положен принцип налива нефти в специальный прямоугольный контейнер без дна, который устанавливался на поверхности почвы. Контейнер изготовлен из жести, высота боковых стенок составляет 20 см, а площадь основания — 0,2 м². При его установке с поверхности земли снимался растительный покров (по размеру контейнера), затем контейнер врезался в почву на глубину 10 см, чтобы избежать латерального растекания нефти в момент налива (рис. 6). После полного впитывания нефти контейнер вынимался.

Для экспериментальных наливов использовалась нефть Варандейского месторождения, рас-

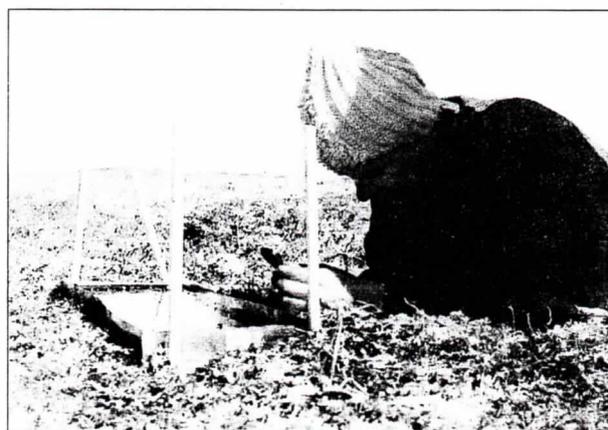


Рис. 6. Наблюдение за проникновением нефти из жестяного контейнера в слой сезонного оттаивания.

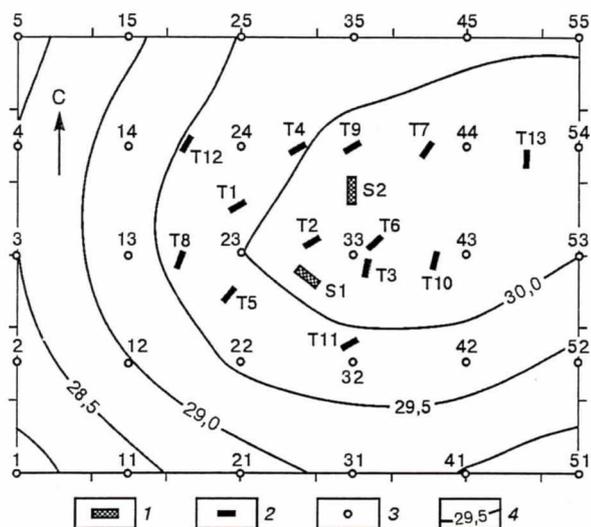


Рис. 7. Схематический план опытной нефтяной площадки размером 75 × 60 м.

1 — шурфы в ненарушенных условиях и их номер, 2 — тесты для налива нефти, их номер, 3 — узловые пикеты нефтяной площадки и их номер, 4 — горизонталы и абс. отм., м.

положенного на побережье Баренцева моря в 150 км к северо-востоку от стационара „Болванский“. Эта нефть легкая: плотность — 0,864 г/см³, вязкость при температуре 20 °С составляет 32 МПа/с, температура начала кипения — 48 °С. По химическому составу нефть на 53 % состоит из алканов, на 40 — из наftenов, 7 % — это ароматические соединения. Нефть Варандейского месторождения имеет низкую температура застывания — -27 °С (при которой нефть теряет подвижность). Таким образом, температурные условия на опытной площадке не могут привести к потере подвижности нефти даже в самый холодный зимний период.

В соответствии с программой полевых экспериментов, в каждый контейнер наливалось по 5, 10 или 20 л нефти. Всего было проведено 13 полевых экспериментов (тестов), общий объем залитой нефти составил 160 л. При плотности, равной 0,864 г/см³, масса нефти, вылитой на 1 м² поверхности, составляла соответственно 21,6, 43,2 и 86,4 кг в каждом тесте.

Схема размещения наливных контейнеров и шурфов для изучения пород СТС показана на рис. 7.

Сразу после налива нефти в почву замеряли общее время просачивания нефти в грунт и скорость ее впитывания. Затем через определенные промежутки времени (через 5, 72 дня, 15 меся-

цев) проводилось опробование слоя сезонного оттаивания и верхних горизонтов ММП для выявления характера распределения нефтяного загрязнения в исследуемой толще. Для этого в пределах слоя сезонного оттаивания выкапывался шурф, а также проводилось бурение с отбором мерзлого керна из верхних горизонтов ММП. В ходе этих работ отбирались пробы для определения основных характеристик грунта (естественная влажность, плотность, водно-физические свойства) и содержания нефтяного загрязнения.

Лабораторные анализы по определению водно-физических свойств отобранных проб пород выполнялись в институтах ВСЕГИНГЕО, ПНИИИС, а определение концентрации нефтепродуктов в грунтах проводилось в МГУ и в институте авиационного моторостроения*.

При изучении нефтяного загрязнения в стенке шурфа слоя сезонного оттаивания использовались также визуальный и органолептический методы определения размеров нефтяного пятна [Солнцева, 1998].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный комплекс полевых работ позволяет проследить кинетику впитывания нефти поверхностными отложениями, а также выявить характер распределения нефти в исследуемой толще на различные моменты времени.

Налив нефти проходил в июле, когда протаивание не достигло своих максимальных величин (к началу проведения опыта — первая декада июля — сезонное протаивание ММП здесь составляло 50—60 см, а максимальное протаивание завершилось в конце сентября и составило 112—120 см). Кроме того, в начале эксперимента породы СТС были еще разуплотнены, имели достаточно высокую пористость и недостаточную обводненность. В связи с этим проникновение нефти в почву имело практически провальный характер с некоторым боковым перетеканием при наличии неровностей рельефа.

Как показали натурные наблюдения, с увеличением объема заливаемой нефти увеличивается общее время просачивания нефти в грунт. Так, время просачивания увеличивается от первых минут при наливае объемом 5 л до 3—4 ч при наливае объемом 20 л. При наливае объемом 5 л практически вся нефть впитывалась мгновенно, т. е. в процессе самого налива. При наливае объемом 10 и 20 л впитывание в процессе налива достигало 30—50 % от объема заливаемой нефти. В первые минуты после налива скорости

* Содействие при заключении договоров на выполнение анализов оказал А. А. Васильев.

впитывания нефти достигали 1—2 см/мин, со временем они падали, а через 30 мин — не превышали 0,15 см/мин.

Изучение и опробование экспериментальных участков после наливов нефти проводилось через 5 дней (в двух тестах), через 2 месяца (в двух тестах) и через 15 месяцев (в трех тестах). Остальные экспериментальные тесты остались пока законсервированными. Их планируется вскрыть и исследовать в последующие годы. Объем залитой нефти и сроки вскрытия тестов приведены в таблице.

В ходе эксперимента последовательно вскрывались тесты с разным объемом залитой нефти, изучалась картина загрязнения сначала по поверхности при снятом растительном покрове, затем по разрезу шурфа. Опробование проводилось из стенок шурфов, а в сентябре 2001 г. еще и по скважинам, пройденным ручным буровым снарядом в пределах экспериментальных тестов.

После изучения и опробования разрезов двух экспериментальных участков (Т1 и Т2) через 5 дней были получены следующие результаты. Содержание нефтепродуктов (отбор проб проводился по центральной оси шурфа) по двум вскрытым разрезам Т1 (объем залитой нефти $V_n = 20$ л) и Т3 ($V_n = 5$ л) в верхних 30 см оказалось практически одинаковым (рис. 8) — 14—20 г/кг (на 1 кг грунта). Далее в пробах, отобранных ниже, на глубине 40 и 50 см в 5-литровом тесте (Т3), идет резкое сокращение содержания нефти до 2—3 г/кг. В 20-литровом тесте (Т1) залитого количества нефти хватило, чтобы пропитать весь активный слой практически до поверхности

Условия проведения полевого эксперимента

Номер экспериментального участка (теста)	Абс. отм., м	Объем залитой нефти, л (июль 2000 г.)	Дата вскрытия шурфа и отбора проб
Шурф-S1	30,11	ненарушенный	июль 2000 г.
Шурф-S2	30,21	ненарушенный	сентябрь 2001 г.
Т1	29,88	20	июль 2000 г.
Т2	30,12	10	сентябрь 2001 г.
Т3	30,21	5	июль 2000 г.
Т4	29,96	20	сентябрь 2000 г.
Т5	29,76	10	*
Т6	30,31	5	сентябрь 2000 г.
Т7	30,24	20	сентябрь 2001 г.
Т8	29,61	10	*
Т9	30,21	5	сентябрь 2001 г.
Т10	30,27	20	*
Т11	29,93	10	*
Т12	29,55	5	*
Т13	30,32	20	*

* Тесты, оставшиеся невскрытыми.

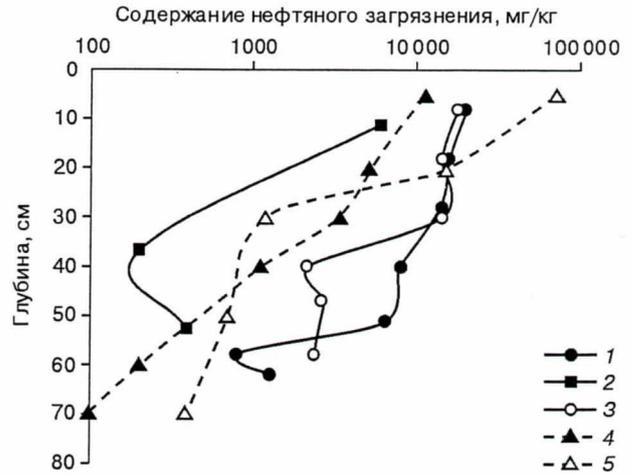


Рис. 8. Изменение содержания нефтяного загрязнения в грунтах СТС по глубине через 5 дней (1—3) и через 2 месяца (4, 5) после начала эксперимента (м. Болванский, июль—сентябрь 2000 г.).

1 — тест 1 (Т1), точка 1, глубина оттаивания $h_{от} = 57$ см, $V_n = 20$; 2 — Т1, точка 2, $h_{от} = 52$ см, $V_n = 20$ л; 3 — Т3, точка 1, $h_{от} = 60$ см, $V_n = 5$ л; 4 — Т4, точка 1, $h_{от} = 106$ см, $V_n = 20$ л; 5 — Т6, точка 1, $h_{от} = 111$ см, $V_n = 5$ л. Отбор проб производился по центру экспериментального участка (шурфа) — точка 1 и по краю — точка 2.

ММП, поэтому резкого изменения содержания нефти на глубинах от 10 до 50 см не происходит (см. рис. 8).

Две последние пробы в 20-литровом тесте и одна нижняя в 5-литровом тесте взяты уже из мерзлого грунтового горизонта, ниже слоя оттаивания. Но и там через 5 дней после начала эксперимента обнаружено присутствие нефтяного загрязнения порядка первых граммов на 1 кг мерзлого грунта. Подобное распределение нефти обусловлено ее достаточно быстрой радиальной миграцией в слое сезонного протаивания и возможностью ее проникновения в нижележащий мерзлый суглинистый грунт.

Несмотря на то, что мерзлый суглинок, подстилающий сезонноталый слой, характеризовался наличием тонкошлировой мелкосетчатой криогенной текстуры, он оказался в некоторой степени проницаемым для нефти. Это, по-видимому, связано с его микротрещиноватостью, возникающей как в процессе промерзания грунта, так и при его нахождении в мерзлом состоянии в условиях возникновения объемно-градиентных температурных напряжений. Однако эта свободная пористость незначительна, что лимитирует накопление нефти в мерзлом горизонте.

Образцы, отобранные в краевой части шурфа в 20-литровом тесте (тест Т1, точка 2) показали значительно меньшее содержание нефти в



Рис. 9. Латеральное растекание нефти фиксируется при снятии растительности.

СТС (см. рис. 8), что позволяет говорить об интенсивном фронтальном проникновении нефти вниз по разрезу в первые дни после начала эксперимента. Быстрому проникновению нефти в активный слой способствовали корни кустарников, включения обломочного материала, разуплотненная комковатая структура пород верхних горизонтов СТС, а также специфическая посткриогенная текстура талого грунта, обусловленная наличием значительной микротрещиноватости и общей пористости.

Латеральное распространение нефти вокруг экспериментального участка в первые дни опыта было крайне ограничено. Оно фиксировалось лишь в 20-литровом тесте и было приурочено к самым верхним оторфованным горизонтам, в которых происходило капиллярное впитывание нефти. По форме нефтяное загрязнение напоминало мешок с отдельными языками, расположенными по ослабленным и разуплотненным зонам (корням растений или опесчаненным линзам и включениям валунов). На поверхности при снятой растительности наблюдалось увеличение площади загрязнения, максимальное — до 40 см от центра теста (только в 20-литровом тесте).

Наблюдения через два месяца (второй этап исследований), к сожалению, не позволили в полной мере изучить картину распространения нефтяного загрязнения. Шурфы, поставленные на экспериментальных участках, с объемом залитой нефти 20 и 5 л, были вскрыты лишь до глубины 70 см, ниже залегал водонасыщенный тиксотропный суглинок. Стенки шурфа до поверхности ММП, залегающей на глубине 105 см, не удалось зачистить, так как шурф заплывал. При

этом нефть со стенок высачивалась и пленкой покрывала дно шурфа.

Все образцы были отобраны из СТС до глубины 80 см. Абсолютный максимум загрязнения через два месяца был обнаружен в 5-литровом тесте на глубине 5 см — 70,8 г/кг грунта. В 20-литровом тесте поверхностные отложения на той же глубине были загрязнены в несколько раз меньше. Подобное различие в содержании нефтепродуктов обусловлено большой неоднородностью самых верхних горизонтов СТС и, в первую очередь, различием в дисперсности и оторфованности. Участок 5-литрового теста, как показали исследования, отличается наличием в верхних 8 см хорошо выраженного оторфованного горизонта, имеющего большую пористость, что способствовало удержанию значительного количества нефти. С нарастанием глубины для обоих тестов характерно значительное уменьшение содержания нефтяного загрязнения до 0,4—0,1 г/кг грунта (см. рис. 8).

При снятии растительного покрова вокруг площадки теста поверхностное пятно загрязнения наблюдалось только в 20-литровом тесте. Через два месяца после залива максимальный радиус пятна от центра составил 140 см и имел направление в сторону микропонижения рельефа (рис. 9).

По стенкам обоих шурфов было видно, что пятно загрязнения имеет неправильную форму. Нефтяные затеки прослеживались в основном по оторфованным горизонтам и по линзам супеси. Своеобразные „ловушки“ нефти образовались под многочисленными включениями обломочного материала. Вокруг них в процессе сезонного промерзания и оттаивания формируются наиболее крупные поры и щели, в которых и происходит аккумулятивное нефтяное загрязнение.

Глубина протаивания на исследуемых участках в сентябре 2000 г. составляла 102—107 см (по шести точкам в пределах Т4) и 110—115 см (по шести точкам в пределах Т6). В ненарушенных условиях (по десяти точкам вне загрязненных тестов) глубина протаивания изменяется от 102 до 115 см. Отсутствие различий глубин оттаивания на ненарушенных и загрязненных нефтью участках на данный момент времени не позволяет точно определить влияние нефтяного загрязнения на величину протаивания. Скорее всего, на данный момент времени нефтяное загрязнение не оказало заметного влияния, возможно, это связано с небольшой площадью загрязнения.

Следующий, третий этап исследования, проходил в сентябре 2001 г., через 15 месяцев после налива нефти. За это время произошло полное

промерзание активного слоя в осенне-зимний период, а затем в летний — его оттаивание.

В этот период были вскрыты три теста: Т9 — 5-литровый, Т2 — 10-литровый и Т7 — 20-литровый. Картина загрязнения в них оказалась следующей. При зачистке поверхности от растительного покрова максимальная площадь загрязнения наблюдалась вокруг 20-литрового теста. Максимальный радиус растекания составил 150 см. На 5-литровом тесте поверхностного загрязнения за пределами прямоугольника не наблюдалось.

Каждый тест опробовался по нескольким разрезам как при проходке шурфа, так и при использовании ручного бурового снаряда. Шурф, как и в прошлый год, заплывал на глубине 70—80 см. Достигнуть поверхности ММП и опробовать грунты удалось только с помощью бурения.

Глубина протаивания исследованных экспериментальных участков в сентябре 2001 г. составляла 105—120 см в пределах нефтяных пятен на разных тестах, а на незагрязненных участках варьировала от 100 до 122 см. Определенного влияния нефтяного загрязнения на глубину сезонного оттаивания опять зафиксировано

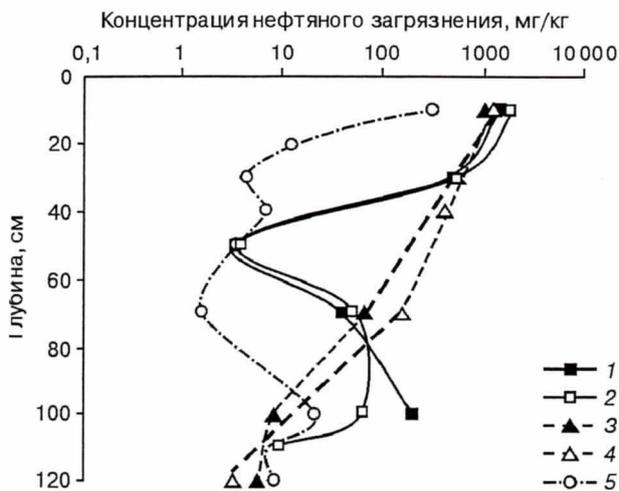


Рис. 10. Изменение содержания нефтяного загрязнения в грунтах по глубине через 15 месяцев после начала эксперимента на экспериментальном участке Т7—20-литровый тест (м. Болванский, сентябрь 2001 г.).

1 — точка 1 в центре теста ($h_{от}=105$ см), загрязненные нефтью грунты отбирались и транспортировались в полиэтиленовых мешочках; 2 — контрольный отбор образцов в точке 1 на тех же глубинах, но в алюминиевые бьюксы; 3 — точка 2 в краевой части теста ($h_{от}=110$ см), образцы отбирались и транспортировались в полиэтиленовых мешочках; 4 — контрольный отбор образцов в точке 2 на тех же глубинах, но в алюминиевые бьюксы; 5 — точка 3 в радиусе 1 м от центра теста ($h_{от}=105$ см).

не было. Некоторый разброс значений глубины протаивания, по-видимому, обусловлен особенностями микрорельефа поверхности и растительного покрова в пределах экспериментальных участков. Как и в прошлом году, нефтяное загрязнение также не оказало заметного влияния на величину сезонного протаивания.

Для всех изученных разрезов характерно в целом быстрое уменьшение общего содержания нефти с глубиной (рис. 10, 11). Однако в ряде точек опробования, как правило по центру шурфа, минимальное содержание нефтяного загрязнения фиксировалось в средней части слоя сезонного оттаивания. При этом по направлению к кровле и подошве слоя сезонного оттаивания характерно повышение содержания нефти. Подобное распределение загрязнения, по-видимому, связано с влиянием процессов сезонного промерзания и протаивания, которые, как показывают лабораторные эксперименты, могут существенно перераспределять углеводородное загрязнение в породах [Chuvilin et al., 2001b]. Максимальное содержание нефтепродуктов наблюдалось в самых верхних горизонтах: от 1—3 до 10 г/кг. Это в целом меньше на один порядок, чем в предыдущий год опробования на аналогичной глубине. Общий характер нефтяного загрязнения также оказался аналогичным. Повышение содержания нефти в грунтах наблюдается в оторфованных горизонтах, супесях, а также в суглинке с включениями обломочного материала. На границе с ММП часто наблюдается

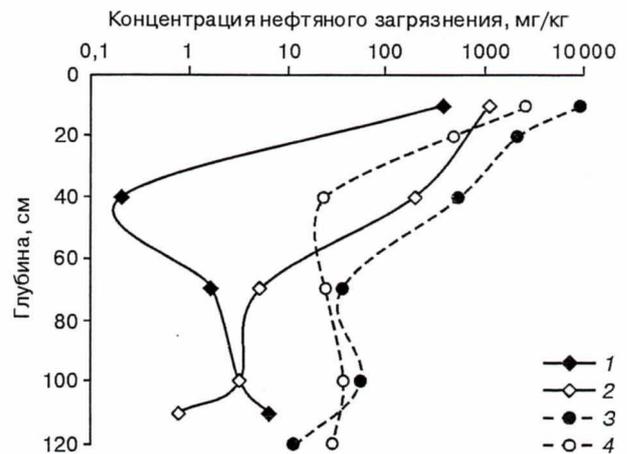


Рис. 11. Изменение содержания нефтяного загрязнения в грунтах по глубине через 15 месяцев после начала эксперимента на экспериментальных участках Т2 и Т9 (м. Болванский, сентябрь 2001 г.).

1 — Т2, точка 1 в центре теста, $V_H = 10$ л, $h_{от} = 105$ см; 2 — Т2, точка 2 в краевой части теста, $V_H = 10$ л, $h_{от} = 105$ см; 3 — Т9, точка 1 в центре теста, $V_H = 5$ л, $h_{от} = 110$ см; 4 — Т9, точка 2 в краевой части теста, $V_H = 5$ л, $h_{от} = 110$ см.



Рис. 12. Характер распределения содержания нефтяного загрязнения в грунтах по глубине на различные моменты времени на экспериментальных участках № 3, 6 и 9.

Тесты 5-литровые, отбор проб проводился по центру экспериментальных участков (шурфов).
 1 — период времени 5 дней, Т3, $h_{от} = 60$ см; 2 — 2 мес., Т6, $h_{от} = 111$ см; 3 — 15 мес., Т9, $h_{от} = 110$ см.



Рис. 13. Характер распределения содержания нефтяного загрязнения в грунтах по глубине на различные моменты времени на экспериментальных участках № 1, 4 и 7.

Тесты 20-литровые, отбор проб проводился по центру экспериментальных участков (шурфов).
 1 — 5 дней, Т1, $h_{от} = 57$ см; 2 — 2 мес., Т4, $h_{от} = 106$ см; 3 — 15 мес., Т7, $h_{от} = 105$ см.

некоторое увеличение концентрации нефти, свидетельствующее о том, что граница сезонного оттаивания является определенным барьером, однако в мерзлых горизонтах также фиксируются нефтепродукты (см. рис. 10, 11). Хотя их концентрация там оказывается на порядок меньше, есть основания говорить о переносе и рассеивании нефтяного загрязнения в собственно мерзлых породах.

В целом для всех горизонтов по глубине характерно значительно меньшее (на один или два порядка) содержание нефтяного загрязнения, по сравнению с первым годом (рис. 12, 13).

Снижение содержания нефти в исследуемой грунтовой толще обусловлено, по-видимому, несколькими причинами: во-первых, испарением легких летучих компонентов нефти, на что указывает резкое снижение через год в нефтяном загрязнении легких фракций нефти; во-вторых, существенным латеральным растеканием нефти под воздействием гравитационных и поверхностных сил. Немаловажное влияние на распределение нефти в СТС оказали атмосферные осадки, а также процессы промерзания и протаивания. Кроме того, определенную роль в снижении содержания нефти сыграли и биодegradационные процессы. Что касается многолетнемерзлых пород: хотя они и являются определенным барьером на пути движения нефти, однако также способны аккумулировать и рассеивать углеводородное загрязнение в своей толще. В ходе дальнейших полевых исследований планируется провести изучение нефтяного загрязнения пород активного слоя не только вблизи экспериментальных участков, но и на различном удалении от них, что позволит оценить степень латерального загрязнения в пределах всей площадки. Кроме того, будут опробованы более глубокие горизонты ММП, что позволит говорить о масштабах нефтяного загрязнения многолетнемерзлых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании первых данных, полученных в рамках полевого эксперимента по изучению распределения нефти, можно сделать следующие выводы.

1. При летнем нефтяном разливе в области распространения вечной мерзлоты происходит загрязнение как талых, так и мерзлых пород деятельного слоя, а также верхних горизонтов многолетнемерзлых пород. Уже через 5 дней после начала эксперимента нефтяное загрязнение проникает на всю глубину слоя сезонного оттаивания и фиксируется в верхних горизонтах ММП. С увеличением объема разливаемой нефти наблюдается увеличение продолжительности

впитывания нефти в грунт, однако глубина проникновения изменяется незначительно.

2. После разлива нефти на поверхности грунта сначала преобладает фронтальная миграция нефти вниз, по истечению некоторого времени (более месяца) в талых породах слоя сезонного оттаивания начинает преобладать латеральная миграция нефти.

3. Высокие скорости проникновения нефти в грунт, а также визуальное описание распределения нефти свидетельствуют о сильном влиянии состава и структурно-текстурных особенностей талых пород (в том числе посткриогенных текстур, обуславливающих значительную микро-трещиноватость) на миграцию нефти в породах СТС.

4. Содержание нефтяного загрязнения в активном слое с течением времени постепенно уменьшается вследствие процессов переноса и трансформации углеводородов. Так, через год после экспериментального налива нефти ее содержание в толще пород СТС уменьшилось на порядок.

Литература

Давиденко Н.М. Проблемы экологии нефтегазоносных и горнодобывающих регионов севера России. Новосибирск, Наука, 1998, 223 с.

Ершов Э.Д., Чувилин Е.М., Смирнова О.Г., Налетова Н.С. Экспериментальные исследования взаимодействия нефти с криогенными породами // *Материалы Первой конф. геокриологов России*. Кн. 2. М., 1996, с. 298—320.

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

Biggar K.W. The effects of petroleum spills on permafrost // *Hydrocarbon Remediation in Cold and Arctic Climates: Proc. of 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., Haidar S., Nahir M., Jarrett P.M. Site investigations of fuel spill migration into permafrost // *J. Cold Regions Eng.*, 1998, 12 (2), p. 84—104.

Chuvilin E.M., Naletova N.S., Miklyaeva E.S., Kozlova E.V. Factors affecting spreadability and transportation of oil in regions of frozen ground // *Polar Record*, 2001a, vol. 37, No. 202, p. 229—238.

Chuvilin E.M., Miklyaeva E.S., Kozlova E.V. et al. Influence of freezing on accumulation and redistribution of hydrocarbon in soils. Assessment and Remediation of Contaminated Sites in Arctic and Cold Climates. Edmonton, Delta Edmonton South, 2001b, p. 267—272.

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 Reg. Res. and Eng. Laboratory, 1993 (CRREL Report 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
5 ноября 2002 г.