

УДК 551.340

**Зыков Ю.Д., Мотенко Р.Г., Кошурников А.В.,  
Озеричкий К.В., Гречищева Э.С., Гунар А.Ю.***(г. Москва)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ И ОТТАИВАЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ<sup>1</sup>

*Аннотация.* Рассматриваются результаты комплексного экспериментального исследования свойств засоленных нефтезагрязненных мерзлых и оттаивающих грунтов в широком диапазоне температур на примере каолиновой глины. Приводятся и сопоставляются результаты изучения теплопроводности, теплоемкости, удельного электрического сопротивления, скорости прохождения продольных волн и коэффициента поляризуемости в широком диапазоне температур. Оценивается влияние нефтяного загрязнения и засоления на исследуемые характеристики и выявляется наиболее информативный параметр.

*Ключевые слова:* мерзлые и протаивающие грунты, нефтяное загрязнение, засоление, геофизические и теплофизические свойства.

**Y. Zykov, R. Motenko, A. Koshurnikov,  
K. Ozeritskiy, E. Grechishcheva, A. Gunar***(Moscow)*

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF OIL POLLUTION INFLUENCE ON THERMOPHYSICAL AND GEOPHYSICAL PROPERTIES OF SALINE FROZEN AND MELTING DISPERSE GROUNDS

*Abstract.* The article presents the results of a comprehensive experimental research of the properties of oil-contaminated saline frozen and melting grounds at a wide range of temperatures on the example of kaolinite clay. The authors present and compare the results of a thermal conductivity study, as well as its heat capacity, electrical resistivity, passage velocity of longitudinal waves and metal factor at a wide range of temperatures. The impact of oil pollution and salinity on the studied characteristics and identify the most informative parameter.

*Key words:* frozen and melting ground, oil pollution, salinization, geophysical and thermal properties.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-05-00476

В последние 25-30 лет развитие нефтегазового комплекса (от поисков и разведки месторождений нефти и газа до их эксплуатации и транспортировки углеводородного сырья и продуктов его переработки) сместилось в северные, арктические и восточные районы России. Природно-климатические условия этих районов определяют повышенную экологическую уязвимость природной среды к техногенным воздействиям, возникающим на различных этапах нефтегазоразведки и добычи. Интенсивному нефтезагрязнению сопутствует его относительная устойчивость во времени, связанная с замедлением процессов химической и микробиологической деструкции нефтепродуктов из-за низкой биологической активности немногочисленной флоры и фауны вследствие значительной продолжительности периода отрицательных температур [1].

В районах добычи нефти может происходить загрязнение и засоление грунтов. Источниками солей при этом являются пластовые жидкости, сточные промысловые воды, содержимое амбаров и другие геохимические активные вещества, применяемые для извлечения и обессоливания нефти. Кроме того, совместное засоление и загрязнение может происходить при излитии нефти в области распространения засоленных грунтов, где проходят пути транспортировки нефти [12].

Свойства загрязненных грунтов сильно отличаются от свойств исходных грунтов. Различные загрязнители могут влиять на физические свойства грунтов, изменяя у последних плотность, пористость, показатели теплоемкости, электропроводности и т. п. [8].

В последние годы на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова проводятся комплексные широкомасштабные исследования влияния засоления [3] и нефтяного загрязнения [4; 5] на физические свойства и состав мерзлых, промерзающих и протаивающих грунтов [2; 9; 10; 11].

Целью данной работы являлось изучение совместного влияния нефтяного загрязнения и засоления на электрические, акустические и теплофизические свойства мерзлых грунтов разного гранулометрического состава и выявление физического параметра, наиболее реагирующего на изменение загрязнения и засоления на примере каолинитовой глины.

Было выполнено комплексное экспериментальное исследование температурных зависимостей удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ), коэффициента поляризуемости ( $\eta$ ), скорости прохождения продольных волн ( $V_p$ ), коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ), теплоем-

кости (С), температуры начала замерзания ( $t_{\text{нз}}$ ) и фазового состава влаги в мерзлых и оттаивающих грунтах в диапазоне засоления и нефтяного загрязнения на примере каолинитовой глины.

### **Объект исследования и методика приготовления образцов**

В естественных условиях дисперсные породы характеризуются неоднородностью состава и строения, а также обладают различными свойствами, формирование которых определяется совокупностью различных геологических процессов. Существует много факторов, влияющих на формирование физических свойств промерзающих и мерзлых дисперсных пород. Выяснить влияние каждого из них возможно только в лабораторных условиях, поэтому для проведения исследований по изучению геофизических и теплофизических характеристик дисперсных пород использовались породы нарушенного сложения, поскольку это позволяло приготовить образцы заданной влажности, плотности, засоленности и загрязнения, что было необходимо для решения поставленных задач.

В данной работе мы рассматриваем результаты исследования только для выбранного модельного грунта – засоленной нефтезагрязненной каолинитовой глины.

Элювиальная палеогеновая глина (ePg2) – глина белого цвета, представляет собой продукт переотложения первичных каолинов коры выветривания пород Челябинской области.

Основной активной поверхностью у каолинита являются разорванные связи боковых сколов кристаллов, в меньшей степени – их внешние базальные поверхности. Вследствие этого каолинитовая глина, несмотря на высокую дисперсность, обладает небольшой удельной активной поверхностью. Каолинитовая глина характеризуется низкой пластичностью, малой гигроскопичностью (табл. 1). По степени засоления каолинитовая глина является незасоленным грунтом (ГОСТ 25100-95). В минеральный состав исследованной каолинитовой глины входят: каолинит – 84%, кварц – 8%, гидрослюда – 7%, полевого шпата – 1%.

Таблица 1

## Гранулометрический состав каолинитовой глины

Содержание частиц в каждой фракции, %						
Диаметр частиц, мм						
1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
-	-	-	1,1	26,1	11,4	61,4

Для проведения искусственного загрязнения в работе была использована: смесь нефтей из нескольких месторождений севера Западной Сибири, поступающая по трубопроводу на Московский нефтеперерабатывающий завод.

Плотность ( $d_4^{20}$ ) нефти 0,869 г/см<sup>3</sup>. Температура начала кипения составляет 60° С. Температура застывания равна –18° С. Нефть содержит 39,4% масел, 34,6% асфальтенов и 26% смол. Содержание воды в ней – 0,18 мг/л, содержание солей – 8,1 мг/л. Исследуемую нефть можно отнести к группе смолистых незасоленных нефтей.

Эксперименты выполнялись на искусственно приготовленных образцах с заданными значениями влажности, плотности засоления и загрязнения. Загрязнение (Z), по аналогии с весовой (суммарной) влажностью (W) и степенью засоления ( $D_s$ ), рассчитывалось как отношение массы загрязнителя к массе сухого грунта. Сначала сухой грунт увлажнялся раствором NaCl заданной концентрации, а затем загрязнялся нефтью до нужных значений загрязнения. Полученная тщательно перемешиванием паста закладывалась в формы и уплотнялась до заданных значений плотности.

Приготовленные образцы замораживались при температуре (–20) – (–30° С), что предотвращало миграцию влаги и обеспечивало создание в них массивной криогенной текстуры. Измерения геофизических характеристик производились при определенных значениях температуры в процессе ступенчатого отепления. На каждой ступени образцы выдерживались необходимое время (не менее 4 ч) до выравнивания температуры в образце. Измерения электрических и акустических свойств производились в диапазоне от –20 до +10° С, с температурным шагом в 2° С.

Теплофизические характеристики определялись в непрерывном режиме в диапазоне температур от –25 до +15° С.

## Методы экспериментальных исследований

Измерения электрических свойств грунтов осуществлялись на низкочастотном переменном токе четырехэлектродной установкой. Грунт помещался в специально изготовленные резистивиметры – стаканы из полихлорвинила с смонтированными в стенки латунными электродами. На питающие электроды АВ подавался ток, на приемных электродах MN измерялось напряжение [6, с. 7]. Предварительно все резистивиметры специально тарировались на растворах NaCl для определения их геометрических коэффициентов. Измерения производились комплектом аппаратуры «Спектр 1», разработка ООО «МГУ-Геофизика» (фото 1).

Измерения акустических свойств грунтов осуществлялись аппаратурой УД4-130 и комплектом акустических датчиков с центральной частотой 60 кГц (фото 2). Выбор такого диапазона частот связан с необходимостью получения четких первых вступлений при условии сохранения соотношения длины волны и геометрических параметров образца [5]. Для измерений скоростей прохождения упругих волн использовался метод просвечивания. Приготовленные образцы грунта помещались в кубические формы из плексигласа, что позволяло производить акустические измерения, не нарушая структуру образца. Скорость прохождения упругих колебаний определяется как отношение базы просвечивания ко времени распространения этих волн с учетом поправки нахождение волны в плексигласе.

Фото 1. Аппаратура «Спектр-1»:

а) – генератор тока; б) – многофункциональный измеритель



а)

б)

**Фото 2. Акустические измерения в криокамере:**

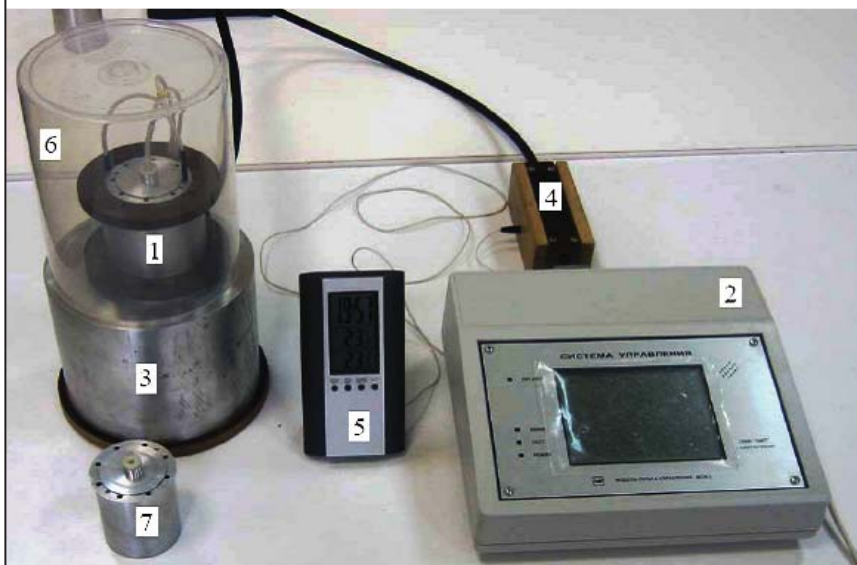
- 1 – дефектоскоп ультразвуковой (УД4-130); 2 – акустический пьезодатчик



Измерения теплофизических характеристик грунтов производились методом монотонного режима на приборе «ИТС– $\lambda$ с–10» (фото 3). Монотонным режимом сейчас принято называть такой режим разогрева-охлаждения образцов, при котором в опыте внутри образца одновременно сохраняются малы температурные перепады и почти равномерное поле скоростей изменения температуры. Монотонный режим по своей физической сути явился существенным обобщением квазистационарного и регулярного режимов [3, с. 6].

**Фото 3. Измеритель теплофизических свойств грунтов «ИТС- $\lambda$ с-10»:**

- 1 – теплоизмерительная ячейка; 2 – теплофизический контроллер;  
3 – массивные металлические блоки; 4 – теплозащитная коробочка для «холодных» спаев;  
5 – цифровой термометр; 6 – тонкостенный прозрачный колпак; 7 – металлический стакан для размещения образца исследуемого материала

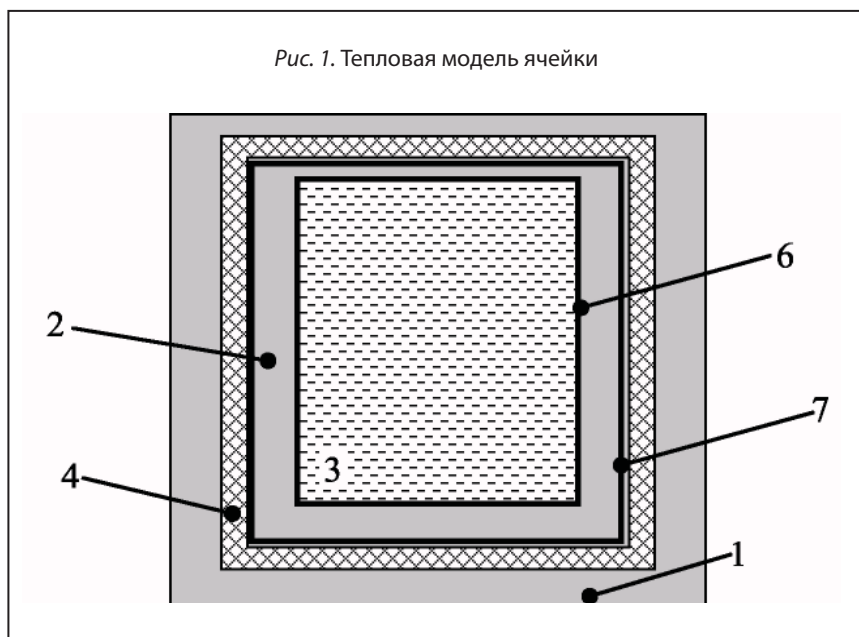


Конструктивно прибор «ИТС–λс–10» выполнен в виде двух блоков: теплоизмерительной ячейки и специализированного электронно-вычислительного устройства – теплофизического контроллера (ТФК). Один из металлических блоков размещается на рабочем столе, при комнатной температуре, а второй блок – в морозильной камере, при заданной отрицательной температуре.

Тепловая модель метода измерений представлена на рис. 1. Основными тепловыми звеньями тепловой ячейки являются образец 3, металлическое ядро 2, тонкая теплоизоляционная прослойка 4 и окружающая их изотермическая среда 1, сохраняющая в опыте постоянную температуру.

Между изотермическим ядром и образцом, с одной стороны, и средой, с другой стороны, принудительно создается значительный перепад температуры. Для этого предназначены массивные блоки 5, один из которых постоянно находится при комнатной температуре, а другой – в морозильной камере.

Ядро 2 ячейки образовано двумя металлическими стаканами. Внутренний стакан 6 имеет крышку и является съемной деталью ячейки. Он предназначен для размещения исследуемого образца и во время опыта находится в хорошем тепловом контакте с промежуточным тон-





костенным стаканом 7, благодаря чему металлическое ядро 2, изменяя во времени свою температуру, сохраняет на всех этапах опыта практически равномерное температурное поле. Теплоизоляционная прослойка 4 используется для создания оптимального режима охлаждения-нагрева образца, а также играет роль тепломера.

Производилось минимум 3 цикла замораживания-оттаивания с каждым образцом.

По результатам опытов вычисляются удельная теплоемкость и теплопроводность исследуемого образца грунта в зависимости от изменения температуры, причем отдельно как в режиме замораживания, так и в режиме оттаивания образца.

## Результаты и их обсуждение

### Влияние засоления

*Удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ).* Температурные зависимости УЭС от засоления представлены на рис. 5. Выявлено, что в области положительных температур засоление оказывает сильное влияние на УЭС ( $\rho$ ) грунта за счет увеличения концентрации порового раствора, что влечет за собой уменьшение общего сопротивления грунта. Так, в образцах с засолением  $D_s=0\%$ , УЭС составляет 70–100 Ом·м, в то время как у образцов с засолением 1% и 2% УЭС равняется 5 Ом·м и 2 Ом·м соответственно. В области отрицательных температур влияние засоления на электрические свойства грунтов сказывается еще сильнее. При переходе через температуру начала замерзания грунта ( $t_{нз}$ ) в сторону отрицательных температур наблюдается резкое увеличение УЭС грунтов с  $D_s=0$  и более плавное увеличение значений для грунтов с  $D_s=1\%$  и 2%. При дальнейшем понижении температуры повышение УЭС грунтов носит затухающий характер. Так, наибольшие значения УЭС ( $n \cdot 103$  Ом·м) получены на образцах с засолением 0%, наименьшие – на образцах с засолением 2% (2 Ом·м). Полученные результаты опыта объясняются тем, что определяющее влияние на УЭС грунтов имеет влажность незамерзшей воды, т. к. сопротивление грунтов определяется ионной проводимостью раствора, а не минеральным скелетом и льдом, которые обладают высокими УЭС. Поэтому наибольшие значения УЭС получены на образцах с нулевым засолением, а наименьшие – на образцах с засолением 2%. Понижение УЭС засоленных грунтов связано не только с повышением проводимости порового раствора, но и с увеличением  $W_{нз}$  при внесении в систему солей. При понижении температуры грунта ниже  $t_{нз}$  происходит вымерзание чистой воды из порового



раствора, что влечет за собой повышение концентрации поровой влаги. Но дальнейший рост УЭС при понижении температуры говорит о том, что определяющее влияние оказывают уменьшение ионной проводимости раствора при понижении температуры, увеличение извилистости пор за счет появления новой минеральной составляющей (льда) и заземление порового раствора в кристаллической решетке льда, при его образовании.

*Скорость прохождения продольных волн ( $V_p$ ).* В области положительных температур различия скоростей прохождения продольных волн в засоленных и незасоленных образцах крайне мало и соизмеримо с ошибкой измерения (рис. 5). Скорость распространения упругих волн в поровом растворе увеличивается с ростом концентрации. Но это слабо сказывается на изменении  $V_p$  в грунте.

В области же отрицательных температур, начиная от температуры начала замерзания,  $V_p$  резко возрастает, т. к. скорость распространения продольных волн во льду почти в 2,5 раза выше, чем в воде.

Засоление очень сильно сказывается как на характере температурной зависимости, так и на величине  $V_p$ . Наибольшие скорости были получены для незасоленных образцов и составили 3350 м/с, а наименьшие получены на образцах с засолением 2% – 2650 м/с. При засолении понижается температура начала замерзания грунта [3], что ведет к смещению перегиба кривой  $V_p(t)$  в область более низких температур и уменьшению значений  $V_p$ . Это связано с изменением фазового состава влаги, т. к. в засоленных грунтах образуется меньше льда, чем в незасоленных образцах.

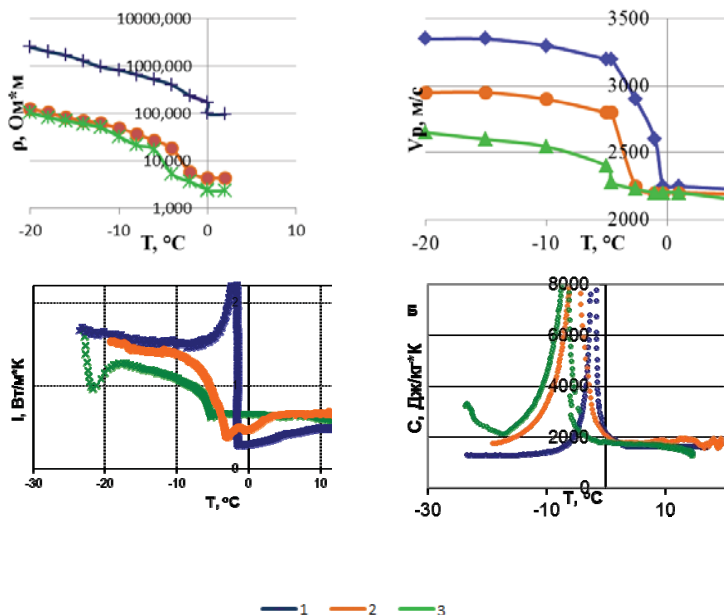
*Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ).* В талом состоянии значения коэффициента теплопроводности каолининовой глины находятся в пределах ошибки прибора, т. е. можно сказать, что для засоленного и незасоленного грунта они совпали (рис. 5). В мерзлой каолининовой глине увеличение засоления от 0 до 1% приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности на 10%, а дальнейшее увеличение засоления до 2% приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности еще на 15%.

Для засоленных образцов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры имеет классический вид, т. е. в области интенсивных фазовых переходов происходит увеличение коэффициента теплопроводности в соответствии с фазовым составом влаги. Количество льда в засоленном образце существенно меньше, чем в незасоленном, поэтому вклад теплоемкости не так велик, и на графике пик не фиксируется.

Для образцов с засоленностью 2% в температурном диапазоне от  $-23$  до  $-24^{\circ}\text{C}$  наблюдается интенсивный рост коэффициента теплопроводности до значений коэффициента теплопроводности незасоленного грунта. Это связано с тем, что при температурах от  $-21$  до  $-23^{\circ}\text{C}$  происходит образование криогидрата и при температурах ниже  $-23^{\circ}\text{C}$  содержание незамерзшей воды резко уменьшается, что в свою очередь ведет к увеличению коэффициента теплопроводности [1]. К сожалению, условия проведения эксперимента не позволили зафиксировать дальнейший ход коэффициента теплопроводности при более низких температурах.

*Теплоемкость (С).* На температурной зависимости теплоемкости (С) (рис. 2) четко видно влияние засоления на протекание фазовых переходов в грунте. При оттаивании льда теплоемкость стремится к

Рис. 2. Зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ), скоростей прохождения продольных волн ( $V_p$ ), коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) и теплоемкости (С) от температуры для засоленной незагрязненной каолинистой глины: 1 –  $D_s=0\%$ ; 2 –  $D_s=1\%$ ; 3 –  $D_s=2\%$ .



бесконечности. Для чистого грунта этот пик достигает 17 000 Дж/кг·К. Для суглинка с засолением 1% – смещается влево, так как понижается температура начала замерзания грунта. Кроме того, теплоемкость достигает уже не 17 000, а 9000 Дж/кг·К, что связано с меньшим количеством льда, которое переходит в воду. Кроме того, этот пик имеет другую форму, в отличие от того, что зафиксировано для незасоленных грунтов. Он как бы более «размазан», т. е. имеет большую ширину. А это в свою очередь связано с тем, что фазовые переходы раствора в засоленном грунте происходят в спектре температур [5]. Пик на графике теплоемкости приходится на интенсивные фазовые переходы, которые для незасоленного грунта проходят в температурном диапазоне от  $-0,2$  до  $-7^{\circ}\text{C}$ , при засолении 1% – от  $-3$  до  $-17^{\circ}\text{C}$ . Чем больше засоленность, тем больше незамерзшей воды в грунте и тем больше температурный диапазон, в котором происходят фазовые переходы

Так, в температурном диапазоне от  $-21$  до  $-24^{\circ}\text{C}$  фиксируется пик на графиках теплоемкости грунтов с засолением 2%, то есть в температурном диапазоне от  $-21$  до  $-24^{\circ}\text{C}$  происходит фазовый переход – образование криогидрата хлорида натрия, так как именно при фазовых переходах наблюдается резкий рост теплоемкости [2; 3; 10].

Сопоставление результатов геофизических и теплофизических исследований показало, что засоление каолининовой глины не привело к значительным изменениям ее теплофизических и упругих характеристик в области положительных температур. Но УЭС незасоленной каолининовой глины превышает УЭС засоленной почти на полтора порядка. В области отрицательных температур засоление глины до  $D_s=2\%$  сопровождается понижением скорости распространения продольных волн и понижением коэффициента теплопроводности на 25%, а УЭС глины понижается на 1–1,5 порядка, как и в области положительных температур. Теплоемкость в области положительных температур не зависит от засоления, в области же отрицательных температур при засолении глины происходит смещение в сторону отрицательных температур, а также уменьшение и «размазывание» пика максимальной эффективной теплоемкости.

### **Нефтяное загрязнение**

*Удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ).* Влияние нефтяного загрязнения выражено гораздо слабее влияния засоления. Так, в области положительных температур повышение содержание нефти в грунте приводит к незначительному повышению УЭС исследуемого грунта на первые десятки Ом·м в области положительных температур и на первые сотни и даже тысячи Ом·м в области отрицательных температур

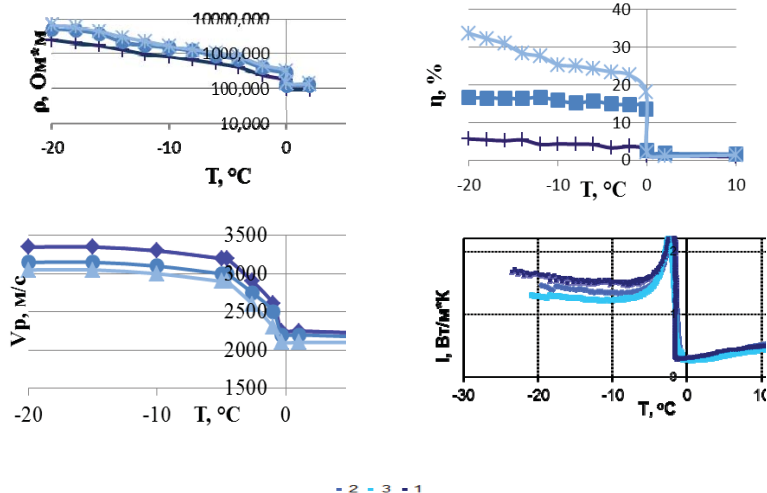
(рис. 3). Расположение нефти в поровом пространстве незасоленных мерзлых грунтов существенно увеличивают извилистость путей течения тока, что в свою очередь, влияет на проводимость грунта в целом, и приводит к увеличению УЭС.

*Коэффициент поляризуемости ( $\eta$ ).* Помимо УЭС грунтов изучались температурные зависимости коэффициента поляризуемости от нефтяного загрязнения и засоления. Результаты экспериментов показали, что при внесении в незасоленные грунты нефтепродуктов происходит резкое повышение коэффициента поляризуемости (см. рис. 3), причем максимальные значения наблюдаются при переходе через температуру начала замерзания в сторону отрицательных температур. Такое поведение коэффициента поляризуемости объясняется тем, что при промерзании незасоленных грунтов расположение нефти в грунтах носит пленочный характер, что обеспечивает увеличение площади поверхностей контакта жидкой (нефти, порового раствора) и твердой (минеральный скелет, лед) фаз в исследуемом грунте, которые и определяют поляризуемость среды. В засоленных грунтах, по-видимому, не происходит пленочного распределения нефти в поровом пространстве грунтов, поэтому коэффициент поляризуемости в засоленных грунтах близок к нулю как в области положительных, так и отрицательных температур и его изменение при загрязнении засоленных грунтов нефтью очень мало и соизмеримо с погрешностью измерений.

*Скорость прохождения продольных волн ( $V_p$ ).* Привнесение в грунт нефти привело к снижению скоростей распространения упругих колебаний с 3350 м/с у незагрязненных образцов, до 3050 м/с у загрязненных образцов в области отрицательных температур и к незначительному снижению скоростей в области положительных температур (см. рис. 3). Такое поведение упругих характеристик связано с некоторым разобшением частиц грунта при внесении в него нефти и слабым влиянием нефтяного загрязнения на фазовый состав порового раствора [5]. Часть контактов частиц грунта после загрязнения осуществляется через тонкую пленку нефти, что и определяет снижение скорости ( $V_p$  в нефти значительно ниже, чем в минеральной составляющей грунта).

*Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ).* В мерзлой каолиновой глине (рис. 3, температурная зависимость  $\lambda$ ) при увеличении нефтяного загрязнения от 0 до 2,5 % происходит понижение значений коэффициента теплопроводности на 10%, а увеличение загрязнения до 10% приводит к понижению коэффициента теплопроводности еще на 10%. В талом состоянии коэффициенты теплопроводности незагрязненного и загрязненных образцов совпали.

Рис. 3. Зависимости удельного электрического сопротивления –  $\rho$ , коэффициента поляризуемости –  $\eta$ , скоростей прохождения продольных волн –  $V_p$  и коэффициента теплопроводности –  $\lambda$  от температуры незасоленной каолинистой глины с различными нефтяными загрязнениями Z: 1 – 0%; 2 – 2,5%; 3 – 10%



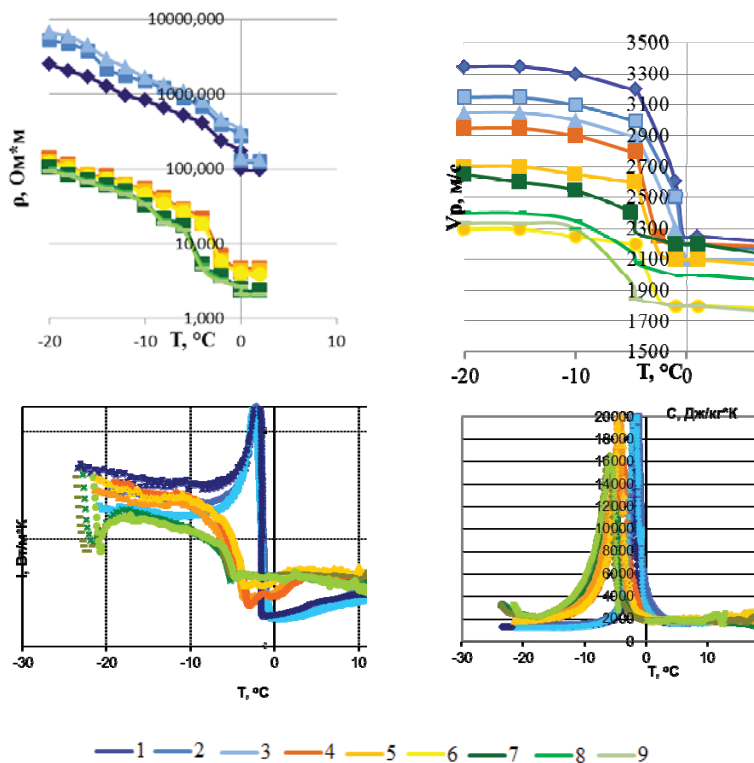
Нефтяное загрязнение приводит к понижению  $V_p$  и  $\lambda$  на 10% в области отрицательных температур, к увеличению УЭС глины почти в 2 раза и увеличению коэффициента поляризуемости в 5 раз. В области же положительных температур нефтяное загрязнение не приводит к заметному изменению свойств грунта. При внесении нефти в каолинистую глину изменения ее теплоемкости незначительны.

#### **Совместное влияние засоления и нефтяного загрязнения**

*Удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ).* Исследования влияния нефтяного загрязнения на УЭС засоленных грунтов показали, что при внесении в грунт загрязнителя (нефти) УЭС пород не только не увеличивается, как в незасоленных породах, но даже уменьшается на первые единицы Ом·м (рис. 4, температурная зависимость  $\rho$ ). Такое влияние нефтяного загрязнения на УЭС пород объясняется тем, что в засоленных грунтах поровый раствор обладает более высоким поверхностным натяжением, что не позволяет нефтепродуктам растекаться в грунте пленками и увеличивать УЭС породы, а незначительное понижение

Рис. 4. Зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ), скоростей прохождения продольных волн ( $V_p$ ), коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) и теплоемкости ( $C$ ) от температуры засоленной нефтезагрязненной каолинистой глины:

1 –  $D_s=0\%$ ,  $Z=0\%$ ; 2 –  $D_s=0\%$ ,  $Z=2,5\%$ ; 3 –  $D_s=0\%$ ,  $Z=10\%$ ; 4 –  $D_s=1\%$ ,  $Z=0\%$ ; 5 –  $D_s=1\%$ ,  $Z=2,5\%$ ; 6 –  $D_s=1\%$ ,  $Z=10\%$ ; 7 –  $D_s=2\%$ ,  $Z=0\%$ ; 8 –  $D_s=2\%$ ,  $Z=2,5\%$ ; 9 –  $D_s=2\%$ ,  $Z=10\%$ .



УЭС грунтов предположительно связано с повышением концентрации порового раствора за счет содержащихся в нефти солей.

Скорость прохождения продольных волн ( $V_p$ ). Рассмотрение результатов акустического просвечивания засоленных грунтов при разных нефтяных загрязнениях показало, что засоление оказывает большее влияние на упругие характеристики изучаемой среды, чем нефтяное загрязнение. Тем не менее следует отметить, что даже в засоленных

грунтах нефтяное загрязнение приводит к понижению скоростей распространения продольных волн с 2700 м/с до 2300 м/с, что может являться признаком, качественно характеризующим наличие нефтяного загрязнения в среде (рис. 4, температурные зависимости  $V_p$ ). Влияние нефтяного загрязнения хоть и невелико, но вполне однозначно – при внесении в грунт загрязнителя происходит некоторое разобщение минеральных частиц, что приводит к понижению скоростей продольных волн.

*Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ).* Рассмотрим совместное влияние засоления и нефтяного загрязнения на коэффициент теплопроводности каолинитовой глины (рис. 4, температурная зависимость  $\lambda$ ). По литературным данным, а также по экспериментально полученным результатам, известно, что и нефтяное загрязнение, и засоление существенно снижают коэффициент теплопроводности. Поэтому в самом начале исследований предполагалось, что нефтяное загрязнение и засоление вызовут кумулятивный эффект, т. е. коэффициент теплопроводности засоленного загрязненного грунта будет ниже, чем просто засоленного. Однако результат получился очень неожиданным, и полученные экспериментальные данные свидетельствуют о другом.

Влияние нефтяного загрязнения в засоленном грунте практически не сказывается на значениях коэффициента теплопроводности, причем это касается всего температурного диапазона. Добавка нефти не повлияла на кинетику процесса образования криогидрата хлорида натрия.

*Теплоемкость ( $C$ ).* Из температурной зависимости теплоемкости (см. рис. 4) видно, что добавка нефти как к чистому, так и к засоленному грунту практически не оказывает влияния на значения теплоемкости. Также не оказывает влияния на форму зависимости, то есть на процесс изменения теплоемкости с изменением температуры [3].

Рассматривая графики совместного влияния нефтяного загрязнения и засоления можно отметить, что и засоление и нефтяное загрязнение приводит к снижению скоростей продольных волн и коэффициента теплопроводности. Но следует отметить, что засоление приводит к снижению этих характеристик на первые десятки процентов, а нефтяное загрязнение приводит к снижению этих характеристик на первые проценты. Другая картина наблюдается на температурных зависимостях УЭС – нефтяное загрязнение приводит к значительному повышению УЭС мерзлых незасоленных глин, но влияние нефтяного загрязнения на УЭС засоленных грунтов незначительно.



## Выводы

1. Для изучения засоления каолинистых глин в области положительных температур наиболее информативным параметром является УЭС – 100 Ом·м – у незасоленных образцов и 2 Ом·м у образцов с засолением 2%. В области отрицательных температур, помимо  $\rho$ , которое, так же как и при положительных температурах, понижается более чем на порядок, информативными параметрами являются коэффициент теплопроводности и скорость распространения продольных волн. Происходит снижение как  $V_p$ , так и  $\lambda$  приблизительно на 25%.

2. Нефтяное загрязнение в области положительных температур очень слабо влияет на изученные характеристики грунта – изменение свойств при загрязнении нефтью мало и соизмеримо с точностью приборов, поэтому сложно судить о влиянии нефтяного загрязнения в рассматриваемой области. Наиболее информативным свойством для изучения нефтяного загрязнения незасоленной мерзлой глины является коэффициент поляризуемости. Значения  $\eta$  при загрязнении нефтью увеличиваются с 5% до 30%, т. е. в 5 раз. Также очень информативен параметр  $\rho$  – его значения при температуре  $-20^\circ\text{C}$  у незагрязненного грунта – 2500 Ом·м, у образца с загрязнением 10% – 6600 Ом·м.

3. Ни один из изучаемых параметров не является информативным при изучении нефтяного загрязнения талой (или оттаивающей) засоленной каолинистой глины. Но в области отрицательных температур загрязнение засоленных пород нефтью приводит к понижению  $V_p$  на 7%. Причем наибольшее понижение  $V_p$  наблюдается на образцах с загрязнением 2,5% (на 200 м/с у образцов с засолением 1% и на 100 м/с для образцов с засолением 2%), дальнейшее повышение загрязнения приводит к незначительному понижению упругих характеристик грунтов. На образцах с засолением 1% и 2% и нефтяным загрязнением 10% скорости распространения продольных волн близки, это говорит о том, что на  $V_p$  засоленных грунтов в большей степени влияет нефтяное загрязнение. При изучении теплопроводности выявлено, что этот вывод справедлив во всем диапазоне исследуемого нефтяного загрязнения.

### Литература:

1. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Ответственные редакторы Е.С. Мельников, С.Е. Гречищев. – М.: ГЕОС, 2002. – 400 с.

2. Гречищева Э.С., Мотенко Р.Г. Фазовый состав влаги засоленных мерзлых грунтов при их нефтяном загрязнении // Материалы Четвертой конференции геоэкологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т. 1. Часть 1. – М.: Университетская книга, 2011. – С. 54-60.

3. *Ершов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А.* Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // *Геоэкология*. – 1999. – № 3. – С. 232-242.

4. *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.

5. *Зыков Ю.Д., Мотенко Р.Г., Анисимова И.В., Журавлев И.И.* Влияние нефтяного загрязнения на свойства мерзлых пород // *Криосфера Земли*. Т. IX. – № 3. – С. 28-35.

6. *Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Погорелов А.В. и др.* «Информативность геофизических методов при оценке нефтезагрязнений». Материалы 4-й конференции геокриологов России. 7-9 июня 2011 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет // *Геоэкология*. – М.: Изд-во МГУ, 232-240 с.

7. *Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., Парамонов Н.В. и др.* Роль и место геофизических методов при изучении криолитозоны // Материалы 4-й конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т. 1. Часть 1. – М.: Университетская книга, 2011. – С. 188-191.

8. *Королев В.А.* Очистка грунтов от загрязнений. – М.: МАИК «Наука/Интер-периодика», 2001. – 365 с.

9. *Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С.* Результаты экспериментального исследования совместного влияния засоления и нефтяного загрязнения на теплопроводность мерзлых грунтов // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ» 30 ноября – 2 декабря 2010 г., Государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. – СПб., 2010. – С. 423-433.

10. *Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С.* Экспериментальное исследование совместного влияния засоления и нефтяного загрязнения на температуру замерзания и фазовый состав влаги в грунте // Материалы IX международного симпозиума по развитию холодных регионов 1-5 июня. – Якутск, 2010. – С. 109.

11. *Motenko R.G., Grechishcheva E.S.* Joint influence of salinization and petroleum pollution on temperature of freezing start and water phase composition of frozen ground. Materials of The International Symposium on Cold Regions Development June 1-5, Yakutsk 2010. s 109.

12. *Солнцева Н.П.* Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 376 с.