

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 551.345

**РОЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
В ФОРМИРОВАНИИ АКУСТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТОВ**

**Ю.А. Нефедьева, Р.Г. Мотенко, Ю.Д. Зыков**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии,  
119992, Москва, Воробьевы горы, nefedjeva21j@rambler.ru*

Рассматриваются результаты исследований зависимости теплофизических, акустических и электрических свойств мерзлых грунтов разного гранулометрического состава от степени и продолжительности их нефтяного загрязнения. Изменения исследуемых характеристик во времени сопоставлены с составом нефти; показана их тесная связь между собой, что стало определяющим при выявлении роли трансформации нефти в формировании изучаемых свойств.

*Промерзающие грунты, нефтяное загрязнение, коэффициент теплопроводности, удельное электрическое сопротивление, скорость продольных волн*

**ROLE OF TRANSFORMATION OF PETROLEUM POLLUTION IN FORMATION OF ACOUSTIC,  
ELECTRIC AND THERMAL PROPERTIES OF FREEZING SOILS**

**Yu.A. Nefedjeva, R.G. Motenko, Yu.D. Zykov**

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology,  
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, nefedjeva21j@rambler.ru*

Results of researches of dependence of the thermal, acoustic and electric properties of the frozen ground of different grain size on the degree of their petroleum pollution and its duration are considered. The temporal changes of the investigated characteristics are compared with the composition of petroleum; the correlation of characteristics is demonstrated, and this fact plays the main role in the influence of petroleum transformation upon the formation of properties under study.

*Freezing ground, petroleum pollution, thermal conductivity, specific electric resistance, speed of longitudinal waves*

**ВВЕДЕНИЕ**

Активное развитие нефтедобывающей промышленности приводит к существенному увеличению территорий, отводимых для освоения нефтяных месторождений. При этом на первый план выступает углеводородная опасность, которая является следствием разливов нефти и нефтепродуктов при их добыче, хранении, транспортировке и переработке.

Предметом исследований, результаты которых рассматриваются в статье, были теплофизические характеристики, электрические и акустические свойства нефтезагрязненных грунтов.

Теплофизические характеристики входят в расчетные формулы для нахождения температурного поля, теплототоков, глубины сезонного оттаивания и промерзания, знание этих свойств необходи-

мо при строительстве инженерных сооружений. Кроме того, теплофизические характеристики могут быть использованы для исследования и косвенных оценок изменения состава и строения пород в различных криогенных процессах и явлениях. Однако их определение в полевых условиях часто бывает затруднительным.

Геофизические же методы в полевых условиях успешно применяются для оконтуривания областей загрязнения нефтью и приблизительной оценки степени загрязнения грунтов [Геоэкологическое..., 1999; Пустозеров, 2001]. Из всего комплекса геофизических методов основными при исследовании мерзлых и промерзающих пород являются электрические и сейсмоакустические методы. Поэтому с практической точки зрения возможность прогно-

зирования поведения одних физических свойств загрязненных грунтов на основе других представляется весьма перспективной.

Однако работ по данной проблеме для криолитозоны очень мало, хотя именно к криолитозоне приурочено огромное количество нефтегазовых месторождений [Вечная..., 2002]. Большинство лабораторных исследований, которые были направлены на изучение влияния нефти на теплофизические, электрические и акустические свойства мерзлых и промерзающих грунтов, выполнялись на образцах нарушенного сложения. При этом грунты загрязнялись непосредственно перед проведением эксперимента [Зыков и др., 2002; Анисимова и др., 2003; Журавлев и др., 2005; Мотенко и др., 2006]. Тот факт, что в естественных условиях состав нефти изменяется со временем, не учитывался. Не было ясно, как соотносятся полученные результаты с тем, что происходит в природных условиях, так как процессы деградации загрязнителей в грунтах осуществляются на фоне их активного взаимодействия с грунтовой массой. Это приводит к направленному изменению свойств грунтов, которое может быть растянуто во времени не только в результате постепенного проникновения нефти и нефтепродуктов в породы, но и в результате их трансформации.

Для выявления роли трансформации нефти в формировании изучаемых свойств было проведено:

- 1) исследование теплофизических, электрических и акустических свойств нефтезагрязненных грунтов в зависимости от содержания загрязнения и времени его трансформации в талом и мерзлом состоянии;
- 2) исследование количественных и качественных изменений нефти во время ее преобразования;
- 3) сопоставление изменения изучаемых характеристик грунтов с составом нефти в зависимости от времени ее трансформации.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом выполненных исследований являлись дисперсные грунты разного гранулометрического состава, отобранные из слоя сезонного промерзания в районе одного из нефтяных месторождений Республики Татарстан в местах порывов нефтепроводов и складирования нефтезагрязненного грунта с различной периодичностью после разлива, и аналогичные им образцы, искусственно приготовленные из грунтовой массы с того же месторождения и загрязненные той же нефтью. Последние имитировали “свежий разлив”. Гранулометрический и микроагрегатный составы исследуемых грунтов представлены в таблице.

Для проведения искусственного загрязнения грунтов использовалась нефть того же месторождения. По своим свойствам она относится к маловязким сернистым, смолистым разностям. Плотность ее 0,837 г/см<sup>3</sup>, вязкость при 20 °С – 19,5сп, температура застывания –23 °С. В ее групповом составе преобладают нафтеновые углеводороды (УВ). Доля нафтеноароматической фракции составляет 40,6 %, метановых УВ – 27,1 %, асфальтенов – 3,8 %, смол бензолных –11,5 %, спиртобензолных –16 %.

Подготовка грунтов нарушенного сложения велась по отработанной на кафедре геоэкологии методике, позволяющей получить влажные нефтезагрязненные образцы с однородным распределением влажности, плотности и нефтесодержания. Грунты естественного и нарушенного сложения исследовались в диапазоне влажности 21–24 % и плотности скелета грунта 1,5–1,6 г/см<sup>3</sup>. Содержание загрязнителя (z, %) рассчитывалось как отношение массы нефти или нефтепродукта к массе сухого грунта. Диапазон загрязнения 0–16 %.

Образцы естественного сложения вырезались непосредственно из монолитов в формы, размеры которых определялись технологией и методикой проведения экспериментов. Для теплофизических исследований использовались цилиндрические

Гранулометрический и микроагрегатный состав исследуемых грунтов

Номер образца	Содержание частиц в каждой фракции, %								Наименование грунтов*	Загрязнение, %
	Диаметр частиц, мм									
	1,0–0,5	0,50–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001		
1	1/2	26/35	34/21	9/12	10/18	9/2	3/5	8/5	Суглинок	0
2	1/1	5/33	32/18	28/22	17/13	6/8	3/0	8/5	«	0,38
3	6/1	16/10	4/41	4/2	35/15	0/13	16/10	19/8	Суглинок средний	0
4	1/2	21/11	11/24	4/10	23/28	8/5	12/12	20/8	То же	0,25
5	1/0	3/12	11/16	13/0	36/31	10/7	0/0	26/34	«	0,60
6	2/1	15/14	12/20	3/29	35/18	0/2	10/7	23/9	«	0,55

\* По классификации Н.А. Качинского.

Примечание. Числитель – данные гранулометрического анализа, знаменатель – данные микроагрегатного анализа.

формы диаметром 3 см и высотой 4 см, для геофизических исследований – диаметром 10 см и высотой 7 см.

Измерения удельных электрических сопротивлений (УЭС) осуществлялись на низкочастотном переменном токе четырехэлектродной установкой. Для измерений была изготовлена специальная пластина из оргстекла, в которую было вмонтировано восемь посеребренных электродов. Пластина, по сути, представляла две четырехэлектродные установки, расположенные ортогонально (для двух независимых определений и тем самым для повышения точности эксперимента). Она переносилась с одного исследуемого образца на другой. Измерения проводились в цикле оттаивания при ступенчатом повышении температуры, шаг которого составлял  $\sim 5^\circ\text{C}$ . В температурных интервалах, соответствующих активным фазовым переходам, температурный шаг наблюдений сокращался до  $0,5^\circ\text{C}$ . При каждой температуре образцы выстаивались не менее 4 ч с целью выравнивания и равномерного распределения в них температурного поля. Для исследования в области отрицательных температур образцы промораживались при температуре  $-28^\circ\text{C}$ . Это обеспечивало формирование в них массивной криогенной текстуры и исключало миграцию влаги.

Измерения скоростей распространения упругих продольных волн выполнялись путем прозвучивания цилиндрических образцов на приборе УКБ-1М с пьезопреобразователями 60 и 150 кГц. Грунты в специальных обоймах, обеспечивающих хороший акустический контакт с пьезопреобразователями, помещались в холодильный шкаф. Для оптимального контакта пьезоэлектрических датчиков с грунтом использовалась незамерзающая смазка (солидол).

Одновременно с геофизическими исследованиями проводилось определение теплофизических характеристик тех же грунтов. Для этого применялся метод регулярного режима первого рода, основанный на нагревании или охлаждении тела в среде с постоянной температурой [*Лабораторные...*, 2003].

Эксперименты проводились на двух образцах “близнецах” с двукратной повторностью. Осреднение для одной точки – четырехкратное. Влажность и плотность образцов определялись весовым способом после окончания эксперимента.

Изменения продуктов нефтяного загрязнения фиксировались в двух направлениях – определялись количественные и качественные характеристики нефти, содержащейся в грунтах естественного сложения. Количество нефти в грунтах было определено методом холодной экстракции. Качественные изменения продуктов нефтяного загрязнения регистрировались по данным группового состава методом элюентной хроматографии [*Соболева, Гусева, 2004*].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определения содержания нефти в грунтах естественного сложения показали, что в местах однократных проливов в супеси через 3 года на одной и той же глубине степень загрязнения нефтью составляла 1,5 %, через 5 лет – 0,38 %; в суглинке через 3 года после разлива – 1 %, через 5 лет – 0,25 и 0,6 %, через 15 лет – 0,5 %.

Из проведенных исследований следует, что групповой состав нефти в грунтах естественного сложения значительно изменяется по сравнению с составом исходной нефти (рис. 1). Общая направленность изменения продуктов нефтезагрязнения укладывается в общепринятые представления о деградации нефти [*Пиковский, 1988*] и выражается в увеличении содержания смолисто-асфальтеновых компонентов и уменьшении содержания масел по сравнению с исходной нефтью.

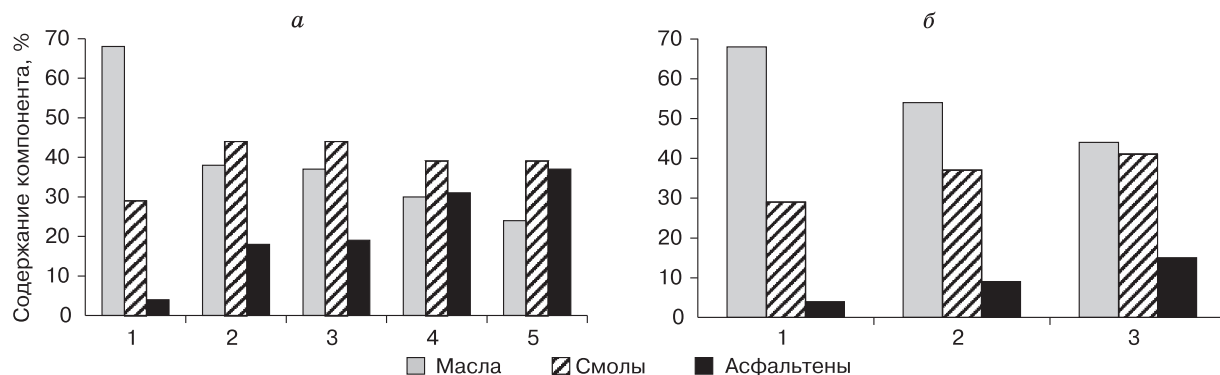
При однократных разливах наибольшие изменения происходят в суглинке. Уже за три года содержание масляных компонентов в нем уменьшается, а смолисто-асфальтеновых – увеличивается практически в 2 раза. Групповой состав нефти в суглинке, подвергавшийся 15-летней трансформации, претерпел наибольшие изменения: содержание масел в ней по сравнению с исходной нефтью уменьшилось в 2,8 раза, а содержание смол и асфальтенов увеличилось в 1,4 и 10 раз соответственно (см. рис. 1, а).

В супеси после пятилетней трансформации содержание масел уменьшилось на треть, а содержание асфальтенов увеличилось приблизительно в 3 раза (см. рис. 1, б).

Полученные различия в изменении состава нефти в грунтах разного гранулометрического состава, по-видимому, связаны с оторфованностью супеси, что определяет ее большую поглотительную способность и меньшее изменение в составе нефти.

Результаты теплофизических и геофизических исследований представлены на рис. 2 в виде температурных зависимостей коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ), удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и скорости продольных волн ( $V_p$ ), полученных для грунтов разного гранулометрического состава различной давности и преобразования нефтяного загрязнения.

На рис. 2, в, г видно, что нефтяное загрязнение снижает удельное электрическое сопротивление в грунтах естественного сложения, содержащих нефть с длительностью преобразования 3, 5 и 15 лет. В мерзлом состоянии это снижение достаточно значительное, как в супеси, так и в суглинке оно составляет  $\sim 5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  спустя 5 лет после загрязнения даже при достаточно небольших значениях  $z$ .



**Рис. 1. Гистограммы распределения по групповому составу нефти и нефтепродуктов в суглинке (а) и супеси (б) в зависимости от времени трансформации:**

1 – в момент разлива, 2 – через 3 года, 3, 4 – через 5 лет, 5 – через 15 лет.

Как известно, нефть является изолятором, и добавление ее в грунт, по первым представлениям, должно приводить к повышению УЭС. Однако данное исследование проводилось только на образцах естественного сложения, в которых нефть претерпевала преобразование. В процессе своего разложения нефть подвергается окисляющему действию бактерий, что изменяет рН порового раствора грунта. Видимо, чем дольше идет преобразование нефти, тем больше окисляется грунт, вызывая большее понижение УЭС. Поэтому при значительной длительности трансформации (пять и более лет) даже при  $z = 0,38$  и  $0,6$  % УЭС и в супеси, и в суглинке будет ниже, чем при больших значениях  $z$  в грунтах с меньшей длительностью преобразования нефти.

В талом же состоянии снижение УЭС в грунтах проявляется не столь резко.

Температурные кривые  $V_p(t)$ , представленные на рис. 2, д, е, показывают, что скорость упругих волн при нефтяном загрязнении снижается в грунтах как нарушенного, так и естественного сложения.

В мерзлых супесях и суглинках искусственного загрязнения при степени загрязнения нефтью 2,5 % скорость прохождения продольных волн уменьшается на 450–500 м/с. В талом состоянии снижение менее значительное – 70–80 м/с. Аналогичное снижение скоростей было получено и для песков и глин нарушенного сложения при той же степени загрязнения нефтью в ранее проведенных экспериментах [Анисимова и др., 2003].

В мерзлой супеси с естественной трансформацией нефти зафиксированы наибольшие изменения. Спустя 3 года после разлива нефти при  $z = 1,5$  % скорость продольных волн снижается на 950 м/с, а спустя 5 лет после разлива даже при  $z = 0,38$  % она уменьшается на 1200 м/с.

В мерзлом суглинке естественного сложения, где трансформация длилась 3 года, при  $z = 1$  % величина  $V_p$  уменьшается на 650 м/с, через 5 лет трансформации при  $z = 0,6$  % – на 800 м/с.

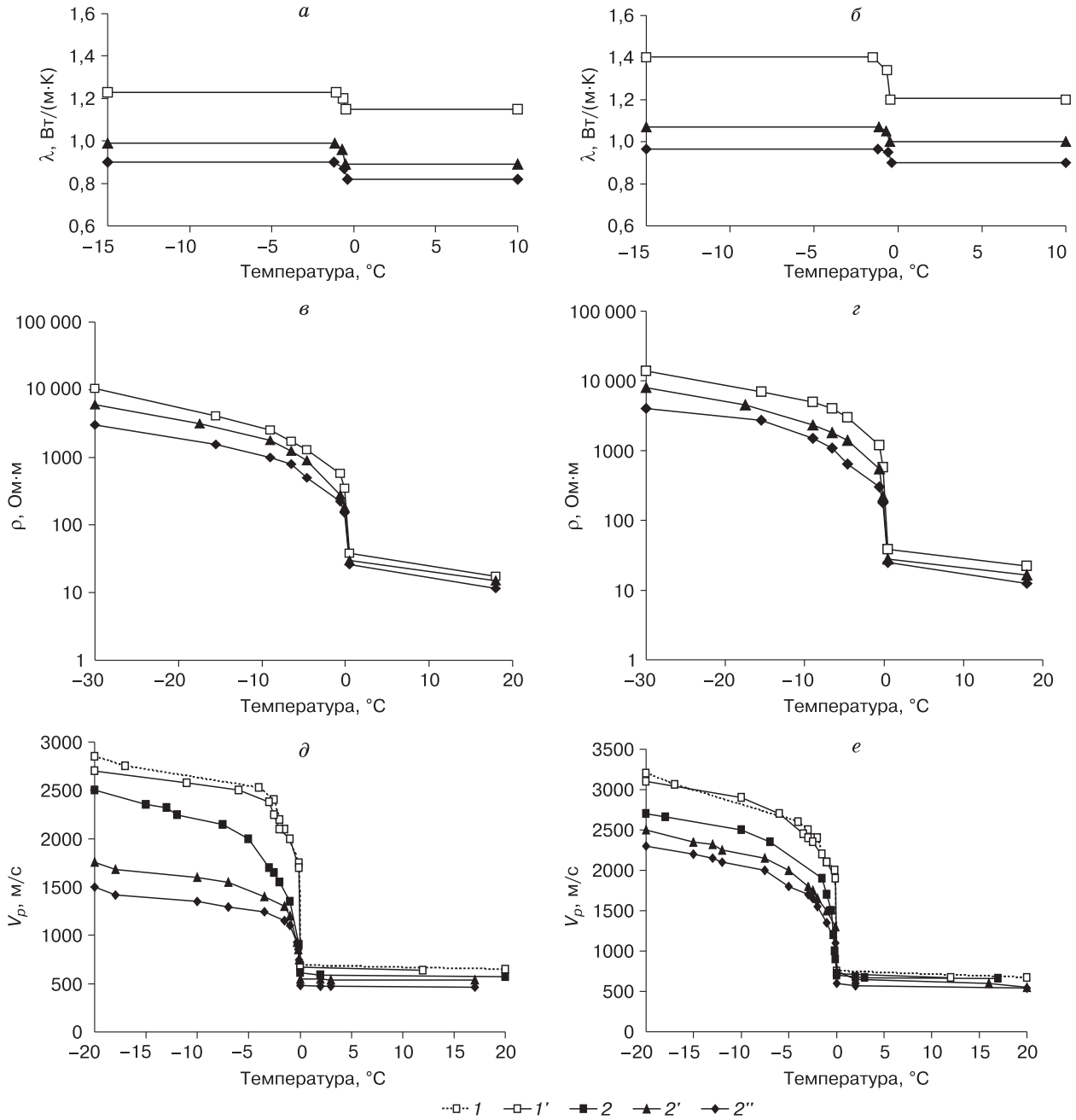
В талом состоянии изменения оказались менее существенными.

По-видимому, при добавлении нефти в грунт образуются прослойки с более низкоскоростными характеристиками. При дальнейшей трансформации нефти происходит ряд процессов, снижающих скорость упругих волн: изменение в грунте размеров микроагрегатов, увеличение толщины и плотности пленки вокруг частиц, изменение пространственного положения воды, нефти и текстуры льда, окисление грунта бактериями.

На рис. 3 представлены результаты исследования коэффициента теплопроводности нефтезагрязненных грунтов с различной длительностью преобразования нефти. Из рисунка видно, что нефтяное загрязнение понижает теплопроводность для всех грунтов во всем диапазоне загрязнения.

В грунтах искусственного загрязнения как в талом, так и в мерзлом состоянии при  $z = 10$  % коэффициент  $\lambda$  суглинка и супеси уменьшается в 1,4 раза. Проведенные ранее экспериментальные исследования теплофизических свойств нефтезагрязненных песков и глин нарушенного сложения и искусственного загрязнения [Журавлев и др., 2005] показали аналогичное снижение (10–15 % по сравнению с незагрязненными грунтами).

В грунтах с естественной трансформацией нефти в местах однократного разлива после 5 лет преобразования при достаточно небольшой степени загрязнения нефтью (0,38 % в супеси, 0,25 и 0,6 % в суглинке) теплопроводность понизилась на столько же и даже больше, чем в грунтах с искусственным загрязнением при  $z = 10$  %. В суглинке при доста-



**Рис. 2. Зависимость теплопроводности (*a, б*), удельного электрического сопротивления (*в, г*) и скорости продольных волн (*д, е*) от температуры в супеси (*a, в, д*) и суглинке (*б, г, е*) нарушенного (*1, 2*) и естественного (*1', 2', 2''*) сложения и загрязнения:**

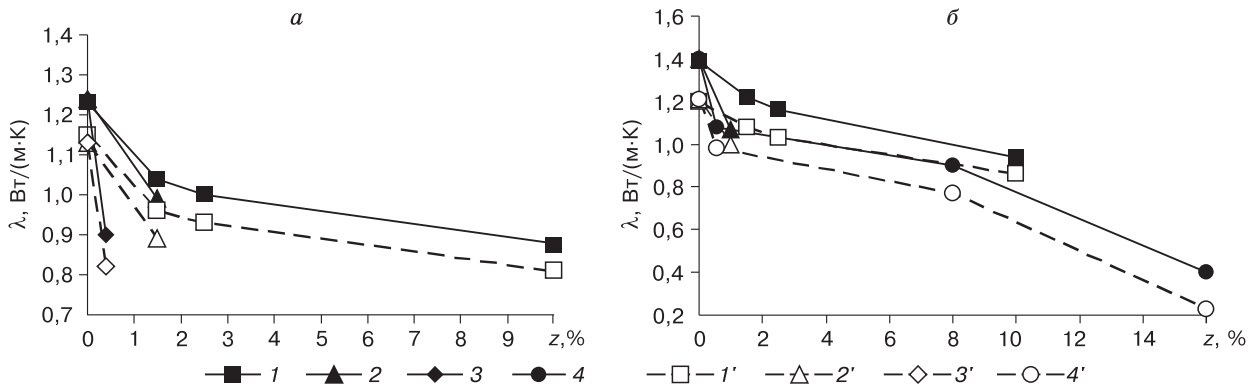
*1, 1'* – без загрязнения, *2* – с искусственным загрязнением 2,5 %, *2'* – через 3 года, *2''* – через 5 лет.

точно большом загрязнении (16 %) и длительной трансформации нефти (15 лет) коэффициент теплопроводности уменьшился более чем в 3 раза по сравнению с чистым грунтом.

Наличие низкотеплопроводной нефти, изменение микроагрегатного состава грунта и утолщение нефтяной пленки между частицами вызывают

дополнительное термическое сопротивление, изменяя количество и качество коагуляционных контактов, что приводит к снижению теплопроводности всей грунтовой системы.

С увеличением длительности инкубации нефти в естественных условиях в ней возрастает содержание смолисто-асфальтеновых компонентов, что



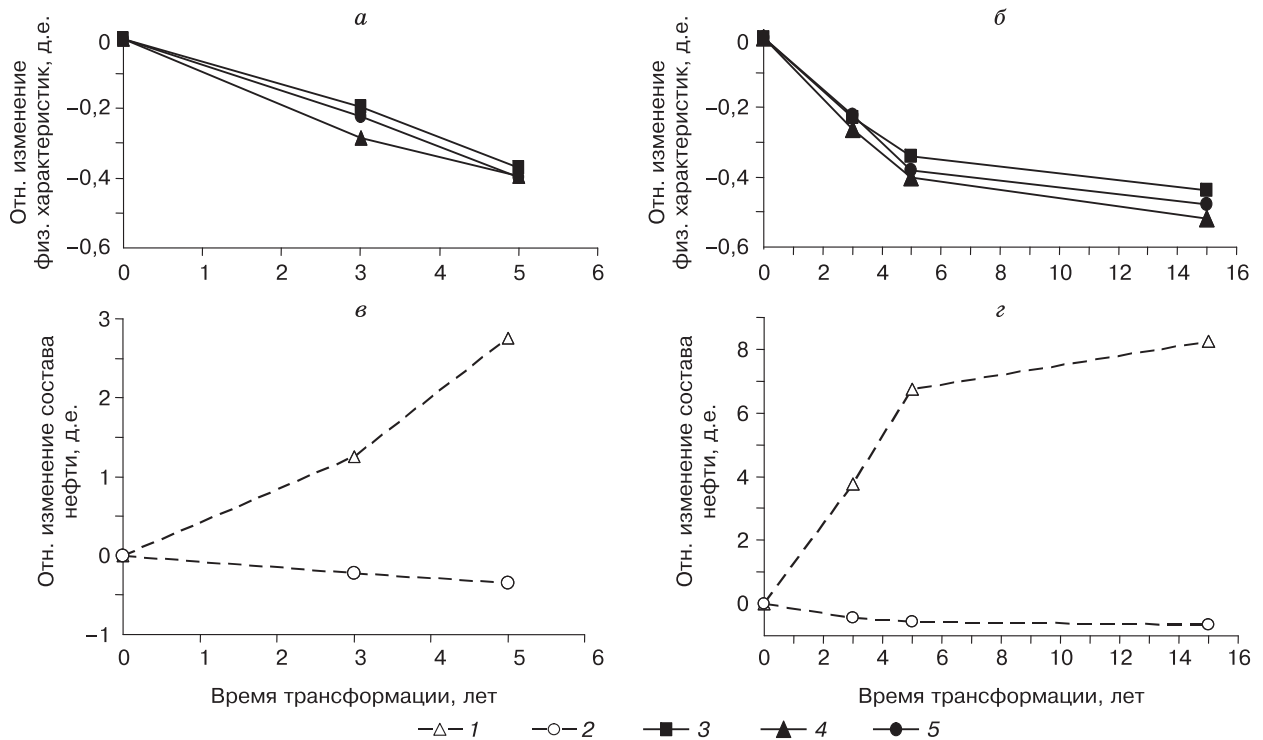
**Рис. 3. Зависимости коэффициента теплопроводности от содержания нефти для супеси (а) и суглинка (б) в мерзлом (1–4) и талом (1'–4') состоянии:**

1, 1' – в нарушенном сложении, 2, 2' – в естественном сложении через 3 года после разлива, 3, 3' – через 5 лет после разлива, 4, 4' – через 15 лет.

повышает ее плотность. Из литературных данных [Справочник..., 1984] известно, что теплопроводность нефти уменьшается с увеличением ее плотности. Вследствие этого коэффициент  $\lambda$  нефтепродукта становится еще ниже, что вызывает еще большее снижение теплопроводности всего грунта.

Следует отметить, что даже через 5 лет при достаточно низком остаточном содержании нефти в грунте (0,25 %) восстановления теплопроводных, электрических и акустических свойств не произошло.

Рассмотрим динамику всех исследуемых характеристик под действием загрязнения нефтью в



**Рис. 4. Относительное изменение во времени исследуемых характеристик (а, б) и состава нефти (в, г) в супеси (а, в) и суглинке (б, г):**

1 – содержание асфальтенов, 2 – содержание масел, 3 – коэффициент теплопроводности, 4 – скорость продольных волн, 5 – удельное электрическое сопротивление.



целом. Из рис. 2 видно, что характер их изменения подобен и что загрязнение нефтью приводит к снижению коэффициента теплопроводности, скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления. Чем дольше преобразование нефти, тем интенсивнее снижаются все исследуемые характеристики. С увеличением загрязнения  $\lambda$  грунтов уменьшается в том же ряду, что и  $\rho$ ,  $V_p$ .

Для выявления роли трансформации нефтяного загрязнения были рассчитаны относительные изменения изучаемых характеристик нефтезагрязненных грунтов по отношению к таковым для незагрязненных. На рис. 4 представлены зависимости для физических характеристик ( $a$ ,  $b$ ) и состава нефти ( $v$ ,  $z$ ) от времени трансформации нефти в супеси и суглинке.

Несомненный интерес представляет тесная связь всех исследуемых характеристик между собой и подобный характер их уменьшения во времени трансформации нефти. Так, в супеси изменения  $\lambda$ ,  $\rho$  и  $V_p$  спустя 3 года происходят в диапазоне 20–30 %, а спустя 5 лет – в диапазоне 35–40 %. В суглинке через 3 года изменения характеристик составляют 20–30 %, через 5 лет – 30–40 %, через 15 лет – 40–50 %. Наибольшие изменения наблюдаются для скорости продольных волн (см. рис. 4,  $a$ ,  $b$ ).

Сопоставление изменения физических характеристик с относительным изменением состава нефти показало: в суглинках содержание асфальтенов и масел варьирует в 2–3 раза интенсивнее, чем в супесях. А увеличение содержания асфальтенов во всех грунтах на порядок больше, чем уменьшение содержания масел. По-видимому, именно асфальтены оказывают преобладающее влияние на исследуемые характеристики. Вероятно, при трансформации нефти происходит образование микроагрегатов (благодаря склеивающему эффекту асфальтенов) и формирование прослоев таких частиц в грунте. Эти прослои увеличивают контактные сопротивления и обладают низкотеплопроводными свойствами. Очевидно, что прослои обладают более низкоскоростными свойствами и имеют пониженное УЭС.

Все это свидетельствует о наличии взаимосвязи изменения теплопроводных, электрических и акустических свойств во время трансформации нефти и ее деструкции.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что УЭС, скорость продольных волн и коэффициент теплопроводности талых и мерзлых грунтов уменьшаются при увеличении степени загрязнения нефтью. Преобразование нефтяного загрязнения приводит к еще большему снижению изучаемых характеристик.

2. Выявлен различный характер преобразования нефти в грунтах разного гранулометрического состава. В суглинках уменьшение содержания масел и увеличение содержания асфальтенов в 2–3 раза больше, чем в супесях. Увеличение содержания асфальтенов на порядки выше, чем уменьшение содержания масел во всех грунтах, и, по-видимому, именно асфальтены оказывают преобладающее влияние на рассматриваемые характеристики.

3. Благодаря трансформации грунта и увеличению асфальтенов происходит образование микроагрегатов и формирование более низкотеплопроводных, низкоскоростных и низкоомных прослоев в грунте.

4. Проведенные исследования показали, что изменения исследуемых характеристик грунтов связаны между собой, с изменением состава нефти и с длительностью ее трансформации.

## Литература

- Анисимова И.В., Зыков Ю.Д., Мотенко Р.Г.** Влияние нефтяного загрязнения на электрические и акустические свойства мерзлых пород // Геофизика, 2003, № 6, с. 59–63.
- Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов** / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М., ГЕОС, 2002, 402 с.
- Геоэкологическое** обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. И.Н. Модина, В.А. Шевнина. М., Геомакс, 1999, 512 с.
- Журавлев И.И., Мотенко Р.Г., Ершов Э.Д.** Формирование теплофизических свойств мерзлых дисперсных пород при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами // Геоэкология, 2005, № 1, с. 50–60.
- Зыков Ю.Д., Мотенко Р.Г., Журавлев И.И. и др.** Изменение свойств мерзлых грунтов при загрязнении их нефтью // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. "Техногенная трансформация геологической среды криолитозоны". Екатеринбург, Изд-во УГГГА, 2002, с. 177–180.
- Лабораторные** методы исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2003, 352 с.
- Мотенко Р.Г., Кирюхина Т.А., Гераскина Е.В. и др.** Оценка влияния нефтяного загрязнения на теплопроводность грунтов на основе результатов комплексных экспериментальных исследований // Материалы Междунар. конф. "Город и геологические опасности". М., ГУ ЦИСН, 2006, с. 109–117.
- Пиковский Ю.И.** Трансформация техногенных потоков нефти в почвенных экосистемах // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М., Наука, 1988, с. 95–104.
- Пустозеров М.Г.** Комплекс геофизических методов для изучения углеводородного загрязнения геологической среды // Геоэкология, 2001, № 4, с. 375–384.
- Соболева Е.В., Гусева А.Н.** Практикум по нефтяной геохимии. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 92 с.
- Справочник** по геологии нефти и газа / Под ред. Н.А. Еременко. М., Наука, 1984, 480 с.

Поступила в редакцию  
3 апреля 2008 г.