

УЯЗВИМЫ ЛИ РОССИЙСКИЕ ПОДВОДНЫЕ ЛОДКИ-РАКЕТОНОСЦЫ В МОРЕ? ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ АКУСТИКИ

Е.В. Мясников

Автор статьи работает в Центре по изучению проблем контроля над вооружениями, экологии и энергетики при Московском физико-техническом институте.

ВВЕДЕНИЕ

В прошлом ядерное оружие служило средством взаимного сдерживания, когда США и СССР, представляли собой две противоборствующие стороны. Сейчас, после окончания эпохи "холодной" войны и образования новых суверенных государств на территории бывшего СССР, из которых только Россия предполагает остаться ядерным государством к третьему тысячелетию, важно чтобы как в США, так и в России произошел процесс переосмысления роли ядерных вооружений, и внесены необходимые изменения в структуру их стратегических сил.

Таблицы в Приложении отражают процесс сокращения ядерных стратегических вооружений. Согласно Договору по СНВ обе стороны к 1997 г. должны уменьшить свои арсеналы соответственно до уровня менее чем 8000 боезарядов с каждой стороны. Более значительные сокращения до уровней в 3000 - 3500 боеголовок предстоят в свете договора СНВ-2, подписанного в январе 1993 г. Существует надежда, что процесс ядерного разоружения не остановится на этом.

Тем не менее, тенденция уменьшения общего количества ядерного оружия затрагивает некоторые вопросы, касающиеся национальной безопасности этих государств. Во-первых, где должно быть развернуто оставшееся вооружение? Договор СНВ-2 запрещает развертывание ракет наземного базирования с разделяющимися головными частями (РГЧ), но предоставляет все еще широкие возможности самим государствам решать, где и как размещать ядерное вооружение. Во-вторых, как обеспечить неуязвимость развернутых систем этих вооружений по отношению к возможным превентивным мерам потенциального противника, в случае если отношения между договаривающимися сторонами вновь станут такими как во времена "холодной" войны?

Исторически структура стратегических ядерных сил каждой из сторон представляет единую триаду, состоящую из

средств наземного, воздушного и подводного базирования. Последним отводится особая роль, поскольку они представляются наиболее неуязвимыми к возможному превентивному удару, а поэтому могут быть средством гарантированного возмездия. Эта роль станет более значимой после предстоящего согласно договору СНВ-2 сокращению ракет наземного базирования с разделяющимися боеголовками к 2003 г., когда подводное ядерное оружие будет составлять около половины арсенала каждой из сторон.

Действительно ли подводные баллистические ракеты (БРПЛ) можно считать надежно защищенными от возможных превентивных мер противника? В отличие от американских политиков, ответ на этот вопрос может оказаться не однозначным со стороны их российских коллег, и тому существуют объективные причины.

Традиционно, технология строительства атомных подводных лодок-ракетоносцев (ПЛАРБ) в СССР уступала американской, поэтому советские ПЛАРБ более уязвимы по отношению к акустическим средствам, которые являются к настоящему времени основными средствами обнаружения подводных лодок.¹ Еще одной из причин является также то, что США находятся в более благоприятном отношении по географическому положению, что позволило им развернуть систему средств обнаружения ПЛ и слежения за ними на путях развертывания бывшего СССР в открытый океан.

С другой стороны, новое поколение подводных лодок стало менее шумным, чем предыдущие, и это существенно снизило обнаружительные характеристики американских сил противолодочной обороны.² Более того, остающиеся в результате сокращений по договору СНВ-2 БРПЛ способны поражать цели почти на всей территории США, находясь на расстоянии в несколько сотен километров от своих баз (см. Приложение).³

Что может угрожать ПЛАРБ России, патрулирующей в прилегающей к своему побережью море (Баренцевом или Охотском), где ее врагу придется столкнуться с

по-прежнему мощными оборонительными силами ВМФ России на море и в воздухе? Не принимая во внимание возможного снижения обороноспособности в ВМФ России из-за экономических трудностей,⁴ может существовать несколько других источников потенциальной угрозы. Во-первых, США способны развернуть сеть стационарных подводных датчиков вблизи баз ПЛАРБ России, что позволит скрытно осуществлять слежение за лодками-ракетоносцами.⁵ Во вторых, прогресс в создании спутниковых средств наблюдения может позволить осуществлять слежение за ПЛАРБ из космоса.⁶ В третьих, и, пожалуй, как кажется на первый взгляд, наиболее реальная и опасная потенциальная угроза состоит в том, что для скрытного слежения могут быть использованы многоцелевые подводные лодки.

На наш взгляд, важность изучения третьего источника угрозы обусловлена также еще одной причиной. Если бы даже первые две были реальными, в кризисной ситуации единственным способом превентивного уничтожения ПЛАРБ России, находящихся недалеко от своих баз, было бы использование многоцелевых ПЛ, которые могли бы скрытно осуществлять непрерывное слежение за ПЛАРБ, и после получения соответствующего приказа о нанесении превентивного удара, гарантированно уничтожить их до того как те успеют запустить БРПЛ.⁷ Если такая угроза существует реально, то она будет увеличиваться по мере уменьшения количества ПЛАРБ России, поскольку количество многоцелевых ПЛ США изменится в меньшей степени.⁸

Данная статья не отвечает на вопрос насколько уязвимы подводные лодки-ракетоносцы России для многоцелевых ПЛ противника. В настоящей работе мы ограничиваемся рассмотрением только задачи оценки расстояния на котором технически возможно обнаружить ПЛАРБ. Для полноты анализа необходимо также исследовать не только возможность развертывания стационарных систем обнаружения и прорыва в методах неакустического обнаружения подводных лодок из космоса, но также и возможность непрерывного скрытного слежения⁹ и уничтожения ПЛАРБ. Кроме того, не берется в расчет, несомненно, один из наиболее важных, субъективный фактор.

Результаты, полученные в данной работе носят оценочный характер. Поскольку дальность обнаружения ПЛ является одним из ключевых параметров при планировании стратегии и тактики противолодочных операций,¹⁰ конкретная информация о технических характеристиках ПЛАРБ, необходимая для того чтобы сделать вывод об их

уязвимости, отсутствует в открытой литературе. Однако, тем не менее, по уровню шумности ПЛАРБ, взятому в качестве параметра, возможно оценить дальность их обнаружения, что позволило бы провести оценки уязвимости этих ПЛАРБ. Произведенные в данной работе оценки, в частности, показывают, что, при современном уровне технологии снижения шумности ПЛАРБ и соответствующей их тактике патрулирования пассивные акустические средства не эффективны для обнаружения подводных лодок-ракетоносцев в таких районах развертывания БРПЛ как Баренцево море или Арктика.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛ¹¹

Существующие системы контроля за окружающей обстановкой в подводном положении на существующих ПЛ построены на акустическом принципе.¹² Эти системы (сонары) позволяют работать как в активном, так и в пассивном режиме. Работа в активном режиме выдает положение подводной лодки, что лишает ее такого важного тактического преимущества как скрытность, поэтому активные системы (гидролокаторы) используются лишь в крайнем случае (перед всплытием, для уточнения положения цели непосредственно перед торпедной атакой и т.д.). Далее мы будем рассматривать только работу сонара в пассивном режиме.

Движущаяся подводная лодка (ПЛ) является источником звука. Звук, излучаемый ПЛ, может быть зарегистрирован сонаром на значительном от нее удалении. Анализируя принятый сигнал, оператор сонара способен судить о природе регистрируемого звука: факте наличия ПЛ, ее положении, характере движения и, вообще говоря, при наличии априорной информации о характере шумов этой лодки, может ее идентифицировать.¹³ Далее мы будем рассматривать только задачу обнаружения ПЛ, т.е. когда оператор сонара определяет факт наличия ПЛ (а не, например, положения ПЛ по отношению к сонару, ее скорость и направление).

На дальность обнаружения ПЛ влияет большое количество факторов. С целью формализации этой задачи и получения количественных оценок дальности обнаружения обычно выделяют следующие характеристики¹⁴:

УИ - уровень шумности источника на расстоянии 1 метр по отношению к уровню эталонного источника,¹⁵

ПР - потери при распространении звука

от источника к приемнику, определяемые как отношение уровней источника на расстоянии 1 м и вблизи приемника;

УШ - уровень шума вблизи приемника относительно уровня эталонного источника на расстоянии 1 м;

УА - выигрыш в уровне сигнала за счет использования многоэлементного приемника по сравнению с одноэлементным;

ПД - порог детектирования, определяемый как отношение минимального уровня сигнала, который может быть обнаружен с заданной вероятностью, к уровню шума в полосе частот 1 Гц.

Эти величины измеряются в децибелах (дБ) и отсчитываются по логарифмической шкале.¹⁶ Расстояние, на котором ПЛ обнаружима в заданных условиях может быть оценено по величине ПР, определяемой из уравнения для пассивного сонара:¹⁷

$$ПР = УИ - УШ + УА - ПД$$

Далее мы оценим диапазон изменчивости каждого из этих факторов и попытаемся определить какой дальности обнаружения ПЛ они будут соответствовать в интересующих нас районах патрулирования ПЛАРБ, а именно, Северной Атлантике, Северной части Тихого океана (глубокое море), Баренцевом и Охотском морях (мелкое море) и Арктике.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОЦЕНОК ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ

Обнаружительные признаки подводных лодок. Причиной звука, излучаемого ПЛ, являются вибрации корпуса лодки, механических узлов двигателя (турбины, механизма передачи), кавитация, вызываемая вращением винтов, гидродинамический шум, возникающий при обтекании корпуса ПЛ.¹⁸ Частотный спектр для такой совокупности источников генерации звука представляет собой узкие линии, соответствующие основным частотам колебаний и их гармоникам, на непрерывном фоне. Появление этих линий в спектре регистрируемого сонаром сигнала, как правило, является основным демаскирующим фактором, так как, они наблюдаются даже при низкой скорости ПЛ,¹⁹ когда ее кавитационный шум мал. Указанная особенность спектра позволяет эффективно применять метод узкополосной фильтрации (см. ниже), идея которого состоит в том, что сравнение уровня сигнала с уровнем шума производится в узкой полосе частот, в которой сосредоточена энергия сигнала.

По видимому, есть много общего в ха-

рактере спектров шума надводных судов и подводных лодок. Для надводных судов²⁰ диапазон спектра, в котором наблюдаются отдельные линии, ограничен сверху частотой 1 кГц. Уровень интенсивности этих линий может превышать на 10-20 дБ фоновый непрерывный шум, для которого характерны максимум в диапазоне 50-100 Гц и дальнейшее спадание уровня обратно пропорционально квадрату частоты.²¹ Несомненно, при строительстве ПЛАРБ принимаются все меры для демпфирования собственных частот. Колебания более высоких частот легче "погасить".

Ширина линий, по-видимому, составляет не менее 0,1 - 1 Гц. Фактически, это зависит от характера движения ПЛАРБ. Чем дольше она движется с постоянной скоростью, тем уже линии. Поскольку "шумность" ПЛАРБ резко повышается при маневрировании,²² она придерживается тактики движения с постоянной скоростью. Следует также отметить, что шумность повышается по мере эксплуатации ПЛ в результате износа двигателя и разбаланса его механизмов.

Немногочисленные данные о шумности ПЛ, встречающиеся в открытой литературе,²³ свидетельствуют, что на низких частотах УИ ПЛ времен второй мировой войны составляет 130-150 дБ при скорости движения 4-10 узлов (см. рис. 1). Улучшению технологии уменьшения шумности ПЛ с тех пор уделялось значительное внимание. И, хотя, точные данные о современных ПЛАРБ недоступны для нас, будем в дальнейшем использовать модели спектра УИ²⁴, изображенные на рис. 1. Согласно этим моделям, УИ линий "шумных" ПЛ на частоте 30 Гц соответствует 140 дБ, "тихих" ПЛ - 120 дБ и "очень тихих" - 100 дБ. Соответственно, можно предположить, что интенсивность линий на частоте 300 Гц на 10 дБ меньше.

Потери при распространении звука от источника к приемнику. Потери в звуковом канале, которые характеризуют уменьшение амплитуды звуковой волны по мере распространения от источника к приемнику, определяются геометрией распространения, отражающими свойствами дна и поверхности, а также поглощением звука водой.²⁵ Влияние этих факторов различно для разных акваторий.

Рассмотрим далее случай, когда и источник, и приемник находятся на глубине до 500 м. Этот случай соответствует ситуации когда многоцелевая ПЛ "охотится" за ПЛАРБ.

Обычно на больших по сравнению с размерами ПЛ расстояниях последнюю можно считать точечным источником. Как

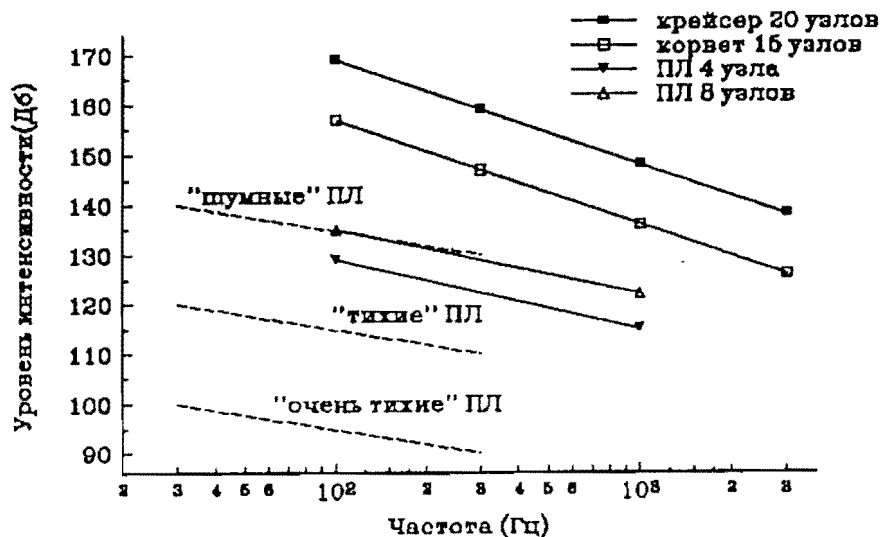


Рисунок 1

Уровень интенсивности подводных лодок и судов времен второй мировой войны. Данные взяты из R.J. Urick, Principles of Underwater Sound, MacGraw-Hill Co., 1983, pp. 346, 350. Пунктиром изображены модельные спектры УИ современных ПЛАРБ.

известно, при распространении сферической волны, излучаемой точечным источником, ее амплитуда уменьшается пропорционально квадрату расстояния от него. Это приводит к зависимости потерь от расстояния R согласно $ПР = 20 \cdot \log 10R$ (в дБ, R выражается в метрах). На малых расстояниях звук приходит от источника к приемнику практически по прямолинейной траектории и ПР определяются сферическим распространением, хотя могут возникать интерференционные эффекты из-за отражений от поверхности.

Как правило, в океане траектории лучей звука не прямолинейны. Скорость звука в воде зависит от ее температуры, солености и окружающего давления, которые в первом приближении однородны в горизонтальном направлении, но сильно меняются по глубине. Проходя сквозь слои океанской воды, различающиеся по своим гидрофизическим характеристикам, (а, следовательно, по скорости звука), лучи звука преломляются и поворачиваются к слоям с меньшей звуковой скоростью. По этой причине звук в океане распространяется вдоль так называемого звукового канала, "ядром" которого является слой с минимальной скоростью звука.

В открытом океане этот слой располагается обычно на глубине 1 - 4 км, поэтому соответствующий канал называется глубоким звуковым каналом. Как правило, в океане или море существует приповерхностный перемешанный слой с неизменной по вертикали температурой. Этот слой также порождает возникновение звукового канала, называемого поверхностным. Существенные звуковые каналы - одна из причин, по которой распространение звука становится цилиндрическим, а потери пропорциональными $10 \cdot \log 10R$. Цилиндрическое распространение может также существовать в мелководных водах если отражение лучей от поверхности и дна происходит с малыми потерями.

Расстояние, на котором происходит переход от сферического режима к цилиндрическому зависит от глубины акватории H и распределения скорости звука по глубине. Как правило, оно порядка H для глубоководных вод ($H > 1$ км) и порядка нескольких H для мелководных.

Геометрия распространения является

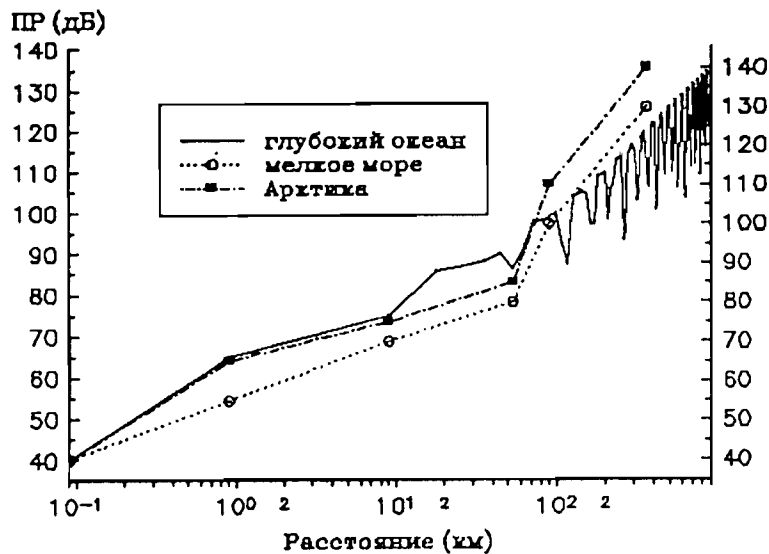


Рисунок 2

Потери звука при распространении на частоте 30 Гц в различных акваториях.

превалирующим фактором затухания звуковых волн на расстоянии менее 1 км. При всех типах распространения "плата" за первые 100 м составляет 40 дБ. Для глубоких вод потери на расстоянии 1 км порядка 60 дБ, для мелких вод они несколько меньше, потому что режим распространения становится цилиндрическим (см. рис. 2,3).

С увеличением расстояния ПР во многом зависят от наличия поверхностного канала. Если глубина верхнего перемешанного слоя в океане достаточно велика (зимой она существенно больше, чем летом) и поверхность океана спокойна, то поверхностный канал является хорошим проводником звука. В отсутствие этого канала существенными могут также оказаться лучи претерпевшие отражение от дна, потери вдоль которых определяются сферическим распространением и потерями при отражении от дна. Этот тип распространения преобладает при отсутствии верхнего перемешанного слоя.

В результате непрямолинейного распространения лучей звука в глубоком океане наблюдаются также такие эффекты, как зоны конвергенции²⁶ (зоны фокусировки акустических лучей) и затенения, имеющие

важные приложения для обнаружения ПЛ. В частности, в глубоком океане, выигрыш в величине ПР в зонах конвергенции может достигать от 5 до 20 дБ. Именно благодаря наличию зон конвергенции в глубоком океане дальность обнаружения может достигать 1000 км и более.

Как правило, ПР в мелком море на расстояниях более нескольких десятков километров выше, чем в глубоком океане из-за многократных отражений от поверхности и дна.

На расстояниях более нескольких десятков километров потери при распространении в Арктике обычно значительно выше, чем в поверхностном канале в глубоком или в мелком море со свободной ото льда поверхностью по двум причинам. Во первых, по мере распространения звук чаще отражается от поверхности, поскольку положительный градиент скорости звука в вертикальном направлении в Арктике значительно выше. Во вторых, характер неровностей нижней ледовой поверхности таков, что потери энергии звука при отражении высоки²⁷ даже для сравнительно низких частот 100 - 1000 Гц.

Как правило, потери на распростране-

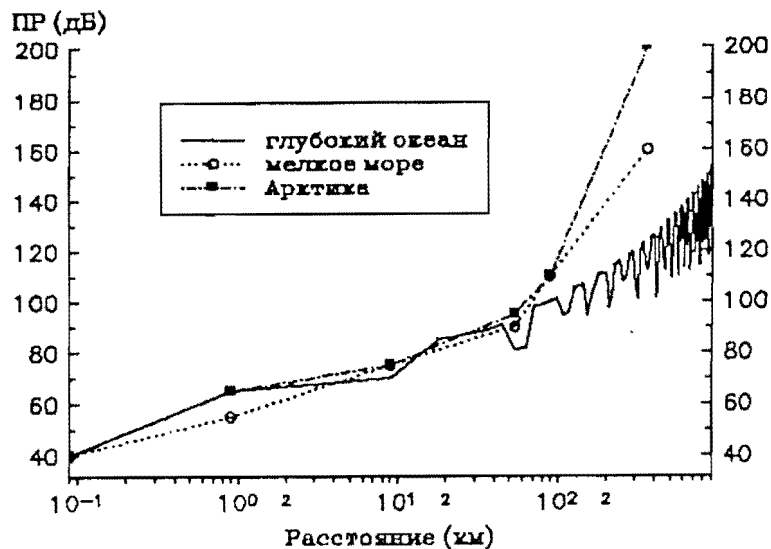


Рисунок 3

Потери звука при распространении на частоте 300 Гц в различных акваториях.

не растут с увеличением частоты в глубоком океане и в Арктике. Причины этому - более высокое поглощение звука и увеличение потерь при отражениях от поверхности и дна с ростом частоты. Исключение составляют поверхностный канал и мелкое море, в которых, в зависимости от обстоятельств, оптимальная частота распространения может находиться в области 50 - 1000 Гц.²⁸

Уровень шума. Задача обнаружения ПЛ по сути представляет собой задачу выделения сигнала ПЛ на фоне помех, как внешних (обусловленных природными факторами), так и внутренних (собственный шум гидрофонов, неидеальности тракта усиления и обработки сигнала). Мы будем рассматривать принципиальные ограничения, налагаемые только внешними факторами, которые нельзя устранить, а именно, вызванными шумом ветрового волнения и удаленных судов. Дальность обнаружения ПЛ может ограничиваться и другими факторами, как, например, шумом обтекания гидрофонов, если преследующая ПЛ движется с большой скоростью.²⁹

При малых скоростях ветра, уровень

шума в глубоком океане превышает 55 дБ на частоте 30 Гц (см. рис.4), и не ниже 50 дБ на частоте 300 Гц.³⁰ В действительности, на этих частотах нижний порог фонового шума в океане определяется удаленным судостроением. При слабом и умеренном ветре, уровень шума удаленных судов может значительно превышать уровень ветрового шума.

Уровень фонового шума в мелком море обычно выше чем в глубоком океане из-за близости дна и многочисленных переотражений от дна и поверхности и может превышать его на 10-15 дБ³¹ при одинаковой силе ветра. Шум, создаваемый удаленными судами, не вносит существенного вклада на расстояниях более 100 км, в отличие от глубокого океана, где она может превышать тысячи километров, поэтому вклад корабельного шума является существенным только вблизи акваторий с интенсивным судостроением.

Данные о спектре шумов для различных скоростей ветра в мелком море³² позволяют сделать вывод, что при скоростях ветра 1 - 20 м/с УШ меняется от 70 до 90 дБ на частоте 30 Гц и от 60 до 80 дБ - на

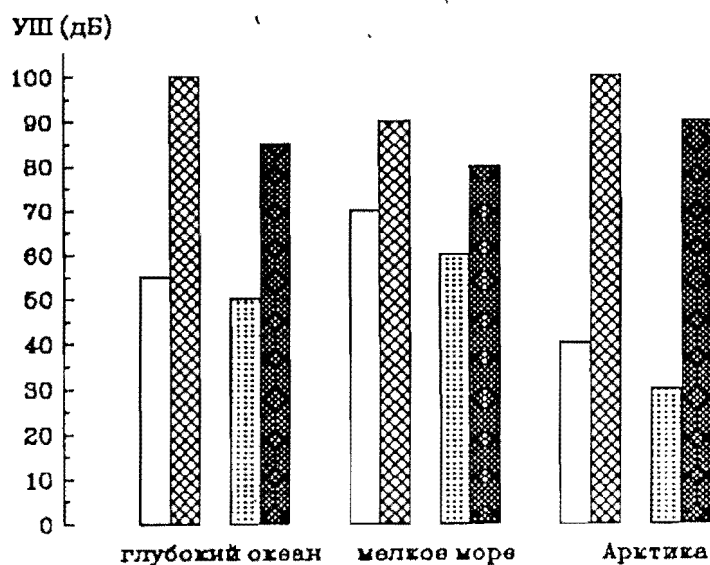


Рисунок 4

Диапазон изменчивости уровня шума в различных акваториях на частотах 30 и 300 Гц.

частоте 300 Гц.

Внешний шум в Арктике носит иное происхождение в отличие от вод, свободных от ледовой поверхности. Шум в Арктике является результатом действия возмущающих внешних факторов на ледовый покров, а именно, ветра и изменений температуры воздуха, которые ведут к возникновению механических напряжений в структуре льда.³³ Уровень шума в Арктике очень изменчив.³⁴ В течение тихих периодов в Центральной Арктике УШ может падать до 40 дБ на частоте 30 Гц и до 30 дБ на частотах около 300 Гц. С другой стороны максимальный УШ может достигать до 100-110 дБ в зонах границы льда, в периоды ледовой активности.³⁵ Как правило, УШ в в зонах границы льда значительно выше, чем в Центральной Арктике. В частности, по результатам измерений в течение года в море Бофорта³⁶ на станции находящейся на периферии Центральной Арктики, УШ не был ниже 60 - 65 дБ и 35 дБ на частотах 32 и 1000 Гц соответственно.

Характеристики систем обнаружения подводных лодок. Акустические приемники на ПЛ представляют собой фиксированные

(закрепленные на корпусе) и буксируемые датчики. Фиксированные антенны приемников (гидрофонов) располагаются, как правило, в носовой части корпуса лодки. Как правило, фиксированные и буксируемая антенны ПЛ представляют единую антенную сеть гидроакустического комплекса (ГАК) ПЛ. В частности, ГАК ВQQ-5 многоцелевой АПЛ "Los Angeles", включает носовую сферическую антенну ВQS-13 (1241 гидрофона типа TR-155E/VQ, расположенных на сфере диаметром приблизительно 4 м), конформную антенну (104 гидрофона типа DT-276, размещенных в виде пояса, огибающего носовую часть ПЛ и тянущегося почти до рубки) и буксируемую антенну ТВ-16/VQ или ТВ-2337. Антенна ТВ-16, состоящая из 50 гидрофонов, распределенных по длине 75 м, буксируется на кабеле длиной 830 м. Более совершенная и имеющая малые габариты антенна ТВ-23 включает 98 гидрофонов и имеет общую длину (вместе с буксируемым кабелем, возможно 830 м) 1220 м.³⁸

Эффект усиления за счет применения многоэлементной антенны приемников можно объяснить следующим образом. Предположим, что источник находится достаточно

далеко, так что фронт проходящей от него звуковой волны можно считать плоским. Поскольку нам известно положение приемников антенны и частота этой звуковой волны, то мы можем синфазно сложить сигналы на каждом из приемников, так что после обработки квадратичным детектором уровень результирующего сигнала будет в N^2 раз выше чем уровень сигнала с одного приемника (здесь N - количество приемников в антенне). Уровень шума будет расти пропорционально N , если считать что фоновые сигналы нескоррелированы на разных приемниках. Фактически, последнее эквивалентно ситуации когда имеется один приемник, а время интегрирования увеличивается в N раз. Так что отношение сигнал/шум будет расти пропорционально количеству приемников в антенне и соответственно для УА справедливо

$$УА = 10 \cdot \log_{10} N$$

На рис. 5 представлены частотные зависимости максимальных УА антенн ГАК ВОО-5 ПЛ "Los Angeles". Существуют два фундаментальных фактора, ограничивающих максимальное УА.

Первый связан с тем, что шумы, регистрируемые двумя приемниками, складываются также синфазно, если расстояние между ними меньше радиуса корреляции шума. Последний не может быть бесконечно уменьшен и в лучшем случае равен половине длины волны.³⁹ Таким образом, если размер антенны сравним с длиной волны регистрируемого сигнала (как в случае фиксированного сонара подводной лодки при регистрации низких частот⁴⁰), то, как правило, это и является основным фактором, ограничивающим усиление антенны. Как видно из рис. 5, на частоте 30 Гц основным ограничением является размер антенн, так что в дальнейшем анализе мы будем предполагать, что в этом диапазоне УА составляет не более 12 дБ. Легко увидеть, что фиксированный сонар малоэффективен на частотах менее 200 Гц, т.е. на частотах наиболее сильных линий в спектре УИ подводных лодок. По этой причине применяются буксируемые антенны гидрофонов ("гибкие" сонары).

Второе ограничение обусловлено тем, что по мере увеличения расстояния между приемниками, регистрируемые ими сигналы от объекта перестают быть скоррелированными. Длина когерентности (расстояние между приемниками, на котором коэффициент корреляции регистрируемых сигналов равен 0,641) зависит от характера распространения звука и расстояния от источника

до приемника. Как правило, она больше при однолучевом⁴² приеме (как, например, в зонах конвергенции в глубоком океане) чем при многолучевом.⁴³

На частоте 300 Гц, ограничение УА связано с максимальной корреляционной длиной сигнала и уровень в УА=20 дБ (см. рис. 5) достижим только при самых благоприятных ситуациях (например, в зонах конвергенции).

Критерий выделения сигнала на фоне помех. При узкополосной обработке данных сонара сигнал перед детектированием выделяется фильтром с узкой полосой пропускания, соответствующим по частоте интересующей линии в спектре УИ ПЛ. На экране дисплея оператор наблюдает сигнал, пропорциональный уровню мощности регистрируемого приемником звука в полосе частот фильтра.⁴⁴ Уровень фонового шума в этой полосе частот носит вероятностный характер и его плотность вероятности может быть представлена гауссовским распределением. Для уменьшения дисперсии флуктуаций уровня мощности производится интегрирование сигнала в течение определенного промежутка времени. При появлении сигнала от цели уровень регистрируемого приемником сигнала меняется, но его характер остается вероятностным. В типичной ситуации, функции распределения плотности вероятности фона и сигнал + фон перекрываются, и оператору ГАК приходится устанавливать порог, позволяющий принимать решение о наличии или отсутствии сигнала от цели.

Порог детектирования определяется величиной индекса обнаружения, ширины узкополосного фильтра приемника и временем интегрирования.⁴⁵ Индекс обнаружения в свою очередь, является функцией вероятностей обнаружения и ложных тревог, которые устанавливает оператор ГАК. С целью улучшения качества обнаружения всегда стремятся к тому, чтобы максимизировать первую и минимизировать вторую, причем и первая, и вторая тенденция ведут к увеличению индекса обнаружения. В "бюджете" сонара это приводит к увеличению платы за ПД пропорционально $5 \cdot \log_{10} d$. В табл. 1 приведены характерные значения индекса обнаружения для серии заданных вероятностей обнаружения и ложных тревог.

Ширина полосы частот фильтра выбирается таким образом, чтобы она соответствовала ширине линии в регистрируемом спектре УИ ПЛ, так как дальнейшее уменьшение W ведет к потере энергии сигнала. Минимальная ширина фильтра может также ограничиваться уширением линий в спектре

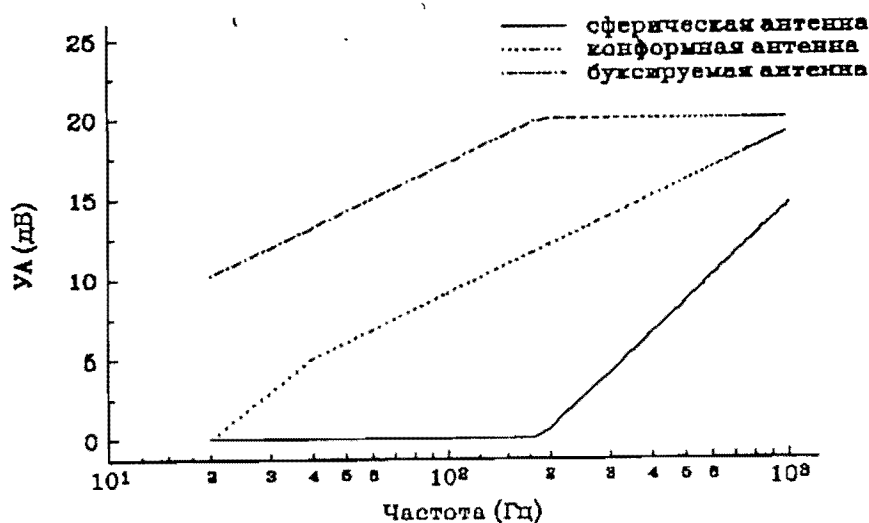


Рисунок 5

Максимальное УА гидроакустического комплекса ВQQ-5 ПЛА класса "Los Angeles" на низких частотах.

УИ, связанным с доплеровским смещением при отражениях от поверхности и флуктуациями характеристик звукового канала. Согласно данным экспериментальных измерений в мелком море,⁴⁶ уширение линий на расстояниях несколько десятков километров может достигать 0,1 - 1 Гц. В глубоком океане и в Арктике, по видимому, уширение линий несколько ниже, но вряд ли менее 0,1 Гц.

Время интегрирования ограничивается рядом факторов. Во-первых, взаимное расположение источника и приемника не остается неизменным, что ведет к изменению

условий регистрации сигнала. Во-вторых, океан не является стационарной средой: характеристики уровня шума и звукового канала можно считать неизменными только в течение ограниченного промежутка времени. В-третьих, увеличение времени интегрирования ведет к увеличению массива входной информации ЭВМ системы обработки сонара и требует повышения ее быстродействия (по меньшей мере пропорциональное квадрату увеличения времени интегрирования). В-четвертых, даже если вышеречисленные факторы не являются лимитирующими, т.е. применяются адаптив-

p(D)		0,6	0,8	0,9
p(FA)	10 ⁻⁴	18	21	26
	10 ⁻⁵	28	32	37

Таблица 1

Оценки индекса детектирования

ные методы обработки сигнала и ресурс ЭВМ достаточно высок, время интегрирования ограничивается временем принятия решения, которое является наиболее существенным фактором особенно при малой дальности обнаружения.

Существенным замечанием также является то, что одновременное увеличение времени интегрирования и усиления антенны являются двумя взаимоисключающими требованиями. Максимального усиления антенны можно достичь, по-видимому, при относительно небольших временах интегрирования 1 - 10 с.

Оценки ПД в табл. 2 произведены для времени интегрирования 100 и 1000 с. Предполагалось, что индекс детектирования $d = 20$.

При оценках дальности обнаружения ПЛ мы будем предполагать, что минимальный ПД, который может быть достигнут равен -12 дБ. Это, по видимому, весьма оптимистичная оценка, реально такой порог детектирования достигим только в редких случаях. Легко увидеть, что дальнейшее уменьшение ПД еще на 5 дБ требует повышения времени интегрирования в 10 раз (почти 3 часа!).

Дополнительные потери. Приведенные выше оценки относятся к ситуации, когда в известных природных условиях выбирается оптимальная стратегия обнаружения подводной лодки. В реальной ситуации условиях для применения такой стратегии может не хватать априорных знаний о среде, что приводит к дополнительным потерям в "бюджете сонара". Ряд требований к характеристикам сонара носит взаимоисключающий характер и приходится искать компромисс для их оптимизации и минимизации потерь. Далее мы будем полагать, что величина потерь составляет 5 дБ. Это весьма оптимистичный прогноз, на практике потери могут быть значительно выше.⁴⁷

ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

Оценки дальности обнаружения ПЛ в

условиях действия различных природных факторов представлены на рис. 6-9 в виде номограмм. Шкала УИ изображена в левой части рисунков, а справа столбиками отложены величины потерь в соответствии с уравнением пассивного сонара. В рассмотрение включены также дополнительные потери - плата за незнание среды и характеристик обнаруживаемой лодки а priori. Таким образом, в зависимости от соотношения влияющих факторов, заданному ПР будут соответствовать максимальные ПЛ, при которых ПЛ обнаружимы. Слева на шкале ПР отложена соответствующая потерям на распространение максимальная дальность обнаружения (ДО). Проанализируем представленные рисунки более подробно.

Глубокий океан. Как правило, условия обнаружения в океане тем лучше, чем ниже частота звука. Исключение составляет лишь случай когда и источник, и приемник находятся в верхнем неглубоком перемешанном слое, где ПР на более низких частотах могут увеличиваться из-за эффекта утечки энергии из узкого звукового канала.

В лучшей ситуации, низком уровне шума 55 дБ (на частоте 30 Гц), большом УА 12 дБ, низком ПД (-12 дБ, достигаемом при времени интегрирования 1000 с) и дополнительных потерях, "очень тихие" ПЛ (УИ = 100 дБ) может быть обнаружена на расстоянии не более километра (см. рис. 6). Однако, как отмечалось в п. 3.5., одновременно достичь такое высокое УА при больших временах интегрирования как 1000 с практически невозможно. Так что, более реалистичная величина для разности УА и ПД составляет 20 - 25 дБ, что соответствует дальности обнаружения порядка нескольких сотен метров. Если мы примем во внимание, что при таком малом уровне ветрового шума превалирует шум удаленного судоходства, очевиден вывод, что "очень тихие" ПЛ фактически не обнаружимы.

Шансы обнаружить "тихие" ПЛ (УИ = 120 дБ на частоте 30 Гц) в океане значительно выше. В благоприятной ситуации (низкий уровень шума, низкий ПД, наличие верхнего перемешанного слоя), дальность

W (Гц)		1	0,1
T (сек)	100	-1,5	-6,5
	1000	-6,5	-11,5

Таблица 2

Оценки порога детектирования

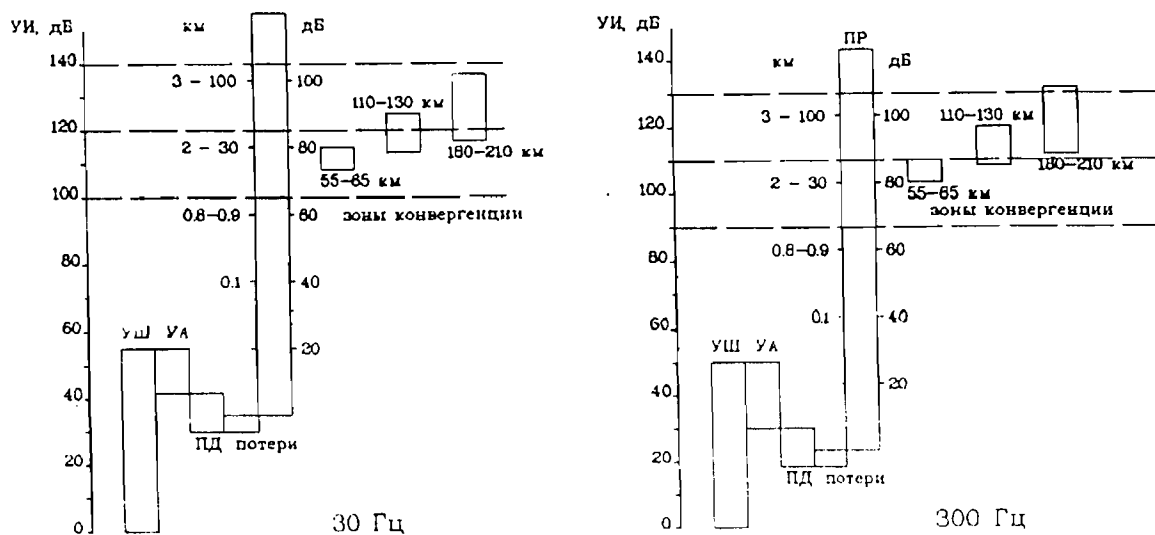


Рисунок 6

Оценки дальности обнаружения ПЛ в глубоком океане

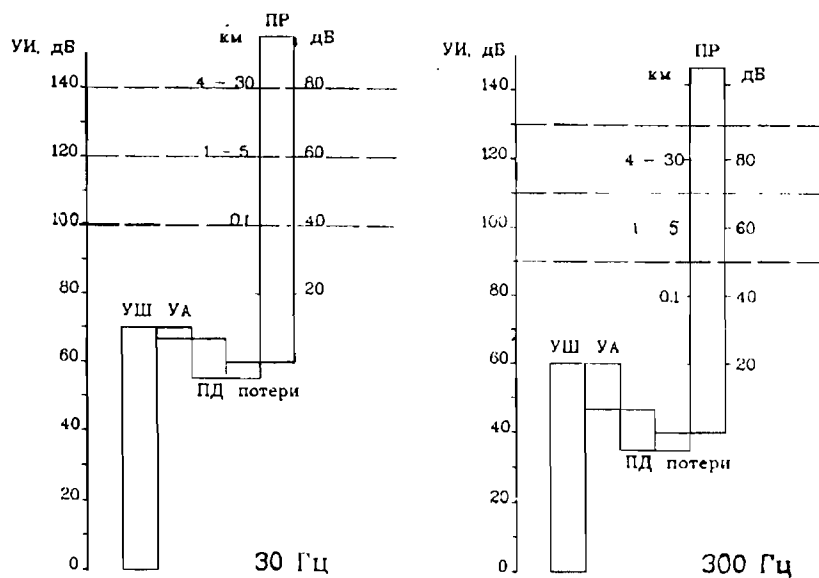


Рисунок 7

Оценки дальности обнаружения ПЛ в мелком море (фиксированная антенна)

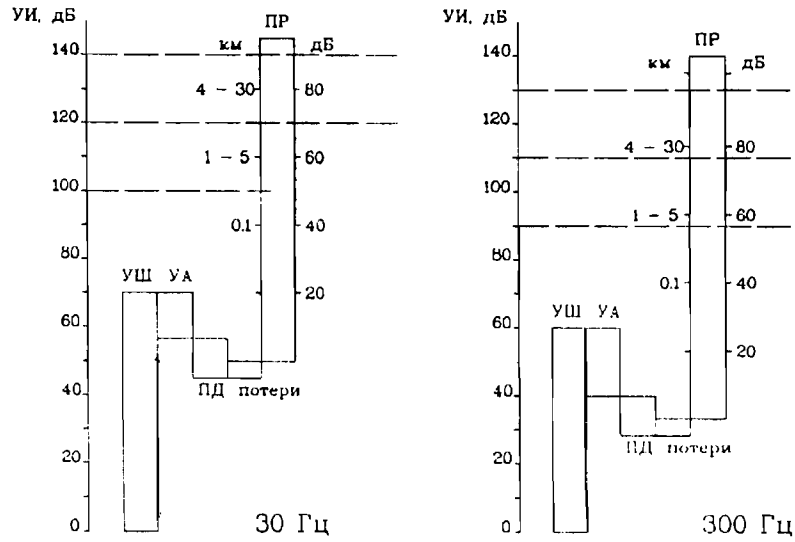


Рисунок 8

Оценки дальности обнаружения ПЛ в мелком море (буксируемая антенна)

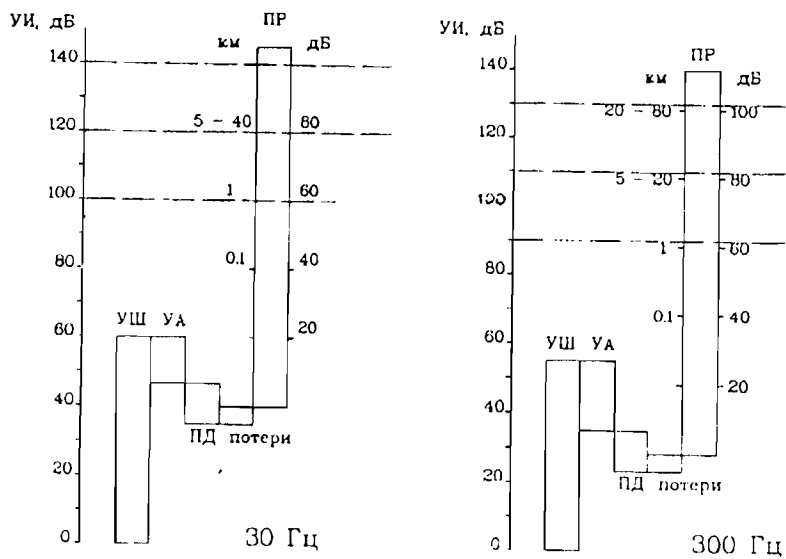


Рисунок 9

Оценки дальности обнаружения ПЛ в Арктике

обнаружения может достигать 30 - 40 км. Учитывая ограничения на одновременное высокое УА и время интегрирования, получим, что более реалистичная величина составляет 10 - 20 км, если и источник, и приемник находятся в верхнем перемешанном слое в океане. Для источника и приемника, находящихся под перемешанным слоем, дальность обнаружения падает до 1 - 3 км.

На номограмме в правой части рис. 6 можно оценить условия обнаружения в зонах конвергенции.⁴⁸ Как можно увидеть, "тихие" ПЛ могут быть обнаружены и в первых нескольких зонах конвергенции. Тем не менее при реалистичных оценках, "тихие" ПЛ, по-видимому, можно обнаружить далее первой зоны конвергенции (55 - 65 км) только при весьма благоприятном стечении обстоятельств.

"Шумные" ПЛ могут быть легко обнаружены в "глубоком" океане на больших расстояниях. В идеальной ситуации дальность обнаружения "шумной" ПЛ может достигать тысяч километров благодаря наличию глубокого звукового канала и зон конвергенции. При более реалистичных условиях, возможно достичь дальности обнаружения до нескольких сотен километров.

Мелкое море. Использование буксируемой антенны, по-видимому, крайне затруднено в мелком море, поскольку ее длина вместе с кабелем, соединяющим с ПЛ, значительно больше глубины. В такой ситуации, вероятно, буксируемая антенна будет ограничивать оперативно-тактические характеристики ПЛ. Кроме того, буксируемые антенны являются очень дорогостоящим оборудованием, а риск ее повреждения в мелком море сравнительно велик. Тем не менее, рассмотрим условия обнаружения подводной лодки для двух ситуаций: фиксированного сонара и буксируемой антенны гидрофонов.

В мелком море оптимальная частота для обнаружения ПЛ обычно выше чем в глубоком океане из-за больших ПР, более высокого УШ и меньшего (УА-ПД) на низких частотах.

В лучшем случае: при штилевой ситуации (60 дБ на 300 Гц), максимальном усилении фиксированного сонара (13 дБ на 300 Гц), времени интегрирования порядка 15 мин и минимальных потерях 5 дБ для дальности обнаружения "очень тихой" ПЛ не превышает 400-500 м (см. рис. 7), даже если не принимать во внимание то что невозможно добиться одновременного максимального УА и минимального ПД. Можно утверждать, что "очень тихие" подводные

лодки не обнаружимы фиксированным сонаром в мелких водах ни при каких условиях.

Самый оптимистичный прогноз для "тихий" ПЛ : дальность обнаружения до 10 км. Даже в самых лучших условиях очень сложно обеспечить ПД = -12 дБ взятого для этих оценок. Наиболее реалистичные времена интегрирования в мелком море вряд ли превышают 10 с, с соответствующим увеличением ПД до уровня -2 дБ, так что вероятнее всего, даже при самых благоприятных погодных условиях фиксированный сонар способен слышать "тихую" ПЛ на расстоянии не более 1 - 3 км.

"Шумные" подводные лодки при наилучших условиях могут быть зарегистрированы на расстоянии несколько десятков километров. При неблагоприятных погодных условиях (скорость ветра более 10 м/с) ДО уменьшается до нескольких километров.

Буксируемая антенна значительно улучшает условия обнаружения на частотах менее 200 - 300 Гц, поскольку позволяет почти на 10 дБ увеличить максимально достижимое УА. В самых благоприятных условиях дальность обнаружения "очень тихих" лодок больше, чем для фиксированной антенны (см. рис. 8, но вряд ли она превышает 1 км, так как УА порядка 20 дБ в мелком море можно достичь только на расстояниях порядка 10-20 км из-за ограничений длины когерентности сигнала.⁴⁹

"Тихие" ПЛ можно обнаружить в лучшем случае на расстоянии до 30 км. При более реалистичном соотношении усиления антенны и порога детектирования (УА-ПД = 20 - 25 дБ на частоте 300 Гц) дальность обнаружения не превышает 5-10 км.⁵⁰ Ухудшение погодных условий может свести на нет возможность обнаружения и "тихий" ПЛ. Так, при скорости ветра порядка 10 м/с, дальность обнаружения составляет порядка 300 м.

Дальность обнаружения "шумных" лодок варьирует в широком диапазоне. В лучших условиях она не превышает 50 - 100 км (более осторожные оценки ДО в оптимальных условиях - несколько десятков км). В худших - при сильном ветре, но большом УА, низком ПД и малых потерях - может уменьшаться до нескольких сотен метров.

Таким образом, использование буксируемой антенны качественно меняет ситуацию в мелком море, позволяя регистрировать "шумные" подводные лодки практически в любых погодных условиях, кроме очень сильного ветра (уровень шума 90 дБ). При самых благоприятных погодных условиях становится возможным обнаруживать также "тихие" ПЛ.

Арктика. По сравнению с водами без ледовой поверхности, в Арктике ДО значительно сильнее уменьшается с увеличением частоты из-за значительных потерь энергии при отражениях от нижней поверхности льда.

Для вод Центральной Арктики дальность обнаружения может достигать 40 км даже для "очень тихих" ПЛ в течение коротких периодов затишья (УШ = 40 дБ на частоте 30 Гц), когда уровень внешнего шума мал. При более высоком уровне шума УШ = 60 дБ, более типичном для Арктики в тихие периоды, более реалистичной разнице (УА-ПД) = 20 - 25 дБ (учитывая уменьшение длины корреляции сигнала из-за многолучевого приема), получим, что дальность обнаружения порядка 1 км (см. рис. 9). Из-за относительно высокого уровня фонового шума "очень тихие" ПЛ необнаружимы в зоне границы льда.

В благоприятных условиях (низкий УШ, высокое УА и низкий ПД) "тихая" ПЛ может быть обнаружена на расстоянии до 40 км. В зоне границы льда это расстояние снижается до 1 километра.

"Шумные" ПЛ обнаружить существенно легче. В благоприятной ситуации дальность обнаружения на низких частотах при УШ = 60 дБ может достигать 100 км. Даже в зоне границы льда ДО составляет несколько километров, если УШ не очень высок в этой относительно шумной части Арктики. В течение периодов ледовой активности, ДО вряд ли превышает 0,5 км в зонах границы льда.

Вероятно, в течение тихих периодов в Арктике ПЛ могут быть обнаружены на больших расстояниях, но скрытное их преследование будет весьма сложной задачей из-за сильного увеличения УШ в течение коротких промежутков времени и соответствующего уменьшения ДО. Можно также заключить, что зоны границы льда, где уровень фонового шума высок, являются хорошим укрытием для ПЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценки дальности обнаружения ПЛ позволяют сделать выводы, которые могли бы иметь важные практические приложения при планировании развертывания подводных российских стратегических сил.

1. При заданной шумности ПЛ, дальность, на которой ее можно обнаружить в мелком море и в зонах границы льда Арктики значительно меньше, чем в глубоком океане. Этот вывод еще раз свидетельствует о том, что введение в строй современных

российских ПЛАРБ, позволяющих нанести ракетно-ядерный удар возмездия из акваторий, близких к портам их базирования, значительно повысило устойчивость подводных стратегических сил по отношению к возможным превентивным мерам противника.

2. Оценки дальности обнаружения для ПЛ с различным УИ наглядно демонстрируют важность снижения УИ ПЛАРБ. В частности, как можно увидеть из рис. 2,3 и 6-9, уменьшение УИ в 10 раз может сократить дальность обнаружения ПЛ почти на порядок. В этой связи, учитывая будущее возрастание роли морской составляющей ядерной триады России в свете соглашений СНВ-2, важно подчеркнуть также необходимость поддержки УИ на низком уровне по мере "старения" ПЛАРБ и замены подводных ракетноносцев, отслуживших срок, более новыми с лучшими шумовыми характеристиками.

3. Подводная лодка необнаружима в мелком море и в зонах границы льда Арктики, если уровень ее интенсивности не превышает УИ для модели "очень тихой" ПЛ. В этих районах дальность обнаружения "тихих" ПЛ составляет не более нескольких километров даже при благоприятных условиях. Приведенные оценки сделаны в предположениях оптимальных условий обнаружения при учете только фундаментальных физических ограничений. Если брать во внимание субъективные факторы и неопределенность в априорных знаниях о среде в конкретных условиях, дальность обнаружения может быть еще меньше. Таким образом, УИ "тихой" ПЛ мог бы служить некой границей, ниже которой ПЛАРБ можно было бы считать неуязвимой в мелких морях и зонах границы льда в Арктике.

Реальные характеристики УИ современных ПЛАРБ вне всякого сомнения являются секретными данными (и не известны автору). Тем не менее существуют свидетельства того, что американские ПЛАРБ уже достигли уровня "очень тихих" ПЛ и, вероятно, то же самое справедливо или будет справедливым в близком будущем и для российских ПЛАРБ. Если это так, то данная работа являлась бы сильным аргументом в пользу того, что развертывание будущего значительно меньшего ядерного арсенала России преимущественно в море укрепило бы его защищенность от возможных превентивных мер противника.

4. Тенденция снижения УИ подводных лодок затрагивает также еще один очень важный аспект безопасности плавания подводных судов. Как следует из нашего анализа, при действиях в мелких морях ПЛ не обладают техническими средствами для

уверенного обнаружения современных ПЛ потенциального противника на безопасном для упреждения возможных столкновений расстоянии.⁵¹ Такие инциденты с вовлечением атомных ПЛ с ядерным оружием на борту могли бы создать опасную политическую ситуацию в мире с непредсказуемыми последствиями. Кроме того, они могли бы привести к крупным экологическим катастрофам. Возможным решением для предотвращения подобных инцидентов была бы выработка международных соглашений по ограничению деятельности иностранных ПЛ вблизи территориальных вод государств, и в особенности, в районах патрулирования ПЛАРБ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен профессору Теодору Постолу и доктору Джорджу Льюису, сотрудникам Центра по изучению проблем контроля над вооружениями в Массачусетском технологическом институте (МТИ), за неоценимую помощь и плодотворное обсуждение в течение всего времени работы над настоящей статьей. Автор хотел бы поблагодарить профессора Айра Дайер (факультет прикладной океанографии в МТИ) за полезные советы и замечания, а также Павла Леонардовича Подвига, сотрудника Центра по изучению проблем контроля над вооружениями при МФТИ, за помощь в технических вопросах.

ПРИЛОЖЕНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ СОСТАВ СТРАТЕГИЧЕСКИХ СИЛ США И СНГ (К-ВО ЯДЕРНЫХ ЗАРЯДОВ)⁵²

Сведения о структуре и составе стратегических сил США и СНГ (в том числе о структуре подводных стратегических сил) приведены в таблицах П.1 - П.4.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Tom Stefanick, "Strategic Antisubmarine Warfare and Naval Strategy," Lexington Books, 1987, p. 72.
2. "Quiet Submarines a Serious Problem," House Armed Services Committee, News Release, March 21, 1989.
3. Советские ПЛАРБ конца 60-ых - начала 70-ых годов были не только шумными, но также обладали ограниченным радиусом поражения цели, что требовало несения патрулирования в открытом океане, где была хорошо развита инфраструктура противолодочных сил США и их союзников. По-видимому, в эти годы было не только легко обнаруживать и скрытно сопровождать наши ПЛАРБ, но даже идентифицировать их. Ситуация изменилась к концу 70-ых - началу 80-ых с введением в строй современных "Delta III", "Typhoon" и "Delta IV", которые способны поражать цели практически на всей территории США, находясь недалеко от портов базирования вблизи Мурманска или Петропавловска-Камчатского. По мере сокращения старых ПЛАРБ типа "Yankee" с конца 80-ых годов наши подводные ракетноносцы несут боевое дежурство только во внутренних морях России.
4. Виктор Литовкин "Три дня на "Тайфуне," Известия, No 52-54, 29 февраля - 2 марта, 1992.
5. Американские подводные лодки несмотря на потепление международного климата продолжают вести интенсивную деятельность вблизи портов базирования ПЛАРБ СНГ, о чем свидетельствуют столкновение подводных лодок вблизи Мурманска в феврале 1992 г. (см., например, Николай Бурбыга, Виктор Литовкин "Американцы не только помогают нам, но и шпионят за нами, Известия, 21 февраля, 1992, с. 2 и Eugene Miasnikov, "Submarine collision off Murmansk: Look from Afar," Breakthroughs, Defense and Arms Control studies Program, MIT, Winter 1992/93, p.19-24.) и последовавшее за ним еще одно вторжение иностранной подводной лодки месяцем позже (А. Пилипчук "Противолодочники были готовы применить оружие," Красная звезда, 28 марта, 1992, с. 2). Предположительно, одна из возможных целей этих миссий, развертывание подводных датчиков для сбора данных об обнаружительных характеристиках ПЛ (Desmond Ball "Nuclear War at Sea," International Security, Winter 1985-86, Vol. 10, No. 3, p. 3-31.)
6. Развертывание такой системы в ближайшем будущем вряд ли возможно (Tom Stefanick, 1987, op. cit, p.17, а также Tom Stefanick, "The Nonacoustic Detection of Submarines," Scientific American, March 1988, Vol. 258, Num. 3, p. 41 - 47). Тем не менее, по свидетельству прессы, подводные лодки могут наблюдаться на спутниковых снимках (Craig Covault, "Soviet Radar Satellite Shows Potential to Detect Submarines," Aviation Week & Space Technology, October 8, 1990).
7. Если даже положение подводной лодки

		Конец 1991 г.	После СНВ-1	После СНВ-2
МБР наземного базирования	Minuteman III MX	500 x 3	500 x 1,8	500 x 1
		50 x 10 2000	50 x 10 1400	0 500
БРПЛ	Trident I Trident II	384 x 8	192 x 8	0
		96 x 4 3456	240 x 8 ⁵³ 3456	432 x 4 1728
Бомбардировщики	B52 - ALCM B - 1,2	125 x 16	80 x 20	НИ ⁵⁴
		84 x 16 3344	84 x 16 2944	НИ 750 - 1250
Итого		8800	7800	3000 - 3500

Таблица П.1

Стратегические силы США

		Конец 1991 г.	После СНВ-1	После СНВ-2
МБР наземного базирования	SS-18	308 x 10	154 x 10	0
	SS-19	210 x 6	0	105
	SS-24	75 x 10 ⁵⁵	75 x 10	0
	SS-25	315 x 1 5405	315 2605	НИ НИ
БРПЛ	SS-N-6,8	376 x 1	0	0
	SS-N-18	224 x 3	224 x 3	176 x 3
	SS-N-20	120 x 10	120 x 8	120 x 6
	SS-N-23	112 x 4 2696	112 x 4 2080	112 x 4 1696
Бомбардировщики	Bear-N-ALCM	84 x 12,8	84 x 12,8	НИ
	Blackjack-ALCM	16 x 12 1266	16 x 12 1266	НИ 750 - 1250
Итого		9367	5951	3000 - 3500

Таблица П.2

Стратегические силы СНГ

известно, ее сложно уничтожить, поскольку оно постоянно меняется. Для нанесения превентивного удара по ПЛАРБ СНГ, находящихся во внутренних морях или подо льдом Арктики, скрытное использование оружия ближнего радиуса действия на надводных судах или с воздуха практически нереализуемо. То же самое справедливо для оружия дальнего радиуса действия, причем при применении послед-

него возникнет проблема обеспечения необходимой точности поражения. (Tom Stefanick, 1987, op. cit.)

8. Предположительно, к 2000 г. количество ПЛАРБ СНГ уменьшится с 54 до 24 (см. Приложение 1), в то время как количество многоцелевых ПЛ США упадет с 84 до 60 (Barton Gellman "The 'Silent Service' breaks the ice," The Washington Post, April 19, 1992, p. A4)
9. Для того чтобы скрытно следить за

Класс	Ввод в эксплуатацию	Носители/заряды	Дальность (миль)	Количество 1992	Количество 2003
Lafayette	1963 - 67	16 Trident I 10	4350	12	0
Ohio	1981 -	24 Trident I 8	4350	8	0
Ohio ⁵⁶	1981 -	24 Trident II 8	6000	4	18
Общее количество				24	18

Таблица П.3

Подводные стратегические силы США

Класс	Ввод в эксплуатацию	Носители/заряды	Дальность (миль)	Количество 1992	Количество 2003
Yankee	1967 - 74	16 SSN-6/1	1300 (1600) ⁵⁷	6	0
Delta I, II	1972 - 77	16(12) SSN-8 1	4240 (4950)	22	0
Delta III	1975 - 82	16 SSN-18/3	3530 (4350)	14	11 ⁵⁸
Typhoon ⁵⁹	1983 -	20 SSN-20 10	4300	6	6
Delta IV	1985 -	16 SSN-23/4	5000	7	7
Общее количество				55	24

Таблица П.4

Подводные стратегические силы СНГ

ПЛАРБ, многоцелевая ПЛ должна быть способна не только обнаруживать ее, но и определять положение этой ПЛАРБ, курс и скорость с высокой точностью в течение всего периода слежения. Более того, следящая ПЛ должна действовать скрытно и находиться на достаточном удалении, на котором она необнаружима для ПЛАРБ. Таким образом, задача о возможности скрытного слежения отличается от задачи обнаружения и более сложна для решения.

10. См., например, Mark Sakitt "Submarine Warfare in the Arctic: Option or Illu-

sion?", Center for International Security and Arms Control, Stanford University, 1988. В этой работе, в частности, рассматривается задача как влияет дальность обнаружения на время, необходимое для того чтобы найти подводные лодки противника.

11. Далее, в целях краткости, а также поскольку выводы справедливы по отношению и к остальным типам подводных лодок мы будем использовать одинаковую аббревиатуру ПЛ как для ПЛАРБ, так и для многоцелевых ПЛ.
12. Мы не рассматриваем перископ, кото-

- рый используется для контроля надводной обстановки и бесполезен, если целью является другая погруженная ПЛ. Кроме того, перископ легко обнаружим радиолокационными средствами.
13. В частности, это возможно, если а priori известно положение линий в спектре УИ ПЛ.
 14. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill Book Company, 1983, p.22.
 15. Как правило, за уровень эталонного источника принимается уровень, создаваемый звуковой волной, амплитуда которой равна 1 мкПа.
 16. В частности, если уровень источника в 100 раз больше уровня эталонного источника то $УИ = 10 \log_{10}(100) = 20$.
 17. R. J. Urick, 1983, op. cit., p. 21.
 18. R. J. Urick, 1983 op. cit., p. 332.
 19. Как правило, скорость ПЛАРБ при ее патрулировании ограничивается (в частности, при скоростях 5 - 8 узлов УИ американских и советских ПЛ относительно низок - Т. Stefanick, 1987, op. cit., p. 9), поскольку, по мере увеличения скорости движения ПЛ, УИ сильно возрастает за счет кавитационного и гидродинамического шума.
 20. P. C. Wille "Ambient Noise: Characteristics of the Noise Field," Adaptive Methods in Underwater Acoustics, Ed. by H. G. Urban, D. Reidel Publishing Company, pp. 13-36, 1985.
 21. P. C. Wille, 1985, op.cit.
 22. Кроме использования упомянутого метода узкополосной фильтрации сигнала, оператор сонара может также слышать непродолжительные, но значительно более интенсивные шумы, излучаемые при маневрировании ПЛ (скрежет рулей, а также шумы, связанные с характером обтекания).
 23. R. J. Urick, 1983 op. cit., p. 350.
 24. Необходимо подчеркнуть разницу в оценке УИ, представленных в настоящей работе и Стефаником (Т. Stefanick, 1987 op. cit., p. 274). Основной источник "шумности" у Стефаника - кавитация и его данные по УИ представляют собой интегральные величины по всему диапазону спектра. Кавитационный шум ПЛАРБ незначителен при скоростях патрулирования по сравнению с шумом двигателя ПЛ. В частности, серьезной проблемой при строительстве ПЛ является подавление шума головного турбо-зубчатого агрегата (ГТЗА), одного из наиболее шумящих узлов двигателя. Согласно некоторым данным, повышение допусков к размерам зубцов шестеренок с 0,1 до 0,01 мм позволяет на 3 - 4 порядка сократить УИ ПЛ.
 25. R. J. Urick, 1983, op. cit., p. 100.
 26. Расстояние между зонами конвергенции в глубоком океане составляет 55 - 65 км. Ширина первой зоны, расположенной на таком удалении от источника, достигает нескольких километров, вторая зона в два раза шире чем первая и т.д. На расстоянии порядка нескольких сотен километров зоны перестают быть различимыми.
 27. I. Dyer "The Song of sea Ice and Other Arctic Ocean Melodies", Arctic Policy and Technology, Ed. by I. Dyer and C. Chrystostomidis, Hemisphere, New York, pp.11-37, 1984
 28. T. Acal, "Sea Floor Effects on Shallow Water Acoustic Propagation," Bottom interacting ocean acoustics, Ed. by W.A. Kuperman and F.B. Jensen, Plenum, New York, 1980, pp. 557-575, см. также F.B. Jensen, W.A. Kuperman, "Optimum frequency of propagation in shallow water environments," JASA, v.73, No.3, pp. 813-819, 1983, и J. Allen "Transmission loss variability in shallow water," Bottom interacting ocean acoustics, Ed. by W.A. Kuperman and F.B. Jensen, Plenum, New York, pp. 485-492, 1980
 29. Этот факт часто используется для ухода ПЛ от преследования. Если преследующая ПЛ обнаруживает себя, то вторая ПЛ прибегает к тактике увеличения скорости, вынуждая преследующую также ускориться, чтобы не оторваться. На высокой скорости шумы обтекания гидрофонов начинают превалировать над внешними, так что преследуемая ПЛ теряется из вида.
 30. R. J. Urick, Ambient Noise in the Sea, Peninsula Publishing, 1986.
 31. P. C. Wille, 1985, op. cit.
 32. R. J. Urick, 1986, op.cit., P. C. Wille, 1985, op. cit.
 33. I. Dyer, 1984, op. cit.
 34. R. J. Urick, 1986, op.cit.
 35. Уровень фонового шума в Арктике наиболее высок на периферийной ее части, в так называемых зонах границы льда. Это явление существует благодаря процессам таяния льда или льдообразования. Зоны границы льда располагаются вблизи границ ледовой поверхности или айсбергов, а их ширина обычно составляет несколько десятков километров.
 36. J. K. Lewis, W. W. Denner "Arctic Ambient Noise in the Beaufort Sea: Seasonal, Space and Time Scales", JASA, v. 82,

- No.3, pp. 988-997, 1987.
37. N. Friedman, *World Naval Weapons Systems 1991/92*, Naval Institute Press, 1991, p. 611.
 38. Готовится также к введению в строй более новая ТВ-12Х, которая в 12 раз длиннее ТВ-16. Полномасштабные испытания по оценке эффективности этой антенны предполагаются в 1993 г. N. Friedman, 1991, op. cit. 633.
 39. R. J. Urick, 1986, op.cit.
 40. К примеру, длины звуковых волн на частотах 30 и 300 Гц соответственно равны 15 и 1.5 м.
 41. В. Sholz, "Horizontal spatial coherence measurements with explosives and CW - sources in shallow water," *Aspects of signal processing*, Ed. by G.Tacconi, Dordrecht - Holland / Boston - U.S.A., p.1, pp. 95-108, 1976.
 42. Благодаря рефракции и отражениям от поверхности и дна может существовать несколько путей (лучей) звука от источника к приемнику, что типично для вод Арктики и мелкого моря.
 43. R. J. Urick, 1983, op. cit., p.231, см. также R. J. Urick, "Sound Propagation in the Sea", Peninsula Publishing, 1982
 44. В действительности система обработки сигнала гораздо сложнее. Оператор сонара может видеть на экране дисплея одновременно сигналы на нескольких частотах и для нескольких объектов, но идея, излагаемая здесь является основополагающим принципом узкополосной обработки сигнала, применяемой в сонарах.
 45. В частности, если предположить для простоты рассуждений, что статистические характеристики акустического шума не меняются со временем, а уровень сигнала от ПЛ постоянен, то для порога детектирования справедлива формула

$$ПД = 5 \log_{10} (d \cdot W / T)$$
 где d - индекс обнаружения, W - ширина полосы фильтра, T - время интегрирования (R.J. Urick, 1983, op. cit. p.385).
 46. E. Sevaldsen "Effects of medium fluctuations on underwater acoustic transmissions in a shallow water area," *Bottom interacting ocean acoustics*, Ed. by W.A. Kuperman and F.B. Jensen, Plenum, New York, pp.643-657, 1980
 47. См., например R.J. Urick, 1983, op. cit., p.389.
 48. В данном случае предполагается, что выигрыш в ПР в зонах конвергенции составляет 15 дБ.
 49. В. Sholz ", 1976, op.cit.
 50. Как несложно увидеть, существует большая разница по сравнению с ДО в глубоком океане. Несмотря на то, что ДО в "ближней зоне обнаружения" может быть и больше для мелкого моря чем для океана, фактически, в мелком море нет преимуществ, которые дают зоны конвергенции.
 51. В этой связи хочется еще раз вспомнить о столкновении американской ПЛА типа "Los Angeles" с российской типа "Сьерра", происшедшем в феврале 1992 г. в территориальных водах России (Eugene Miasnikov, 1992, op.cit.). Обе подводные лодки "не слышали" друг друга до столкновения. К счастью, инцидент обошелся без тяжелых последствий.
 52. Данные по составу и количеству ядерных зарядов на конец 1991 г. и после сокращений по СНВ-1 взяты из статьи H. Feiveson, F. von Hippel "Dismantling the Doomsday Machine," *Technology Review*, May/June 1992, pp. 61-69, а данные по времени ввода ПЛ в эксплуатацию и дальности БРПЛ из Tom Stefanick, "Strategic Antisubmarine Warfare and Naval Strategy," Lexington Books, 1987, p.156-157.
 53. Вероятнее всего, в соответствии с ограничениями договора по СНВ-2, ни одна ПЛАРБ с "Trident II" не будет иметь полного оснащения ("Nuclear Notebook. U.S. Strategic Nuclear Forces. End of 1991," *The Bulletin of the Atomic Scientists*, "January/February 1992, p. 49), и каждая ракета будет нести по 4 заряда.
 54. НИ - количество не известно
 55. Согласно другим источникам, (R.S. Norris, W.M. Arkin "Nuclear Notebook. U.S. (Soviet) Strategic Nuclear Forces. End of 1991," *The Bulletin of the Atomic Scientists*, " March 1992, p. 49), к концу 1991 г. было развернуто 92 пусковых установок SS-24 (из которых 36 - мобильных и 56 - шахтных).
 56. Восемь ПЛАРБ класса "Ohio" сейчас оснащены системами "Trident I". Вероятно "Trident I" будет заменяться на "Trident II" после 1996 г., когда программа строительства "Ohio" закончится. Системой "Trident II" была оснащена девятая по счету (в 1989 г.) и последующие ПЛАРБ класса "Ohio".
 57. Числа в скобках соответствуют модификациям ракет с отличным к-вом и весом боезарядов, а следовательно, отличающимся по дальности.
 58. Вероятнее всего количество ПЛАРБ

класса "Delta III" станет еще меньше, поскольку к этому времени многие ПЛАРБ выработают 20-25 летний ресурс и будут выведены из строя.

59. Строительство ПЛАРБ класса "Typhoon" и "Delta IV" закончено к 1990 г. (А. Веденеев, "Договор СНВ-2: Морской аспект", Российские Вести, 1993, No. 15, с. 4)