

УДК 534.08:551.324.85

ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕДОХОДА В ПРОЛИВНЫХ ЗОНАХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Е. В. АЗАРЕНКО, М. М. ДИВИЗИНЮК, С. В. ЛАЗАРЕНКО

Севастопольский национальный институт ядерной энергии и промышленности

Получено 18.07.2003

Рассмотрено применение гидроакустических средств для обнаружения ледохода и контроля за ледовой обстановкой в проливных зонах. Анализ полученных экспериментальных данных позволил выделить этапы эволюции ледового покрова акватории, порождающие специфические фоновые акустические сигналы. Показано, что знание их характерных особенностей позволяет эффективно отслеживать и прогнозировать ледовую обстановку гидроакустическими методами.

Розглянуто застосування гідроакустичних засобів з метою виявлення льодоходу та контролю за льодовою обстановкою в проливних зонах. Аналіз одержаних експериментальних даних дозволив виділити етапи еволюції льодового покрову акваторії, які породжують специфічні фонові акустичні сигнали. Показано, що знання їхніх характерних особливостей дозволяє ефективно відслідковувати й прогнозувати льодову обстановку гідроакустичними методами.

An application of hydroacoustic means for detection of an ice drift and the control over ice conditions in the channel zones is considered. Analysis of the received experimental data allows to allocate the stages of evolution of an ice cover of water areas, which generate specific background acoustic signals. It is shown, that knowledge of their characteristic features allows the efficient tracing and predicting of ice conditions by hydroacoustic methods.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что наличие ледового покрова на поверхности акватории затрудняет, а зачастую, делает невозможной навигацию в осенне-зимний период. Более того, ледоходы в Керченском проливе неоднократно служили причинами серьезных аварий судов и инженерных сооружений [1]. Исходя из этого одной из важных задач прикладной акустики является мониторинг ледовой обстановки и обнаружение ледохода в проливных зонах и районах интенсивного судоходства.

Эксперименты, проведенные американскими исследователями в заливе Амундсена, показали, что растрескивание льда сопровождается генерацией специфических акустических сигналов – интенсивных всплесков, регистрируемых в различных частотных диапазонах [2]. По амплитуде всплесков и их продолжительности можно судить о размерах появившихся трещин, расщелин и т.п. Одновременно под действием постоянных течений, ветра и других гидрометеорологических факторов внутри ледяного покрова могут происходить деформации и разломы, которые регистрируются гидрофонами, расположенными в центре дрейфующей льдины, но не фиксируются визуально.

Кроме того, проведен ряд экспериментов и построена теоретическая модель, позволяющая объяснить механизм образования звуков различных тонов при трении соседних ледовых полей [3].

В цитируемой работе отмечен ряд характерных акустических признаков, присущих данному явлению на разных пространственно-временных масштабах. Это позволяет использовать гидроакустические средства для контроля ледовой обстановки.

Актуальность акустического контроля за ледовой обстановкой объясняется еще и тем, что существующие на сегодняшний день способы обнаружения ледохода, заключающиеся в визуальном наблюдении за ледовым полем, не позволяют фиксировать изменение его состояния в ночное время или в условиях ограниченной видимости (снегопада, метели и т.п.). При этом треск расслаивающихся льдин и шум от рассыпающихся ледяных торосов, распространяющиеся на большие расстояния, независимо от параметров нижних слоев атмосферы и диапазона видимости, позволяют судить о начале ледохода [4].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И ЦЕЛИ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является создание принципиально нового способа обнаружения ледохода в проливных зонах, независимо от времени суток и диапазона видимости.

Известно, что поверхность акватории, покрытая льдом, не вносит вклада в фоновые шумы, в результате чего создаются благоприятные условия для гидроакустических наблюдений [5]. Источни-

ки шумовых сигналов, расположенные в полынье или у кромки льда, обнаруживаются на расстояниях, значительно превышающих дальности обнаружения этих же источников при отсутствии ледового покрова. Так, зимой в Керченском проливе в штилевую погоду работа стояночных дизель-генераторов буксиров и транспортов прослушивается подкильными шумопеленгаторами на расстояниях $2 \div 2.5$ и $3 \div 3.5$ км. Когда водная поверхность скована льдом толщиной от 40 до 150 мм, шум от этих объектов устойчиво регистрируется на дистанциях $12.5 \div 19$ км.

Если улучшение условий гидроакустического наблюдения связано с появлением ледового покрова, то логично предположить, что ухудшение условий гидроакустического наблюдения акватории при его наличии может быть связано с нарушением сплошности ледяного панциря. Следовательно, осуществление контроля за гидроакустическими характеристиками проливной зоны (по косвенным критериям) позволит оценить состояние и параметры ледяного поля.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать уравнения дальности действия гидроакустических средств (ГАС) и выявить главный фактор, характеризующий условия гидроакустического наблюдения в проливной зоне;
- разработать методику проведения эксперимента по использованию ГАС кораблей и судов для обнаружения ледохода;
- провести натурный эксперимент.

2. АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГАС

Обнаружение гидроакустических сигналов шумопеленгаторными станциями происходит при условии, что уровень сигнала P_C превышает уровень помех P_{Π} или равен ему:

$$P_C^2 \geq \delta^2 P_{\Pi}.$$

Здесь δ – коэффициент распознавания ГАС.

Для шумопеленгаторов это уравнение принимает вид

$$A \frac{P_{\text{ШО}}^2}{D} 10^{-0.1\beta D_{\text{км}}} \geq \delta^2 \frac{P_{\Pi}^2}{K_{\text{ОА}}}.$$

Взяв десятичный логарифм от обеих частей урав-

нения, получим

$$\begin{aligned} 10 \lg A - 20 \lg D - \beta D_{\text{км}} &\geq \\ &\geq 20 \lg \delta + 20 \lg P_{\Pi} - 20 \lg P_{\text{ШО}} - 10 \lg K_{\text{ОА}}, \end{aligned}$$

где A – фактор аномалии, учитывающий концентрацию акустических волн в зависимости от конфигурации поля (безразмерная величина); D – дальность обнаружения шумящего объекта (м); $D_{\text{км}}$ – то же (км); β – коэффициент затухания акустических волн (дБ/км); P_{Π} – уровень помех работе ГАС, приведенный к полосе 1 Гц на частоте 1 кГц; $P_{\text{ШО}}$ – уровень шумов обнаруживаемого объекта на расстоянии 1 м, приведенный к полосе 1 Гц на частоте 1 кГц; $K_{\text{ОА}}$ – коэффициент осевой концентрации акустической антенны ГАС.

Фактор аномалии зависит от конфигурации акустического поля, которое, в свою очередь, определяется вертикальным распределением скорости звука в районе распространения акустических волн, глубиной погружения источника и приемника. В зимнее время вертикальный профиль скорости звука в Керченском проливе не зависит от наличия ледового покрова и остается неизменным: скорость звука плавно увеличивается с глубиной на $1 \div 2$ м/с. Глубина погружения источника определяется осадкой судов, а расположение приемника звука – заглублением акустической антенны ГАС. Эти параметры также остаются без изменений. Следовательно, фактор аномалии A есть величина постоянная, не зависящая от наличия ледового покрова. Коэффициент затухания акустических волн β определяется плотностью морской воды, количеством растворенных в ней газов и т. д. Эта величина зависит, главным образом, от рабочего частотного диапазона акустических колебаний и географического региона. Практически на всей акватории Черного моря для фиксированной частоты эта величина постоянна. Коэффициент распознавания δ и коэффициент осевой концентрации акустической антенны $K_{\text{ОА}}$ являются техническими параметрами и постоянны для однотипных ГАС. Уровень приведенных шумов, излучаемых стояночными дизель-генераторами буксиров и транспортов, изменяется в пределах $10 \div 20$ %, что может приводить к вариации оценки дальности обнаружения не более чем на $5 \div 10$ %. Следовательно, при однотипной структуре поля скорости звука увеличение дальности обнаружения шумящих объектов с $2 \div 3.5$ км до $12.5 \div 19$ км может произойти только за счет уменьшения уровня помех работе ГАС.

Уровень помех работе ГАС [6] складывается из собственных (внутренних) шумов ГАС и наводок

от электрооборудования носителя ГАС ($P_{ГАС}$), шумов, излученных носителем ГАС ($P_{НС}$), и шумов морской среды (P_M):

$$P_{\Pi} = P_{ГАС} + P_{НС} + P_M.$$

Первое слагаемое определяется техническими параметрами гидроакустической станции, а второе – конструктивными особенностями носителя ГАС. В нашем случае их можно считать постоянными, так как в экспериментах использовались однотипные ГАС, установленные на однотипных научно-исследовательских судах, стоящих на якоре. Поэтому уменьшение уровня помех могло происходить только за счет изменения третьего слагаемого.

Шумы морской среды порождаются совокупностью источников естественного и искусственного происхождения. К шумам естественного происхождения относятся динамические (генерируемые течениями, гидрометеорологическими явлениями и др.), сейсмические и биологические шумы. Источниками искусственных шумов являются технические сооружения, расположенные на дне и в прибрежных районах, а также суда, находящиеся в проливной зоне. Уменьшение шумов естественного происхождения при наличии ледового покрова обуславливается отсутствием волнения водной поверхности, исключением воздействия осадков и ветра на приповерхностный водный слой, относительно однородным характером течения на фоне благоприятных вышеперечисленных факторов. Уровень шумов искусственного происхождения снижается вследствие уменьшения интенсивности судоходства. С началом зимней навигации количество судов, одновременно находящихся на ходу и якорных стоянках в Керченском проливе, падает более, чем на порядок (с $80 \div 200$ единиц до $5 \div 10$ и менее).

Таким образом, уровень шумов морской среды (фактически, уровень фонового шума в проливной зоне) может быть использован как косвенный критерий для оценки состояния ледового покрова и обнаружение ледохода в проливной зоне.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ЛЕДОХОДА

Гидроакустические станции, установленные на научно-исследовательских судах (НИС), в зависимости от расположения гидроакустической антенны, подразделяются на подкильные и опускаемые. У первых антенны размещаются в специальных

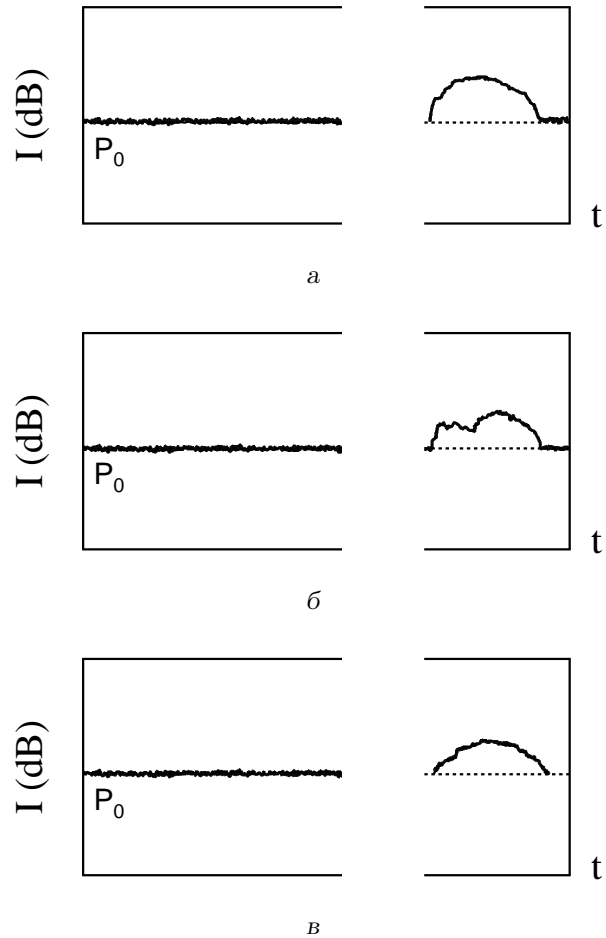


Рис. 1. Рекордограммы первой фазы экспериментов для различных диапазонов:

а – от 2 до 10 кГц, б – от 13 до 17.5 кГц, в – от 40 до 41 кГц

обтекателях и выгородках, конструктивно выполненных на $3 \div 5$ м ниже ватерлинии. Антенны опускаемых ГАС могут заглубляться до горизонтов $70 \div 100$ м. В условиях Керченского пролива и на подходах к нему они, как правило, погружаются на глубину от 10 до 30 м.

Частотный диапазон ГАС в пассивном режиме охватывал три участка:

- 1) $2 \div 11$ кГц;
- 2) $13 \div 17.5$ кГц;
- 3) $40 \div 41$ кГц.

Все ГАС в своем составе имели регистраторы (встроенные самописцы), фиксировавшие обнаруженные шумящие объекты. Дополнительно к прямоусилительным трактам подключались самописцы Н-110 и КС-4, которые осуществляли регистрацию не только шумящих объектов, но и уровень

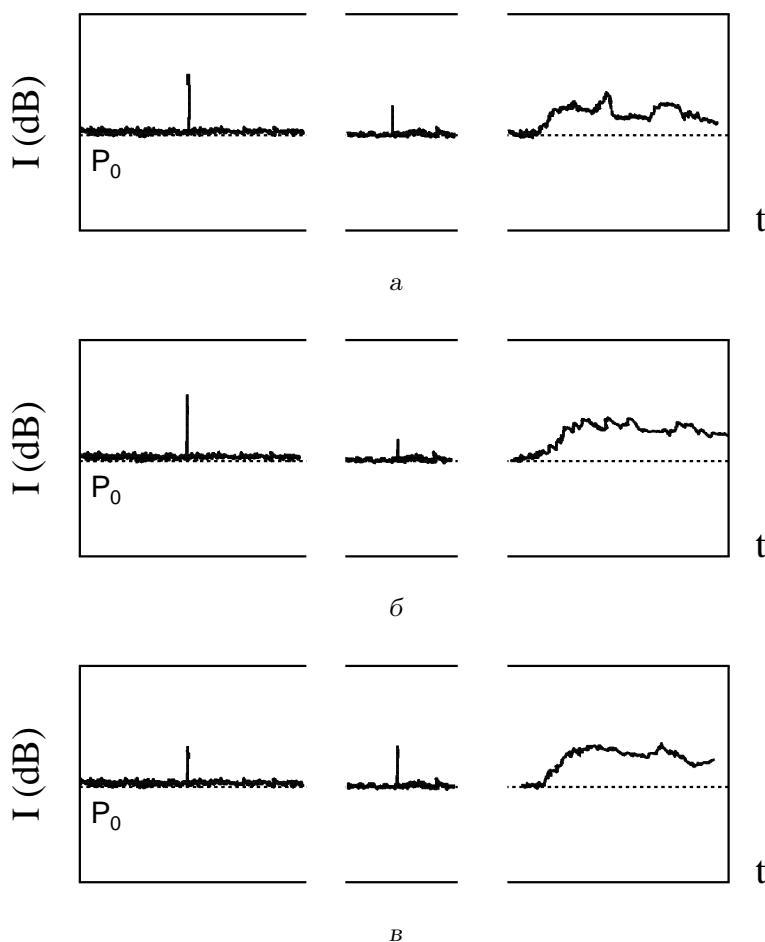


Рис. 2. Рекордограммы второй фазы экспериментов для различных диапазонов:
а – от 2 до 10 кГц, б – от 13 до 17.5 кГц, в – от 40 до 41 кГц

фоновых шумов, принимаемых ГАС. С телефонных выходов ГАС регистрируемые шумы дополнительно записывались на магнитные носители. Это позволяло проводить их последующую обработку на лабораторных стационарных спектроанализаторах.

В натуральных экспериментах в Керченском проливе постоянно было задействовано три НИС. Одно из них стояло у причала в порту Камыш-Бурун, второе занимало позицию на якоре в 15 км от берега на подходах к Керченскому проливу со стороны Черного моря, третье располагалось в непосредственной близости от границы ледового покрова. На всех судах велось круглосуточное гидроакустическое наблюдение с помощью подкильных и опускаемых станций, работающих в пассивном режиме. Судовые механизмы (дизель-генераторы) использовались в штатных (повседневных) усло-

виях, а на НИС, стоящем у причала, запускались эпизодически.

Данные о ледовой обстановке и состоянии ледового покрова постоянно поступали от береговых постов, судов, проходящих по пробитому в ледяном поле каналу, эпизодически – от самолета и вертолета ледовой разведки и сопоставлялись с результатами гидроакустического наблюдения.

Для участия в экспериментах в течение нескольких суток привлекалось еще два НИС, ГАС которых работали в частотном диапазоне, отличном от диапазона станции судна, постоянно стоящего на якоре. Упомянутые суда располагались на подходах к Керченскому проливу.

Эксперименты были начаты после того, как Керченский пролив сковало льдом, продолжались в течение шести недель и завершились после стабилизации навигационной обстановки в проливе.

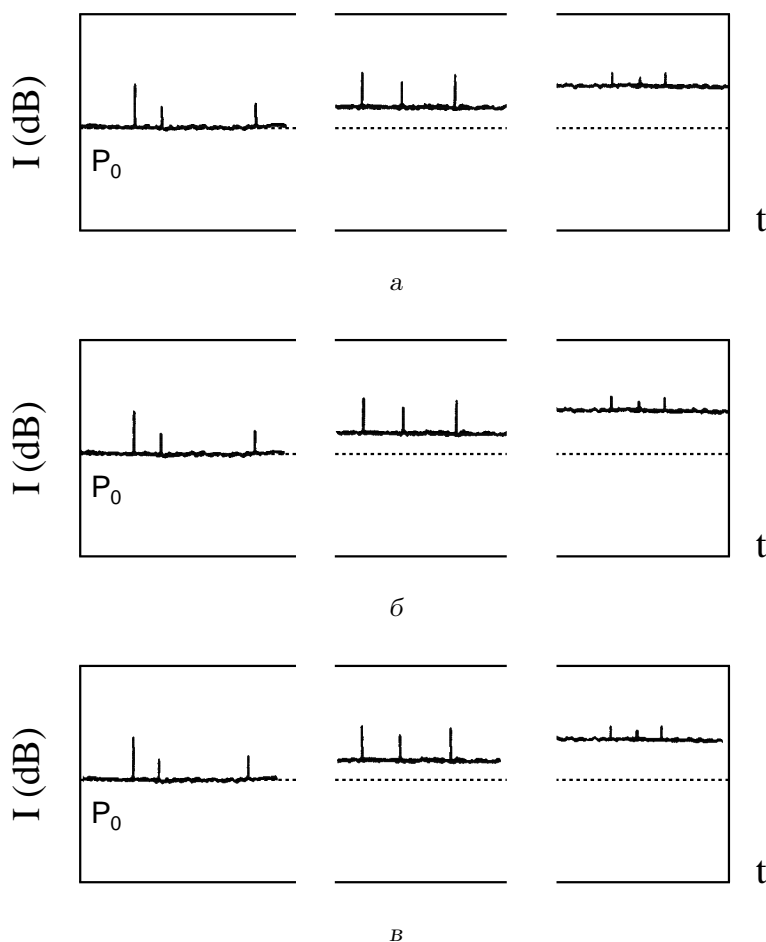


Рис. 3. Рекордограммы третьей фазы экспериментов для различных диапазонов:
 а – от 2 до 10 кГц, б – от 13 до 17.5 кГц, в – от 40 до 41 кГц

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Систематизация результатов гидроакустического наблюдения и данных о ледовой обстановке позволила выделить следующие фазы экспериментов:

- 1) сплошной ледовый покров;
- 2) появление трещин в ледяном поле;
- 3) интенсивное расширение льда;
- 4) ледоход.

4.1. Первая фаза (сплошной ледовый покров)

Керченский пролив был полностью скован ледяным панцирем. Толщина льда колебалась на различных участках от 40 до 150 мм. На всех ГАС

фиксируется минимальный уровень шумов. Этот уровень был принят в качестве исходной точки отсчета (для каждого частотного диапазона он обозначен как P_0). Описанная картина сохранялась в течение суток. Все три НИС – стоящее у причала, стоящее на якоре у кромки ледового покрова и находящееся на якоре в 15 км от берега – регистрировали одинаковый минимальный уровень шумов (рис. 1).

Когда ледокольный буксир вышел из порта и начал работу по пробиванию судоходного канала во льду, его шумы и треск раскалываемого льда регистрировались всеми гидроакустическими станциями (работе буксира соответствует повышенный уровень акустического сигнала в правой части графиков на рис. 1).

После окончания проводки судов по каналу регистрируемый уровень шумов вновь стал равным

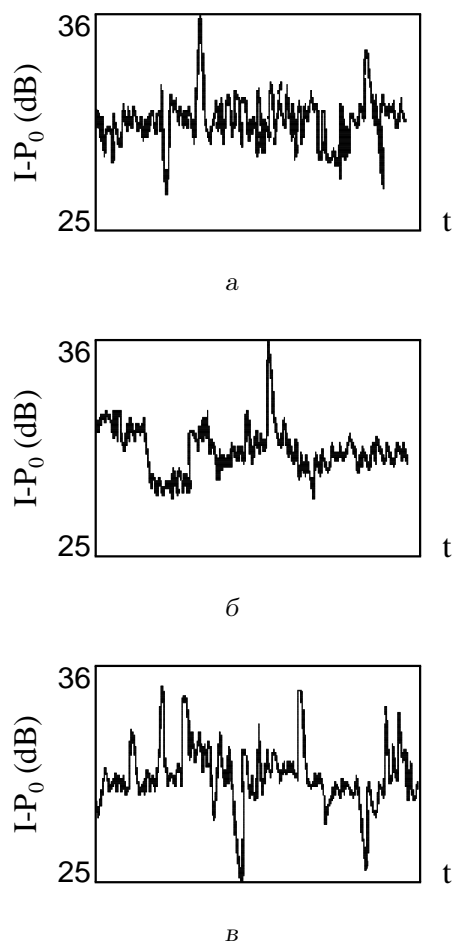


Рис. 4. Рекордограммы четвертой фазы экспериментов для различных диапазонов: а – от 2 до 10 кГц, б – от 13 до 17.5 кГц, в – от 40 до 41 кГц

первоначальному во всех частотных диапазонах.

4.2. Вторая фаза (появление трещин в ледяном поле)

Ночью всеми гидроакустическими станциями был зарегистрирован всплеск, вызванный кратковременным треском большой интенсивности. Днем авиационная ледовая разведка установила, что ледовый панцирь раскололся надвое, вследствие чего появилась проталина шириной от 0.5 до 2 м. Это позволило идентифицировать упомянутый всплеск как результат разлома ледового покрова.

В последующие дни фоновый уровень шумов оставался практически без изменений. При проводке судов по каналу интенсивность шума возрастала: источник возникновения шума четко регистрировался операторами всех гидроакустических

станций во всех частотных диапазонах. Фиксировались интенсивные кратковременные всплески, вызванные появлением новых трещин в ледяном покрове. При этом фоновый уровень шумов в целом не менялся (рис. 2).

4.3. Третья фаза (интенсивное расширение льда)

Частота появления всплесков, вызванных появлением новых трещин, возросла от $0.05 \div 0.1$ час⁻¹ до $2 \div 5$ час⁻¹. Интенсивность всплесков уменьшилась в $1.5 \div 3.5$ раза. Фоновый шум увеличился на $3 \div 5$ дБ. Визуальная разведка ледового поля выявила, что теперь оно было усеяно трещинами паутинообразной формы.

Из-за наличия ветра, действующего на ледовый покров, и течения, постоянно существующего в проливной зоне, происходила деформация ледового покрова, сопровождавшаяся шумом деформируемого льда и треском раскалываемых льдин. По этой причине фоновый шум постепенно увеличивался: он превысил свой первоначальный уровень на $5 \div 8$ дБ, а затем – на $10 \div 15$ дБ (рис. 3).

С ростом фонового шума амплитуды единичных всплесков, вызванных разломом больших льдин, уменьшались. К концу третьей фазы фоновый шум превысил свой нулевой уровень на $25 \div 30$ дБ, а единичные всплески практически прекратились. При этом ледовый покров выглядел как сплошное ледяное поле. На отдельных участках образовались торосы. Обильные осадки и низкие температуры в ночное время сделали трещины, которые накануне в большом количестве наблюдались авиационной разведкой, невидимыми для оптоэлектронных и визуальных средств контроля.

4.4. Четвертая фаза (ледоход)

На всех гидроакустических станциях превышение уровня фонового шума достигло максимальной величины. В зависимости от процессов, происходивших при движении льда (разрушения ледяных торосов, образования новых заторов из льдин, разламывания больших льдин на мелкие, и т. п.), превышение нулевого фонового шума в диапазоне $2 \div 10$ кГц колебалось в пределах $30 \div 36$ дБ, в диапазоне $13 \div 17.5$ кГц – в пределах $28 \div 36$ дБ, а в полосе $40 \div 41$ кГц – от 25 до 35 дБ (рис. 4).

Эта акустическая (шумовая) картина сохранялась в течение всего ледохода и устойчиво регистрировалась всеми ГАС как на судах, расположенных у причала в порту, так и на НИС, стоящих на якорю в $10 \div 15$ км от проливной зоны.

ВЫВОДЫ

1. Уровень фоновых шумов в проливных зонах может быть использован в качестве косвенного критерия при оценке состояния ледового покрова в проливных зонах. Уменьшение шумового фона до минимальных значений свидетельствует о сковывании проливной акватории ледяным покровом, появление единичных всплесков – о раскалывании ледяного панциря на части, превышение нулевого (минимального) уровня шумов на $10 \div 15$ дБ – о начале процесса растрескивания льдов и их деформации, а превышение шумовым фоном своего нулевого уровня на $25 \div 36$ дБ является признаком интенсивного движения льдов – ледохода.
2. Гидроакустические станции различного назначения, установленные на научно-исследовательских и других судах, могут эффективно использоваться для косвенного контроля за состоянием ледового покрова в проливных зонах и предупреждения о начале ледохода. При этом судно – носитель гидроакустической станции – может располагать-

ся как у причала в порту, так и на якоре напротив проливной зоны. Эффективность обнаружения ледохода практически не зависит от рабочего частотного диапазона станции (при проведении экспериментов использовались частотные диапазоны $2 \div 17.5$ кГц и $40 \div 41$ кГц).

1. Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П. Катастрофы в Черном море.– К.: Манускрипт, 1994.– 296 с.
2. Fammer D. M., Xie Y. The sound generated by propagating cracks in sea ice // J. Acoust. Soc. Amer.– 1989.– **85**, N 4.– P. 1489–1500.
3. Xie Y., Fammer D. M. The sound of ice break-up and floe interaction // J. Acoust. Soc. Amer.– 1992.– **91**, N 3.– P. 1423–1428.
4. Dwyer R. F. A technique for improving detection and estimation of signal contaminated by under ice noise // J. Acoust. Soc. Amer.– 1983.– **74**, N 1.– P. 124–130.
5. Дивизиюк М. М. Акустические поля Черного моря.– Севастополь: Гос. океанариум, 1988.– 352 с.
6. Богомолов В. М. и др. Акустические шумы и помехи на судах.– Л.: Судостроение, 1984.– 192 с.