

УДК 504.064.3:528.8

# АКУСТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Е. В. АЗАРЕНКО

*Севастопольской национальной университет ядерной энергии и промышленности**Получено 20.02.2006*

Рассмотрены результаты выполненного в восточной части Черного моря натурального эксперимента по обнаружению эмульгированных нефтяных загрязнений. Идея предложенной методики заключалась в одновременном изменении скорости звука в водной среде прямым и косвенным способами. Определены региональные особенности распространения эмульгированных объемных нефтяных загрязнений.

Розглянуті результати виконаного у східній частині Чорного моря натурального експерименту з виявлення емульгованих нафтових забруднень. Ідея запропонованої методики полягала в одночасному вимірюванні швидкості звуку у водному середовищі прямим і непрямим способами. Визначені регіональні особливості поширення емульгованих об'ємних нафтових забруднень.

The results of the experiment on detecting the emulsified oil pollution, carried out in the Eastern part of the Black Sea, are considered. The idea of the proposed technique consisted in simultaneous measuring the sound velocity in the water medium by direct and indirect methods. The regional peculiarities of propagation of the emulsified spatially developed oil pollutions are determined.

## ВВЕДЕНИЕ

Вследствие загрязнения водной среды нефтепродуктами Черное море объявлено международными экологическими организациями зоной экологического бедствия. По сравнению с шестидесятью годами прошлого столетия, концентрация фенолов в черноморской воде увеличилась в  $5 \div 7$  раз, а в отдельных регионах – в  $20 \div 30$  раз [1]. Причиной загрязнения являются, главным образом, аварийные ситуации на нефтепромыслах, подводных нефтепроводах, буровых платформах, нефтеналивных судах и береговых нефтяных терминалах. Нефтяные разливы, как результат аварий, сохраняются на водной поверхности относительно непродолжительный промежуток времени (от нескольких часов до нескольких суток). Штормовая погода, интенсивное волнение водной поверхности перемешивают разлитые нефтепродукты, дробя их на капли, переводя в эмульгированное состояние и перенося потоком воды на значительные расстояния. Еще одним важным фактором при распространении загрязнений оказывается диффузия примеси в морской среде. В результате этого формируется эмульсионно-капельный “шлейф”, сопровождающий пятно загрязнения с распределением по глубине от приповерхностного до придонного слоев жидкости. На мелководье дисперсная часть нефтяного разлива может загрязнять донные отложения [2, 3].

Следует упомянуть ряд теоретических и экспе-

риментальных работ, посвященных гидродинамическому моделированию процессов утечки и распространения загрязняющих примесей в различных водоемах [4–9]. Безусловно, такие исследования позволяют лучше понять динамику поведения пятна и предсказать сценарий развития процесса. Однако при возникновении реальной нештатной ситуации, связанной с выбросом загрязняющего вещества, первостепенную важность приобретают непосредственные систематические наблюдения за оперативной обстановкой.

Традиционным способом обнаружения локальных загрязнений является наблюдение за поверхностью акватории с борта судна, самолета, вертолета или орбитального спутника. Однако визуальная разведка позволяет определить лишь контуры поверхностной части пятна примеси и эффективна только в хорошую погоду.

В настоящее время известен акустический способ обнаружения антропогенных загрязнений в водной среде [10, 11]. На его основе разработана лабораторная установка, с помощью которой проводилось обнаружение эмульгированных нефтяных примесей в северо-западной части Черного моря [12].

Восточная часть Черного моря, в отличие от северо-западной, имеет очень узкую ( $4 \div 6$  миль) шельфовую зону, примыкающую к побережью. За ней начинается крутой материковый склон и морское ложе, расположенное на глубине  $1500 \div 2000$  м. Вдоль берега проходит основное черномор-

ское течение, скорость которого может достигать полутора узлов (0.75 м/с). В свою очередь, это не может не оказывать регионального влияния на распространение пятен загрязнений в водной среде.

Цель данной работы состояла в проведении натурного эксперимента по обнаружению эмульгированных нефтепродуктов в восточной части Черного моря и определении региональных особенностей их распространения. Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие задачи:

- модернизация лабораторной установки и методики проведения эксперимента;
- проведение натурного эксперимента;
- анализ полученных результатов.

## 1. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Акустический способ обнаружения эмульгированных нефтепродуктов основан на том известном факте, что характер распространения акустических волн в море определяется рядом факторов, обусловленных свойствами самой водной среды. В однородной бесконечной среде распространение упругих акустических колебаний описывается скалярным волновым уравнением [13]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = C^2 \nabla^2 P.$$

Здесь  $P$  – динамическое избыточное давление, Па;  $t$  – время, с;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $C$  – скорость распространения звука, м/с. В соответствии с этим уравнением, при заданной начальной форме возмущения характер распространения звуковых волн на любом расстоянии от источника определяется параметром  $C$ . В то же время, для скорости распространения упругих колебаний в однородной среде (согласно закону Гука) справедливо соотношение

$$C = \sqrt{\frac{X}{\rho}},$$

где  $X$  – модуль объемной упругости;  $\rho$  – равновесная плотность. Указанные величины характеризуют морскую среду и зависят от трех главных факторов: температуры  $T^\circ$ , солености морской воды  $s$  и гидростатического давления  $P_h$  в рассматриваемой точке морской среды. Это позволяет характеризовать скорость звука как функцию трех переменных:

$$C = f(T^\circ, s, P_h).$$

Именно на этом принципе основаны косвенные измерения скорости звука. По данным – температуре, солености, гидростатическом давлении, подставляемых в одно из эмпирических соотношений (формулы Вуда, Лероя, Вильсона, Берха и др.), определяется скорость звука. Современные косвенные измерители скорости звука имеют высокочувствительные термические, электропроводные и гидростатические датчики, связанные через аналого-дискретные преобразователи с микропроцессорами, которые в реальном масштабе времени проводят расчет и округление скорости распространения звука в морской среде с точностью до  $0.005 \div 0.01$  м/с. Результаты, получаемые с помощью косвенных измерителей скорости звука, зависят только от главных гидрологических характеристик: температуры, солености (электропроводности) морской воды и гидростатического давления в рассматриваемой точке.

Учтем также, что скорость – это по определению первая производная от пути, пройденного акустической волной, по времени, т. е.

$$C = \frac{dS}{dt}.$$

На этом основан принцип работы прямых измерителей скорости звука. Чем точнее известно расстояние между источником и приемником звука, чем точнее определяется время прохождения этого расстояния акустическим сигналом, тем выше точность измерения. Современные прямые измерители скорости звука позволяют фиксировать ее с точностью до  $0.001 \div 0.01$  м/с.

Исследования, выполненные в лабораторных условиях [10], показали, что в чистой морской воде при различных термических ( $T^\circ = 10 \div 20^\circ\text{C}$ ) и халинных ( $s = 13 \div 18 \%$ ) характеристиках синхронно выполненные прямые и косвенные измерения скорости звука отличаются не более, чем на  $0.3 \div 0.5$  м/с. При внесении в измеряемый водный объем различных антропогенных загрязнителей в виде строительной пыли, эмульгированных нефтепродуктов (бензина, дизельного топлива, машинного масла) расхождения в показателях составляли от 5 до 17 м/с.

Модернизация лабораторной установки осуществлялась на опускаемой платформе гидроакустического комплекса, установленной на научно-исследовательском судне (НИС). Диаметр горизонтальной платформы составлял около двух метров. На ней размещались два прямых и два косвенных измерителя скорости звука. Прямые измерители использовали импульсный и фазовый способы измерения скорости звука. В пер-

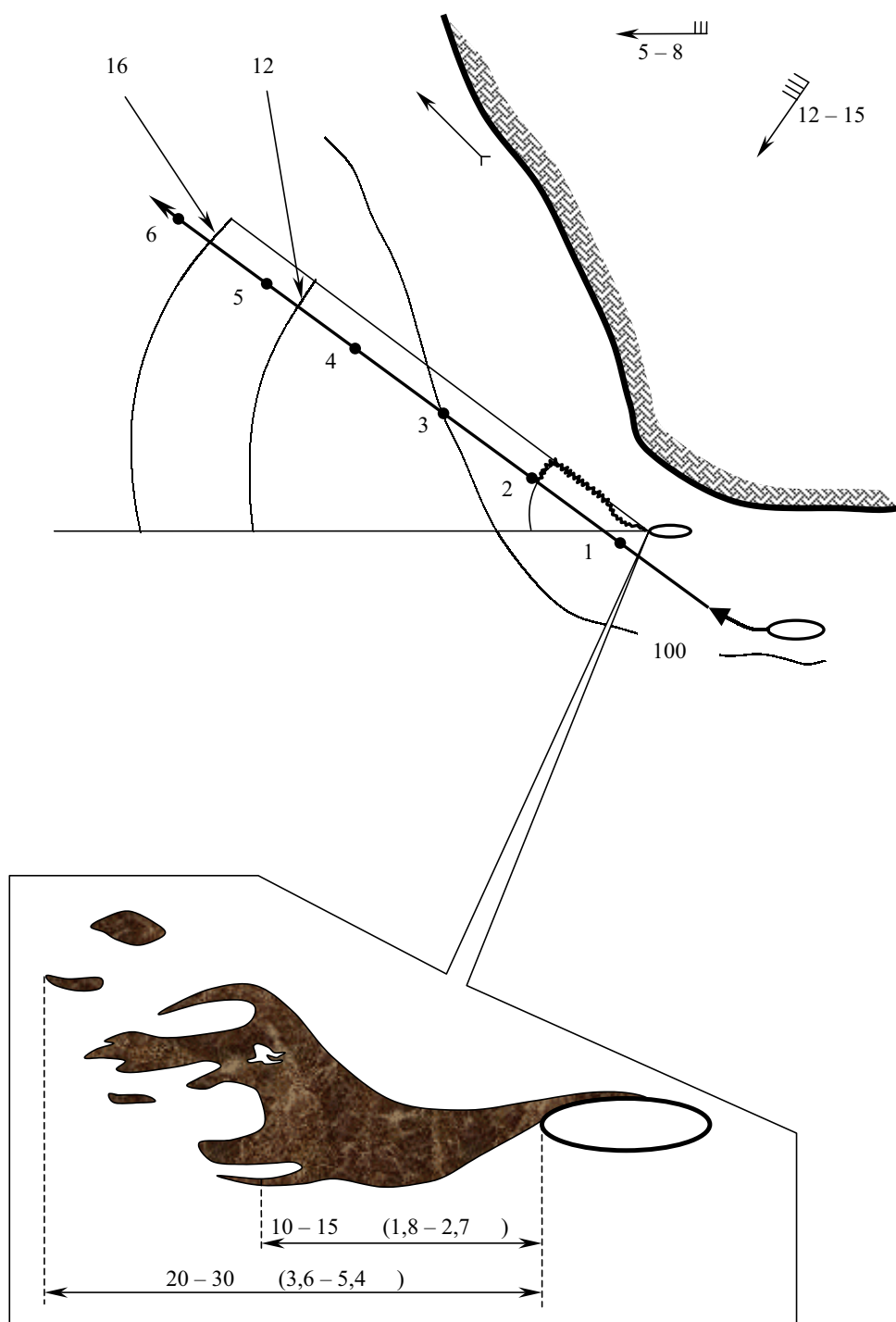


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Табл 1. Результаты гидрологического разреза (скорость звука  $C$ , м/с в зависимости от глубины  $H$ , м.)  
К и П – показания косвенного и прямого измерителей соответственно)

$H$	N 6		N 5		N 4		N 3		N 2	
	К	П	К	П	К	П	К	П	К	П
5	1465.0	1465.4	1465.4	1465.5	1465.7	1465.5	1465.0	1465.2	1465.2	1458.5
10	1465.2	1465.2	1465.2	1465.2	1465.0	1465.2	1465.0	1463.0	1465.2	1458.0
15	1465.0	1464.8	1465.0	1465.0	1464.5	1463.5	1464.5	1460.0	1464.8	1458.0
20	1464.7	1464.8	1464.5	1462.5	1464.5	1460.0	1464.5	1459.1	1464.5	1458.0
25	1464.2	1464.6	1464.3	1460.1	1464.5	1459.5	1464.3	1458.2	1464.2	1459.0
30	1464.0	1464.0	1464.2	1458.2	1464.2	1458.2	1464.3	1458.5	1464.0	1460.0
35	1464.2	1463.5	1464.2	1458.0	1464.0	1458.0	1464.1	1458.7	1463.8	1460.5
40	1463.8	1463.0	1464.0	1458.0	1464.0	1458.2	1464.1	1459.0	1463.5	1460.5
45	1463.5	1462.5	1463.5	1458.0	1463.7	1459.0	1463.8	1460.0	1463.5	1460.5
50	1463.5	1462.0	1463.5	1458.2	1463.5	1459.5	1463.5	1460.5	1463.5	1462.0
55	1463.3	1462.5	1463.3	1458.4	1463.3	1460.0	1463.5	1460.8	1463.2	1463.0
60	1463.3	1463.0	1463.3	1458.6	1463.3	1460.6	1463.4	1460.9	1463.3	1463.0
65	1463.0	1460.0	1463.1	1458.9	1463.8	1460.8	1463.4	1461.2		
70	1463.0	1460.2	1463.0	1459.1	1463.2	1462.0	1463.4	1461.8		
75	1463.0	1460.5	1463.0	1459.5	1463.2	1462.2	1463.2	1462.2		
80	1463.2	1460.8	1463.0	1460.1	1463.0	1462.7	1463.2	1463.0		
85	1463.1	1461.2	1463.0	1460.5	1463.0	1462.4	1463.0	1463.0		
90	1463.2	1461.5	1463.1	1461.2	1463.0	1462.5	1463.0	1463.2		
95	1463.2	1461.7	1463.1	1461.5	1463.2	1462.9	1463.0	1463.2		
100	1463.2	1462.0	1463.2	1461.8	1463.2	1462.9				
105	1463.3	1462.5	1463.3	1462.5	1463.2	1463.0				
110	1463.3	1463.0	1463.3	1463.0	1463.3	1463.1				
115	1463.4	1463.5	1463.4	1463.5	1463.4	1463.2				

вом косвенном измерителе скорости звука был реализован один температурный канал, гидростатическое давление учитывалось счетно-решающим устройством за счет глубины кабель-троса, а солёность вводилась вручную по средним региональным данным. Во втором косвенном измерителе были задействованы каналы регистрации температуры, электропроводности и гидростатического давления. В качестве данных прямого или косвенного измерения принималась полусумма показаний, снятых с двух измерителей.

Методикой проведения эксперимента предусматривалось выполнение гидрологического разреза по середине наиболее вероятного сектора распространения нефтяного загрязнения. Разрез должен был выполняться через 10 ÷ 20 часов после начала нефтяного разлива. Интервал между станциями составлял 3 ÷ 6 морских миль. В каждой станции (точке зондирования) фиксировалось значение скорости на определенных горизонтах. Дискретность горизонтов должна была обеспечивать возможность восстановления наиболее общей кар-

тины распространения антропогенного загрязнения. Разрез следовало завершить тогда, когда при очередном зондировании антропогенные загрязнения отсутствовали (считалось, что при этом расхождения в показаниях измерителей скорости звука не превышают 0.5 м/с).

Безусловно, заблаговременно спланировать эксперимент, связанный с нефтяным разливом, можно только в общих чертах. Детальная проработка начинается с момента получения информации о чрезвычайной ситуации, вызванной выбросом нефтепродуктов в море.

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Нефтеналивное судно, укрываясь от штормовой погоды, подходило к берегу и налетело на скалистую отмель на одном из участков восточного побережья Черного моря. Судно получило повреждение винтов, рулей, корпуса и донно-заборной арматуры и, потеряв управление и возможность

движения, стало на якорь. Экипажем принимались меры по борьбе за его живучесть. Судно оставалось на плаву, но остановить утечку дизельного топлива из поврежденных танков не представлялось возможным.

К утру ветер ослабился с  $12 \div 15$  до  $5 \div 8$  м/с и изменил направление с северо-восточного на восточное. Волнение уменьшилось с  $3 \div 4$  до  $2 \div 3$  баллов. Отметим, что в районе аварии основное черноморское течение направлено параллельно береговой черте при скорости  $0.5 \div 0.7$  узла.

Аварийно-спасательные суда прибыли к месту аварии через 12 часов после начала разлива дизельного топлива, уменьшили его утечку, но полностью прекратить поступление нефтепродуктов удалось только через 4.5 часа. Всего в море попало более 200 т топлива.

Вместе с аварийно-спасательными судами к месту аварии прибыло НИС, оснащенное гидроакустическим комплексом с опускаемой антенной, на специальной площадке которой были установлены прямые и косвенные измерители скорости звука. Визуально наблюдаемое пятно дизельного топлива на водной поверхности имело протяженность более 30 кабельтовых (3 мили). НИС выполнило гидрологический разрез из семи станций, интервал между которыми составлял 3 мили. Первая станция выполнялась через 12 часов, а последняя – через 17 часов после аварии (см. рис. 1). В первой и седьмой станциях значения, зафиксированные прямыми и косвенными измерителями скорости звука, практически не отличались. Результаты измерений в станциях N 2 ÷ N 6 представлены в табл. 1.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Видно, что максимальная разница в показаниях прямого и косвенного измерителей скорости звука достигает 7.2 м/с. Уменьшение величины, регистрируемой прямым измерителем, вызвано антропогенным фактором – эмульгированным нефтяным загрязнением. Абсолютные значения расхождений приведены в табл. 2, а геометрическая интерпретация гидрологического разреза – на рис. 2.

Во второй станции (на удалении 3 мили от источника загрязнения) наблюдается наибольшая плотность антропогенного загрязнения. Его ядро располагается от поверхности до горизонта 20 м. По мере дальнейшего погружения плотность эмульгированного загрязнения слабеет, и в придонном десятиметровом слое оно полностью отсутствует.

Табл. 2. Разница в показаниях косвенного и прямого измерителей скорости звука

H, м	N 6	N 5	N 4	N 3	N 2
5	-0.4	-0.1	0.2	-0.2	6.7
10	0.0	0.0	-0.2	5.0	7.2
15	0.2	0.0	1.0	4.5	6.8
20	-0.1	2.0	4.5	5.6	6.5
25	-0.4	4.2	5.0	6.1	5.2
30	0.0	6.0	6.0	5.8	4.0
35	0.7	6.2	6.0	5.4	3.3
40	0.8	5.0	5.8	5.1	3.0
45	1.0	5.5	4.7	3.8	3.0
50	1.5	5.3	4.0	3.0	1.5
55	0.8	4.9	3.0	2.7	0.2
60	0.3	4.7	2.7	2.5	0.0
65	3.0	4.2	2.5	2.2	
70	2.8	3.9	1.2	1.6	
75	2.5	3.5	1.0	1.0	
80	2.4	2.9	0.7	0.2	
85	1.9	2.5	0.6	0.0	
90	1.7	1.9	0.5	0.2	
95	1.5	1.6	0.3	0.2	
100	1.2	1.4	0.3		
105	0.8	0.8	0.2		
110	0.4	0.0	0.2		
115	-0.1	-0.1	0.2		

В третьей станции, находящейся на расстоянии 6 миль от аварийного судна, ядро загрязнения располагается между двадцати- и тридцати пятиметровыми горизонтами, в то время как весь эмульгированный нефтяной след занимает слой от 10 до 75 м. Придонный двадцатиметровый слой остается неподверженным загрязнению.

В четвертой станции ширина нефтяного загрязнения незначительно (на 5 м) снижается, контрастность ядра уменьшается, причем оно расширяется до 20 м.

В пятой станции, выбранной на расстоянии 12 миль от аварийного судна, глубина распространения эмульгированных нефтепродуктов достигает 100 м. При этом ширина загрязнения равна 85 м. Его ядро находится между двадцати- и шестидесятиметровыми горизонтами. На глубине 35 м отмечается аномальное скопление нефтепродуктов (разница в показаниях измерителей составляет 6.2 м/с). Пятнадцатиметровый приповерхностный слой чист от эмульгированных нефтепродуктов.

В шестой станции эмульгированное нефтяное загрязнение рассеяно. Наибольшее скопление не-

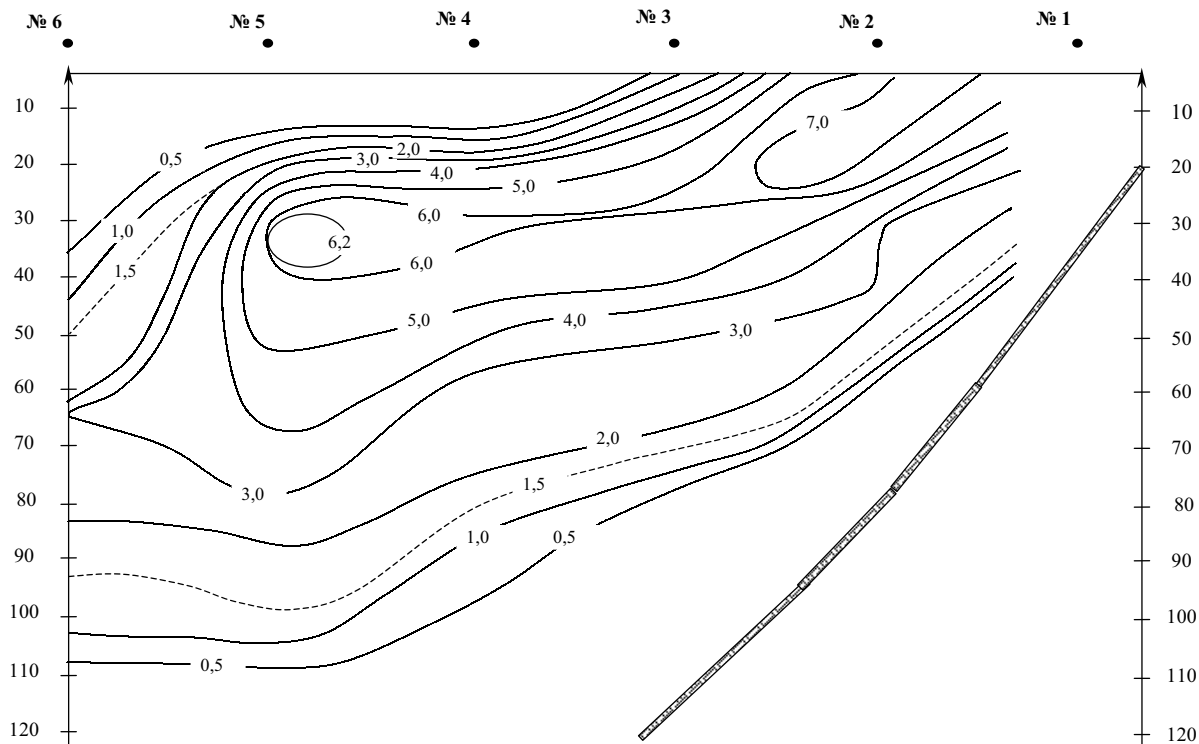


Рис. 2. Геометрическая интерпретация гидрологического разреза (в терминах разницы показаний косвенного и прямого измерителей)

фтепродуктов наблюдается на горизонте  $65 \div 75$  м, где разница в показаниях измерителей скорости звука не превышает 3 м/с.

Условно ограничивая зону присутствия загрязнения изолинией 0.5 м/с, получаем следующую картину. За  $16 \div 17$  часов разливающегося дизельное топливо, вследствие интенсивного влияния водной поверхности, переходит в эмульгированное состояние и на расстоянии  $3 \div 6$  миль исчезает из приповерхностного слоя. Формируется переносимый течением поток эмульгированных нефтепродуктов, ширина которого достигает  $75 \div 80$  м. Они не достигают дна на всем протяжении загрязнения (более 15 миль), оставаясь в деятельном слое вод.

Плотность (концентрация) эмульгированного загрязнения выше в его верхней части, а нижние границы более размыты. Относительная параллельность изолиний свидетельствует о появлении аномального антропогенного массопереноса – своеобразного потока водно-нефтяной эмульсии. Некоторая деформация изолиний объясняется турбулентными процессами различных мас-

штабов, происходящими в морской черноморской среде.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен акустический способ обнаружения антропогенных загрязнений путем сравнения результатов прямого и косвенного измерений скорости звука, позволяющий проводить мониторинг (контроль распространения) эмульгированных нефтепродуктов в водной среде.
2. Перенос эмульгированных объемных нефтяных загрязнений осуществляется водным потоком, являющимся результатом действия основного (постоянного) черноморского течения и ветровых течений.
3. Региональными особенностями распространения эмульгированных объемных нефтяных загрязнений восточной части Черного моря является то, что они:

- не достигают дна в относительно узкой полосе континентального шлейфа;
  - остаются в деятельном слое вод, распространяясь в глубоководных районах;
  - формируют своеобразный антропогенный поток с четко выраженным ядром, контрастными верхними и размытыми нижними горизонтами, протяженность которого определяется скоростью действующего течения, количеством разлитого нефтепродукта и рядом других факторов.
1. *Материалы пятого международного семинара "Стихия-2002"*. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2002. – 340 с.
  2. *Turrell W. R. Modelling the Braer oil spill – A retrospective view* // *Marine Pollut. Bull.* – 1994. – **28**. – P. 211–218.
  3. *Бровченко И. А. Модель образования спектра нефтяных капель в приповерхностном слое океана* // *Прикл. гидромех.* – 2004. – **6(78)**, N 2. – С. 20–26.
  4. *Монин А. С., Озмидов Р. В. Турбулентность в океане* // *Физика океана. Гидрофизика океана.* – М.: Наука, 1978. – С. 148–207.
  5. *Озмидов Р. В. К вопросу о минимизации негативных воздействий сбросов в прибрежную зону моря* // *Океанология.* – 1996. – **36**, N 1. – С. 20–25.
  6. *Пясковский Р. В., Молчанов В. И. Моделирование динамического переноса загрязняющих веществ в Невской губе* // *Метеорология и гидрология.* – 1976. – N 3. – С. 68–77.
  7. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б., Ющенко С. А. Моделирование распространения пассивной примеси в Севастопольских бухтах* // *Морской гидрофиз. ж.* – 1999. – N 3. – С. 29–42.
  8. *Кушнир В. М., Федоров С. В. Диффузия вещества с нейтральной плавучестью из подводного трубопровода при воздействии квазистационарных и волновых течений* // *Прикл. гидромех.* – 2005. – **7(79)**, N 1. – С. 43–49.
  9. *ASCE Task Committee on Modelling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. State of art review of modeling transport and fate of oil spills* // *J. Hydraul. Engng.* – 1996. – **122** N 11. – P. 594–609.
  10. *Азаренко Е. В., Дивизинюк М. М., Костенко Ю. П., Третьякова Л. В. Акустическая регистрация изменений в состоянии морской водной среды* // *Сборник научных трудов СНИЯЭиП.* – 2004. – Вып. 13. – С. 96–102.
  11. *Азаренко Е. В., Дивизинюк М. М., Дымченко И. В., Козловская О. Н. Дистанционные методы обнаружения нефтяных загрязнений* // *Сборник научных трудов СНИЯЭиП.* – 2003. – Вып. 9. – С. 155–161.
  12. *Третьякова Л. В., Дивизинюк М. М., Азаренко Е. В. Обнаружение эмульгированных нефтяных загрязнений в северо-западной части Черного моря* // *Сборник научных трудов СНИЯЭиП.* – 2004. – Вып. 11. – С. 153–159.
  13. *Физика океана* / Под ред. Ю. П. Доронина. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.