

## ЯДЕРНЫЕ КРЫЛАТЫЕ РАКЕТЫ БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛЬНОСТИ

*Джордж Н. Льюис и Теодор А. Постол*

Крылатые ракеты большой дальности с ядерными зарядами обладают высокой точностью и способны достичь большую часть целей в пределах Соединенных Штатов и Содружества Независимых Государств (СНГ) при запуске за пределами их границ. Ни США, ни СНГ не имеют систем контроля воздушного пространства, способных обеспечить надежное предупреждение о крылатых ракетах. Поэтому возможно, что небольшая по масштабам атака крылатых ракет пройдет совершенно незамеченной до того момента, когда ядерное оружие достигнет своих целей. Подобная атака может полностью разрушить стратегические бомбардировщики другой стороны еще на аэродромах и нанести сильный ущерб ее системе стратегического командования и управления, возможно, до такой степени, что будет подвергнута опасности сама способность запуска стратегических ракетных сил по тревоге. Такая возможность делает ядерные крылатые ракеты большой дальности потенциально одним из наиболее дестабилизирующих средств среди всех типов ядерного оружия.

Авторы работают в Массачусеттском технологическом институте (Кембридж, Массачусеттс, 02139 США) по программе изучения обороны и контроля над вооружениями. Т.А.Постол участвует также в программе "Наука, техника и общество".

### ВВЕДЕНИЕ

Крылатые ракеты большой дальности с ядерными зарядами широко воспринимаются как стабилизирующее добавление к ядерным арсеналам США и СНГ (в дальнейшем для краткости мы будем опускать определение "большой дальности с ядерными зарядами"; за исключением специально оговоренных случаев понятие "крылатая ракета" будет означать "крылатая ракета большой дальности с ядерным зарядом"). Это представление возникает главным образом благодаря их относительно небольшой скорости, что рассматривается как препятствие к использованию в первом ядерном ударе. Однако при столь простой характеристике теряются более тревожащие аспекты этого типа вооружений. Крылатые ракеты уже оказались наиболее точными из всех стратегических ядерных ракет. Более важно то, что ни в США, ни в СНГ нет систем наблюдения за воздушным пространством, способных надежно детектировать крылатые ракеты. Поэтому появляется возможность использования крылатых ракет при ядерном нападении, которое остается незамеченным. С этой точки зрения крылатые ракеты можно отнести к наиболее дестабилизирующим средствам среди всего ядерного вооружения.

Несмотря на окончание холодной войны, как США, так и СНГ продолжают сохра-

нять большие стратегические ядерные арсеналы, где выживаемость ключевых элементов в конечном счете зависит от тактического предупреждения. Обеспечивающие такое предупреждение системы создаются в течение многих лет. Любые попытки наскоро создать способности для предупреждения могут привести к опасным ложным тревогам в условиях, если отношения между США и СНГ ухудшились или если наступил кризис. Пока обе страны будут продолжать опираться на стратегические ядерные силы, зависящие для выживаемости от предупреждения, им не следует пренебрегать состоянием своего потенциала предупреждения.

В этой статье рассматривается угроза стабильности, вызываемая крылатыми ракетами. Она начинается с обсуждения технических характеристик крылатых ракет, имеющих отношение к данному вопросу. Затем мы оцениваем потенциал американской системы наблюдения за воздушным пространством и приходим к заключению, что она не способна обеспечить надежное предупреждение о маломасштабной атаке крылатых ракет (из-за отсутствия данных о системах СНГ технический анализ в данной статье будет сосредоточен на системах США). С учетом этих недостатков систем предупреждения обсуждаются способы использования крылатых ракет во внезапном ядерном нападении с малой вероятностью предупре-

ждения и оценивается возникающая угроза стабильности. В последующей статье<sup>1</sup> будут рассмотрены возможные ответные меры на угрозу стабильности, вызываемую крылатыми ракетами.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ

До сих пор крылатые ракеты большой дальности развернуты только в США и СНГ<sup>2</sup> (информация приведена в табл. 1). Все такие крылатые ракеты воздушного базирования (КРВБ) и морского базирования (КРМБ) имеют ядерные заряды и предназначены для нападения на наземные цели за исключением американских ракет "Томагавк", для которых существуют варианты нападения с обычными боеголовками как на корабли, так и на наземные цели, а также ряда американских ракет ALCM-B, которые были переделаны в обычные ракеты для атаки на наземные цели<sup>3</sup>. Кроме того, за исключением еще не развернутых советских сверхзвуковых ракет AS-X-19 и SS-NX-24 с большой высотой полета все рассматриваемые ракеты предназначены для дозвукового полета на малых высотах. Американские КРМБ были развернуты как на корабельных палубах, так и на атакующих подлодках, пока что ракеты СНГ SS-N-21 были развернуты толь-

ко на атакующих подлодках.<sup>4</sup> Инициатива президента Буша по ядерному оружию 27 сентября 1991 г. и реакция тогдашнего президента Горбачева привели к полному удалению ядерных КРМБ на прибрежные склады, хотя это оружие "окажется доступным при необходимости в будущем кризисе".<sup>5</sup>

Характеристиками крылатых ракет, которые должны определять их способность атаковать цели, находящиеся в глубине территории США или СНГ, служат дальность полета, наведение и эффективная отражающая поверхность. Мы обсудим каждую из них по порядку.

#### ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЕТА

В табл. 1 приведены официальные американские данные о дальностях крылатых ракет США и СНГ: 2500 км для американских "Томагавков" и ALCM-B, 3000 км для ракет СНГ AS-15 и SS-N-21.<sup>6</sup> Однако, по крайней мере для ракет США, эта величина является "операционной" дальностью, учитывающей такие факторы, как маневрирование вокруг защищаемых районов, отклонения от курса в целях пролета над заранее предусмотренной территорией для обновления информации в системах инерциального наведения, вертикальное маневрирование

Таблица 1  
Ядерные крылатые ракеты большой дальности<sup>a</sup>

Ракеты	Тип	Дальность, км	Ввод в строй	Количество <sup>б</sup>
США				
ALCM-B	КРВБ	2500	1981	1715
Томагавк	КРМБ	2500	1984	337
АСМ	КРВБ	3800 - 4500 <sup>в</sup>	1991	-
СНГ				
AS-15	КРВБ	3000	1984	сотни
SS-N-21	КРМБ	3000	1988	100 ?
AS-X-19	КРВБ	3000 ?	?	-
SS-NX-24	КРМБ	3000 ?	?	-

<sup>a</sup> Договор о запрещении ракет средней и малой дальности привел к ликвидации трех типов советских крылатых ракет наземного базирования, которые либо находились на стадии разработки, либо уже были развернуты (они аналогичны "Томагавку", SS-N-21 и SS-NX-24, соответственно).

<sup>б</sup> Все ядерные КРМБ большой дальности сняты с кораблей и помещены на склады в результате инициатив Буша и Горбачева по ядерным вооружениям в сентябре-октябре 1991 г.

<sup>в</sup> Пробег ракет АСМ взят из статьи N.K. Longstreth and R.A. Scribner, "Verification of Limits on Air-launched Cruise Missiles", in Frank von Hippel and Roald Z. Sagdeev, eds., *Reversing the Arms Race: How To Achieve and Verify Deep Reductions in the Nuclear Arsenals* (New York: Gordon and Breach, 1990), pp.181-235.

для ухода от препятствий, требования к запасам топлива, пролет на более высоких по сравнению с оптимальной скоростях через защищаемые районы и полет на малых высотах.<sup>7</sup> Таким образом неясно, до какой степени приведенные значения дальности соответствуют либо относительному, либо абсолютному потенциалу дальности поражения для указанных в таблице ракет.

Мы построили простую модель полетных характеристик крылатой ракеты "Томагавк" и использовали ее для оценок дальности при разных условиях полета. Некоторые результаты приведены в табл. 2 (расчеты и предположения, заложенные в основу этих расчетов, описаны в статье "Дальность крылатых ракет типа "Томагавк" [Приложение А], которая напечатана в выпуске 2 этого тома). В табл. 2 указаны "прямолинейные дальности" (расстояние по дуге большого круга на поверхности Земли без отклонений от курса или изменений высоты полета) при трех высотах полета и трех постоянных значениях скорости, а также для оптимизированной скорости, которая изменяется по мере расходования топлива ракеты.<sup>8</sup>

Разумным предположением для определения операционной дальности служит то, что весь полет будет проходить на малой высоте. Это предполагает, что оценка в 3400 км, приведенная в табл. 2, является соответствующей прямолинейной дальностью. Для получения заявленной дальности эту величину надо уменьшить примерно на 26 про-

центов.<sup>9</sup>

Основной урок, вытекающий из табл. 2, заключается в том, что дальность крылатой ракеты сильно зависит от профиля полета. Так, операционная дальность 2500 км для ядерного "Томагавка" не означает, что он не может поразить цели на расстояниях 3000 или 3500 км; наоборот, если дальность в 3000 км для крылатых ракет СНГ окажется фактически предельной дальностью, отсюда совсем не обязательно должно следовать, что они смогут поразить цели на расстоянии 2500 км при всех операционных условиях.

Для иллюстрации важности таких значений дальности на рис. 1 и 2 показано покрытие территорий США и СНГ, которое можно обеспечить запусками КРМБ с операционной дальностью 3000 км. Как показывает рис. 1, практически все Соединенные Штаты могут быть перекрыты крылатыми ракетами, запущенными с двух или трех подлодок. Часто приводится аргумент, что США более уязвимы к КРМБ, нежели СНГ, потому что гораздо большая часть американских ценностей находится вблизи побережья Тихого океана и Атлантики. Однако, хотя это и может оказаться правильным для крылатых ракет малой дальности, рис. 2 показывает, что большая часть СНГ также уязвима с учетом дальности современных американских крылатых ракет. На самом же деле (и это было справедливо еще до распада СССР) СНГ может оказаться значительно более уязвимым с учетом превосходства

Таблица 2

Оценки максимальной прямолинейной дальности (км) для некоторых значений скорости и постоянной высоты полета ядерной крылатой ракеты "Томагавк".<sup>a</sup>

Скорость (число Маха)	Высота, км		
	Уровень моря	3,05	6,10
0,55	3330	3890	4000
0,65	3020	3860	4490
0,75	2650	3580	4550
оптимальная <sup>b</sup>	3400	3920	4600

<sup>a</sup> Приведенные в таблице изменения дальности в зависимости от высоты полета и скорости можно понять из рис. 3 Приложения А, где показана оптимальная скорость ракеты как функция высоты и веса ракетного топлива. Например, видно, что оптимальная скорость при полете на уровне моря изменяется между  $M=0.45$  и  $M=0.61$ . Поэтому если ракета должна лететь с постоянной скоростью  $M=0.55$ , то это приведет к большей дальности, нежели либо при  $M=0.65$ , либо при  $M=0.75$ . Однако при высоте полета 6.1 км  $M=0.75$  даст наибольшую дальность, поскольку для большей части полета ракеты оптимальная скорость будет превышать  $M=0.7$ .

<sup>b</sup> Дальности в этой строчке рассчитаны с использованием оптимизированной скорости, которая меняется в зависимости от веса ракеты.



Рисунок 1  
Покрывание территории США КРМБ с дальностью полета 3000 км.

США в разворачивании КРМБ большой дальности и американского преимущества в технологиях сооружения подводок и противолодочного оружия. Такая же ситуация сохраняется и для КРВБ, где бомбардировщикам СНГ придется лететь над территорией союзников США (или вблизи нее), чтобы достичь США.

Кажется возможным существенное увеличение дальности крылатых ракет. Без увеличения объема ракеты, что часто бывает ограничено такими факторами, как размер пусковой установки, представляется осуществимым увеличить на 50% дальность крылатых ракет типа "Томагавк", а в предельном случае может оказаться возможным увеличить ее вдвое. Такое возрастание дальности позволит производить запуск крылатых ракет на гораздо больших расстояниях от территории другой стороны.<sup>10</sup> Это особенно существенно, поскольку в настоя-

щее время наибольшие надежды обнаружения атаки крылатых ракет могут оказаться связанными с обнаружением платформы для запуска или обнаружением реального запуска ракет.

#### НАВЕДЕНИЕ

Американские ракеты "Томагавк" и ALCM-B используют в полете инерциальную систему наведения при участии системы TERCOM<sup>11</sup> (отслеживание рельефа местности). Это позволяет им добиться фактически независимой от дальности точности 60-80 м или даже лучше, что сравнимо с точностью других типов ядерного оружия или превышает ее.<sup>12</sup> Вместе с боеголовкой W80, мощность которой меняется в диапазоне 5-150 килотонн, эта точность достаточна для разрушения даже сильно укрепленных целей.<sup>13</sup>



цели. Однако возможное глушение GPS-сигналов и неопределенность выживания спутников в стратегических конфликтах служат аргументами против того, чтобы полагаться на систему GPS для ядерных крылатых ракет. Поэтому похоже, что стратегические крылатые ракеты будут полагаться на обзорные или сравнительные системы наведения, хотя можно будет пользоваться новыми типами датчиков для улучшения точности, уменьшения ложных сигналов и ослабления уязвимости к помехам.<sup>18</sup> Более того, если придется сохранять малую высоту полета, то еще окажется необходимым летать по предварительно исследованным маршрутам или же устанавливать смотрящую вперед систему облета препятствий (что может сделать ракету более уязвимой к обнаружению).

#### ЭФФЕКТИВНАЯ ОТРАЖАЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Большая часть трудностей при обнаружении крылатых ракет связана с присущей им малой эффективной отражающей поверхностью (ЭОП). Согласно обычным представлениям ЭОП американских ALCM-B или "Томагавк" составляет около 0.1 м.<sup>19</sup> Для сравнения укажем, что ЭОП небольшого реактивного самолета грубо говоря раз в 10-20 больше.<sup>20</sup> Похоже, что это значение 0.1 м будет грубой оценкой для ориентировки вблизи максимума диаграммы направленности или для частот выше 1 ГГц (на которых работают многие РЛС системы контроля над воздушным пространством или ПВО); однако будучи общим ориентиром, оно может ввести в заблуждение при неправильном применении. В частности, надо быть осторожным при использовании этой величины для более низких частот. На рис. 3 приведена простая оценка ЭОП для крылатой ракеты типа "Томагавк" в диапазоне частот 5-30 МГц, который используется загоризонтными РЛС (ЗГРЛС). Как можно увидеть, ЭОП изменяется более, чем на три порядка величины в достаточно узкой полосе частот. Быстрое падение ЭОП (ниже 0.01 м) в низкочастотной области возникает в результате входа ракеты в режим релеевского рассеяния, когда длина волны РЛС (60 м при 5 МГц) гораздо больше длины ракеты. Как мы увидим, это сильно влияет на эффективность ЗГРЛС к обнаружению крылатых ракет.

ЭОП крылатых ракет типа "Томагавк" или AS-15 уже ниже, чем у большинства пилотируемых самолетов за исключением, возможно, лишь самолетов типа "Стелт". Похоже, что в будущем ЭОП крылатых ракет

уменьшится и это станет важной характеристикой конструкции. Это уже произошло с крылатой ракетой АСМ. Такие крылатые ракеты типа "Стелт" станут еще более крепким орешком для систем контроля воздушного пространства.

#### СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О КРЫЛАТЫХ РАКЕТАХ

Соединенные Штаты уже давно развернули системы, предназначенные обеспечить предупреждение о нападении бомбардировщиков и баллистических ракет. Эти системы, в частности системы предупреждения о баллистических ракетах, доказали свою надежность и эффективность. Однако крылатые ракеты выдвигают фундаментально иную и во много более трудную проблему предупреждения.

Крылатые ракеты невелики по размерам, обладают малой ЭОП и не являются заметными источниками тепла или звука, то-есть по своей природе они невидимки. Похоже, что у будущих крылатых ракет еще более понизится уровень характерных особенностей для обнаружения. При полете на малой высоте и маневрировании крылатые ракеты могут использовать особенности местности для укрытия, ограничения дальности обнаружения наземных датчиков и использования "щелей" в системах предупреждения или обороны. В большинстве случаев придется обнаруживать ракеты на фоне помех от поверхности Земли. Более того, у крылатых ракет нет характерных особенностей, которые позволяли бы легко отличать их от многих гражданских самолетов, которые каждодневно влетают в США и пролетают над американской территорией. Даже если крылатая ракета обнаружена, нельзя точно определить ее цель, а также природу боеголовки (обычная или ядерная). Запускаемые с подлодок КРМБы в настоящее время создают наибольшие проблемы перед системами обнаружения и предупреждения, поскольку их можно скрытно запустить из неизвестной заранее точки и они могут приближаться к цели практически по любому направлению.

В середине 80-х годов США вместе с Канадой - своим партнером по системе континентальной ПВО, обладали малыми возможностями обнаружения крылатых ракет, проходящих через северо-американское воздушное пространство. Основными системами воздушной разведки в то время были остатки когда-то обширной системы направленных на север наземных РЛС и совместной системы контроля воздушного пространства.

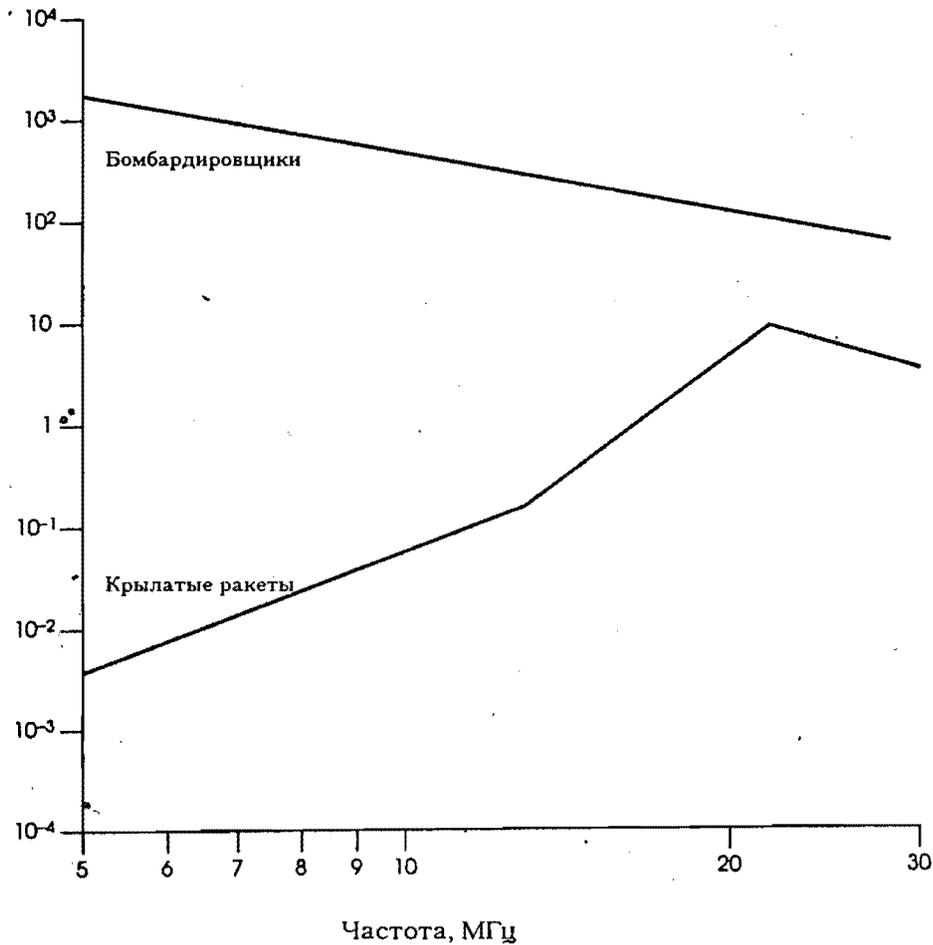


Рисунок 3

Эффективная отражающая поверхность (ЭОП, в м<sup>2</sup>), используемая при оценке эффективности ЗГР системы ОТН-В.

ЭОП крылатой ракеты вычислен по рис.24.4 статьи J.M.Headrick "HF Over-the-Horizon Radar", in Merrill I. Skolnik, ed., Radar Handbook, 2nd edition (New York: McGraw-Hill, 1990), pp. 24.1 - 24.43, где приведено значение ЭОП для удлиненного проводящего стержня длиной 11 м и шириной 1 м. Используются неопубликованные расчеты Салли Райд, которая моделировала КРМБ в виде вытянутого сфероида согласно методике, намеченной в главах 4 и 5 книги G.T. Ruck, D.E. Barrick, W.D. Stuart, and C.K. Kirchbaum, Radar Cross Section Handbook, Volume 1 (New York: Plenum Press, 1970). При вычислении ЭОП крылатой ракеты предполагается, что РЛС смотрит на крылатую ракету сверху под углом 30 над горизонтом (реальный угол будет обычно меньше этой величины, что слегка уменьшит ЭОП).

График для бомбардировщика взят у Fenster и соответствует реактивному самолету с четырьмя двигателями. Произведено усреднение по переднему квадранту и по всем поляризациям. Смотрите W. Fenster, "The Application, Design, and Performance of Over-the-Horizon Radars", IEE International Conference Radar-77 (London: Institution of Electrical Engineers, 1977), pp.36-40.

нства, куда входили наземные РЛС вдоль всего периметра США. Последняя система находилась под объединенным руководством ВВС и Федерального авиационного управления. Обе системы имели много "щелей" на малых высотах.

В 80-х годах США и Канада начали развертывать новую систему контроля воздушного пространства. Ее основой должна была стать система ЗГРЛС с обратным рассеянием (т.н. ОТН-В), состоящая из 12 секций и стоящая 2.6 миллиардов долларов. Предполагаемое перекрытие этой системой показано на рис.4. ЗГРЛС используют отражение радиоволн от ионосферы и тем самым обходят ограничения, связанные с кривизной земной поверхности. Это позволяет им обна-

руживать цели на расстояниях примерно до 3300 км. Но работоспособность ЗГРЛС зависит весьма критично от состояния ионосферы, которое изменяется с временем года, различно днем и ночью и определяется уровнем солнечной активности. Более того, поскольку ЗГРЛС не может смотреть в направлении на магнитные полюсы из-за возмущений, вызываемых полярными сияниями, сооружается новая линия наземных РЛС для перекрытия северной щели в общей диаграмме ОТН-В. Эта система, которая заменяет старую цепочку дальнего раннего предупреждения, известна как Северная система предупреждения (ССП) - ее планируемое покрытие на больших высотах также показано на рис.4 (а покрытие на малых высотах



Рисунок 4

Радиолокационное покрытие планируемой в США системы ОТН-В с 12 секторами. Сектора, показанные штрихами, запланированы, но еще не сооружены. Кружками отмечено покрытие на большой высоте, которое обеспечивают входящие в ССП 15 РЛС FPS-117 большой дальности. Показано также покрытие на большой высоте, которое дают РЛС FPS-117, входящие в состав аляскинской РЛС-системы SEEK IGLOO.

кратко обсуждается ниже).<sup>21</sup>

Полная система ОТН-В вместе с ССП обеспечат полное перекрытие воздушных подходов к Северной Америке против целей, имеющих размеры бомбардировщика. Однако сейчас кажется маловероятным, чтобы система ОТН-В когда-нибудь была бы сооружена. Завершено создание только шести секторов на Западном и Восточном побережьях; сооружение других шести секторов приостановлено и непохоже, чтобы оно возобновилось.<sup>22</sup> Все это оставляет большие щели в полном покрытии системой ОТН-В не только в южном направлении, но и на близких расстояниях от Восточного и Западного побережья. Более того, в результате ослабления угрозы со стороны СНГ и сокращения расходов США на оборону, а также в связи с проблемами системы ОТН-В по обнаружению крылатых ракет (что обсуждается ниже) деятельность уже завершенных участков на Западном и Восточном побережьях либо прекратилась, либо они использовались в течение неполного времени.<sup>23</sup>

Однако даже если бы американская система ОТН-В была завершена как намечалось, она не обеспечила бы надежную способность выдачи предупреждения о маломасштабном нападении крылатых ракет. Система ОТН-В с самого начала предназначалась для обнаружения советских бомбардировщиков и против таких целей она была бы эффективной. В связи с неожиданно быстро выросшей угрозой советских крылатых ракет ВВС США провели в 1988 г. испытания с использованием модифицированных самолетов "Файрби", управляемых по радио, для моделирования крылатых ракет. Поначалу получили сообщения, указывающие на некоторую способность системы ОТН-В обнаруживать крылатые ракеты, и возникли планы развернуть в западных секторах ОТН-В более длинные приемные антенны для повышения эффективности против крылатых ракет.<sup>24</sup> Однако в дальнейшем ВВС США перестали рассматривать обнаружение крылатых ракет в качестве задачи для системы ОТН-В, ссылаясь на большую стоимость усовершенствований, которые требовались для придания системе таких возможностей.<sup>25</sup>

Трудности ОТН-В при обнаружении крылатых ракет возникают главным образом в связи с малыми размерами ракет. Хотя при некоторых комбинациях ориентации, поляризации и частоты крылатая ракета может иметь ЭОП, достигающую по величине соответствующее значение для самолета или даже превосходящую его, в большинстве случаев ЭОП окажется гораздо меньше. Как показано на рис.3 и как обсуждается в ста-

тье "Загоризонтные РЛС и обнаружение крылатых ракет" (Приложение Б), которая будет напечатана в выпуске 2 этого тома), короткий размер крылатой ракеты приводит к очень малой ЭОП в низкочастотной части спектра ОТН-В. В результате по ночам, когда работа ЗГРЛС ограничена низкочастотной частью спектра, ЭОП крылатой ракеты может оказаться слишком малой для обнаружения системой ОТН-В. На рис.5 приведены результаты простой оценки эффективности системы ОТН-В;<sup>26</sup> на рисунке показано отношение сигнал/шум как функция дальности обнаружения в октябре для объекта с размером бомбардировщика и для крылатой ракеты типа "Томагавк". Этот рисунок наряду с более детальными обсуждениями в Приложении Б наводит на мысль, что хотя система ОТН-В кое-когда способна обнаруживать крылатые ракеты, у нее может оказаться небольшая способность (или вообще никакой) делать это в ночное время.

Северная система предупреждения может также оказаться уязвимой к незаметному проникновению крылатых ракет. Хотя для точных оценок потенциала ССП против низколетящих целей требуется детальная географическая информация с указанием мест расположения РЛС, полное число РЛС кажется недостаточным для того, чтобы не допустить низковысотных щелей в перекрытии воздушного пространства.<sup>27</sup> Это совпадает с заявлениями официальных военных лиц относительно ССП.<sup>28</sup> Однако важно заметить, что наличие низковысотных щелей в радиолокационном перекрытии совсем не обязательно означает, что такие щели могут использоваться для крылатых ракет. Похоже, что подобные щели существуют в районах с сильно неровной местностью, где крылатым ракетам может потребоваться лететь на больших высотах. С другой стороны, любая крылатая ракета, которую обнаружили, будет находиться в поле зрения всего несколько минут и по этой причине система не сможет обеспечить достаточной информации о слежении, чтобы оценить характер атаки. Современные планы предусматривают дублирование ССП путем развертывания самолетов системы воздушного предупреждения и управления (АВАКС) на базах в Северной Канаде во время кризисной ситуации.

Есть и другие датчики, которые могли бы внести вклад в систему предупреждения о крылатых ракетах. Совместная система контроля воздушного пространства обеспечивает почти полное покрытие всего периметра США на высотах более 3000 м, а в планах предусматривается улучшение хара-

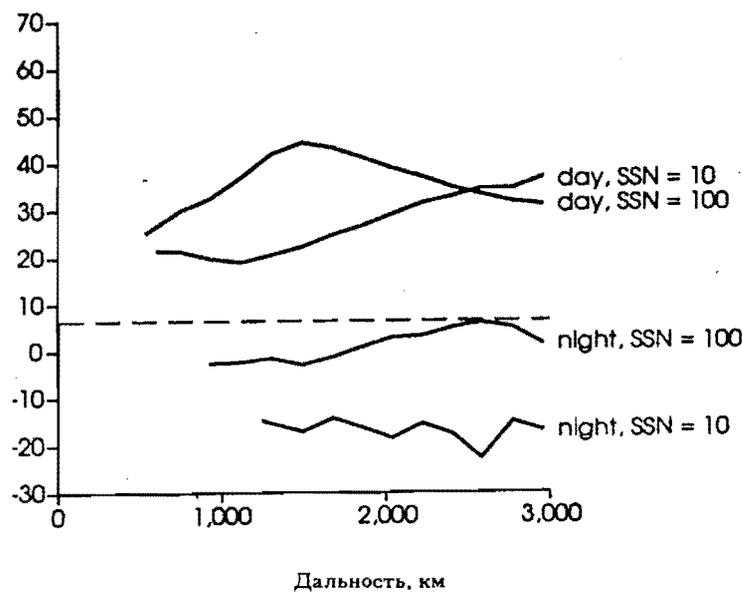
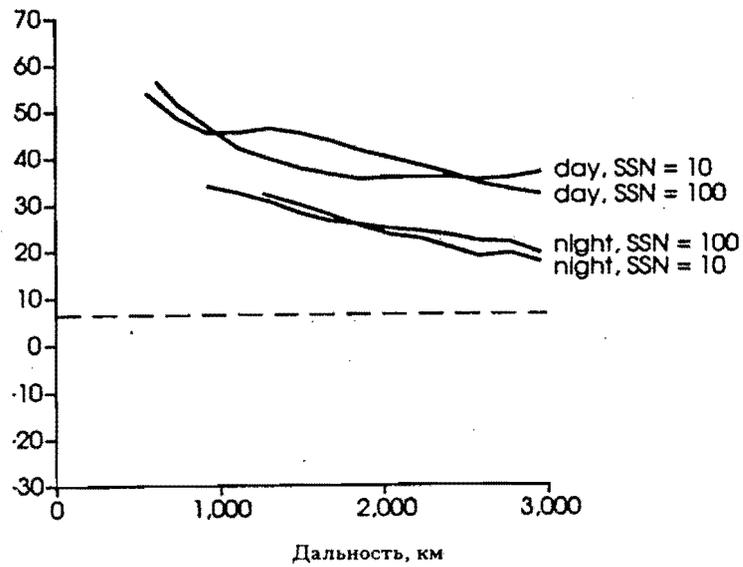


Рисунок 5

Отношение сигнала к шуму (в дБ) ОТН-В против целей типа бомбардировщика (в максимуме диаграммы направленности) и крылатой ракеты типа "Томагавк" (30° от максимума диаграммы направленности) в типичных осенних условиях. Приведены кривые для наблюдений в 13.00 (день) и 03.00 (ночь) для разных уровней солнечной активности (число солнечных пятен SSN = 10 соответствует низкой солнечной активности, а SSN = 100 - высокой). Штриховая линия, соответствующая отношению сигнал/шум С/Ш, равному 4 (6 дБ), - это оценка минимума С/Ш, которое требуется для обнаружения на экране РЛС. Расчеты обсуждаются в Приложении Б.

ктеристик ее РЛС для увеличения потенциала против целей с малой ЭОП.<sup>29</sup> В распоряжении ВВС США находятся 34 самолета E-3 АВАКС с бортовыми РЛС; совместно с перехватчиками ВВС они могли бы сыграть решающую роль путем предоставления возможности подтвердить факт нападения и идентифицировать его цели. Но число самолетов АВАКС слишком мало, чтобы обеспечить непрерывно контролируемый периметр вокруг Соединенных Штатов, даже если бы эти самолеты не использовались для других целей.<sup>30</sup> Возникшая недавно волна интереса к перехвату самолетов с контрабандными наркотиками также привела к увеличению сети РЛС, развернутых на борту самолетов и аэростатов вдоль южной границы США.<sup>31</sup> Сеть акустических подводных датчиков ВМФ США и другие возможности противолодочной борьбы могут сыграть очень важную роль как для слежения за подлодками СНГ, так и для обнаружения запуска КРМБ (это осуществляется благодаря детектированию подводного зажигания их первой ступени). В действительности этот противолодочный потенциал кажется наиболее эффективной способностью США получать в настоящее время предупреждение о КРМБ. Однако он не может обеспечить предупреждения о КРВБ, а его возможность угнаться за уменьшением шума подлодок СНГ и за менее шумными методами запуска РМБ не кажется очевидной.<sup>32</sup>

Итак, существующие и планируемые в ближайшем будущем системы США по контролю воздушного пространства, как кажется, обладают малой способностью обеспечить надежное предупреждение о нападении крылатых ракет. Маловероятно, чтобы у СНГ были лучшие способности по отношению к крылатым ракетам США. Более того, существующий потенциал обеих стран понизится, если развертывать крылатые ракеты типа "Стелт" с большей дальностью.

#### КРЫЛАТЫЕ РАКЕТЫ КАК ОРУЖИЕ ВНЕЗАПНОГО НАПАДЕНИЯ

Неспособность США и СНГ надежно обнаруживать крылатые ракеты в полете делает вероятным случай, когда маломасштабная атака крылатых ракет может пройти полностью незамеченной. Этим самым создается совершенно новая угроза внезапной не обнаруживаемой ядерной атаки. Главная обеспокоенность состоит не в том, что крылатые ракеты будут использоваться непосредственно в крупномасштабном противосиловом ударе (например, атака на шахты МБР), а в том, что их можно использовать в маломасштабном "опережающем" ударе по

нескольким критичным целям непосредственно перед полномасштабным ударом баллистических ракет.<sup>33</sup> Такой опережающий удар будет направлен против ключевых целей, которые могут эффективно действовать в течение короткого промежутка времени после предупреждения об атаке баллистических ракет. Среди наиболее важных целей такого типа находятся базы стратегических бомбардировщиков и ключевые объекты командования и управления.

Несколько минут, которые имеются в распоряжении после получения предупреждения об атаке баллистических ракет по стандартным траекториям, в принципе достаточно, чтобы все находящиеся на боевом дежурстве бомбардировщики США и бывшего СССР (или их большая часть) поднялись в воздух. Однако в результате недавней инициативы президента Буша по сокращению вооружений стратегические бомбардировщики США сняты с боевого дежурства (советские бомбардировщики уже не находились на боевом дежурстве), хотя все может быть быстро возвращено на свои места в случае возрастания международной напряженности. Таким образом в настоящее время стратегические бомбардировщики как США, так и СНГ уязвимы к любому виду ядерной атаки, о которой получено только тактическое предупреждение. Однако если международная напряженность вырастет до такого уровня, когда подобная атака становится допустимой, часть бомбардировочной авиации будет почти обязательно возвращена в состояние боевого дежурства.

Бомбардировщики и авиабазы - это "мягкие" цели и возможно, что при атаке без предупреждения один ядерный взрыв уничтожит все бомбардировщики на данной авиабазе. В настоящее время американские стратегические бомбардировщики расположены только на 13 базах, а стратегические бомбардировщики СНГ, как представляется, всего на четырех.<sup>34</sup> Для США, по крайней мере, это число вряд ли возрастет и скорее всего уменьшится по мере снятия с вооружения самолетов B-52 и замены их на меньшее количество B-2. По этой причине атака 13-ти крылатых ракет (или 26-ти, если на каждую цель направлять две ракеты) против нерассосредоточенных американских бомбардировочных сил потенциально может привести к уничтожению всех их на земле. От четырех до восьми ракет может потребоваться для атаки на нерассосредоточенные бомбардировочные силы СНГ.

Другой важный набор целей для потенциального опережающего удара составляют важнейшие объекты стратегического командования и управления: основные командные

центры, узлы стратегической связи, готовые к взлету самолеты (например, воздушные командные посты и центры управления запусками), РЛС раннего предупреждения об атаке баллистических ракет, наземные станции спутниковой системы раннего предупреждения. Точное число целей, которые могут подвергнуться нападению, а также результаты такого нападения по существу гораздо труднее определить, чем в случае атаки на базы бомбардировщиков. Однако в случае нападения на США наиболее критичными целями представляются относительно небольшое число главных командных центров<sup>36</sup> и баз дежурных самолетов.<sup>37</sup> Если предположить двойной удар по цели, то потребуется нападение 30-40 крылатых ракет для уничтожения этих целей. Даже при нападении на не получившую предупреждения систему командования атакующая сторона не может быть уверена, что разрушены все важнейшие командные центры, так как на некоторые цели типа самолета "Зеркало" (если он в воздухе) или подвижные командные центры (если они рассредоточены) ракеты могут быть не направлены, а кроме того могут существовать важные командные устройства и объекты, о которых атакующая сторона просто ничего не знала. Тем не менее, подобное нападение может ослабить ответную реакцию американской системы стратегического командования и контроля вплоть до того, что подвергнется опасности осуществление запуска ракет по предупреждению или даже удара американских МБР. Даже значительно меньшая по масштабам атака, ограниченная небольшим числом указанных ключевых целей, потенциально может оказаться очень разрушительной. Доступно очень мало подробной информации о системе командования и управления в СНГ, но было бы разумным предполагать, что сходное число ракет приведет к такому же разрушительному эффекту при нападении на систему стратегического командования и управления СНГ.

Таким образом, в мирное время 15-30 крылатых ракет "как гром среди ясного неба" могут уничтожить все бомбардировщики США или СНГ на земле, а также достаточно нарушить работоспособность командных систем США или СНГ, чтобы подвергнуть опасности возможность быстрого запуска стратегических ракетных сил. Потребуется примерно 30-60 ракет, чтобы напасть на оба набора целей одновременно, потенциально угрожая тем самым мгновенным уничтожением двух из трех ног стратегической триады каждой стороны. Такая атака может быть произведена всего лишь с трех подлодок или с 3-6 бомбардировщиков.

Следует держать в уме осуществимость, правдоподобность и эффективность внезапного нападения крылатых ракет. Даже абсолютно успешная неожиданная атака крылатых ракет не сможет предотвратить возмездия, поскольку (по крайней мере, для США) несколько тысяч боеголовок будут находиться в море на подлодках с БРПЛ. СНГ постоянно держит в море меньшую часть своих ПЛАРБ, но кажется вероятным, что по крайней мере несколько сот боеголовок СНГ будут в море.

Добавим еще, что опережающая атака работает наиболее эффективно в наименее вероятной ситуации - нападении без стратегического предупреждения. В разгар серьезного кризиса или при резком ухудшении отношений США-СНГ внезапную атаку крылатых ракет будет гораздо труднее организовать и она скорее всего окажется гораздо менее эффективной. Стратегические бомбардировщики могут быть рассредоточены по большему числу баз, возможно вплоть до 60-75,<sup>38</sup> причем не все базы могут быть известны атакующей стороне. Как минимум, это приведет к увеличению числа требуемых крылатых ракет, даже если на каждую цель будет направлено только по одной ракете. Хотя 60-75 крылатых ракет могут быть запущены еще тремя или четырьмя подлодками (или 5-10 бомбардировщиками), выросшее число ракет и большее разнообразие требуемых маршрутов увеличивают вероятность обнаружения нападения. Тем не менее, пока расположение баз рассредоточения остается известным, бомбардировочные силы останутся уязвимыми.

В то время как выживаемость находящихся на дежурстве бомбардировщиков может быть увеличена только в минимальной степени, может оказаться гораздо более трудным причинить вред находящейся на боевом дежурстве системе командования и управления. В этой ситуации следует скорее всего широко рассредоточить командные полномочия; подвижные и запасные командные посты должны иметь полный штат сотрудников и быть рассредоточенными; поднимаемые по тревоге в воздух самолеты уже должны быть в полете. Нападение на неподвижные командные пункты в этой ситуации мало что даст. Тем не менее, внезапная атака крылатых ракет все еще может быть наиболее разрушительной возможной формой нападения на систему стратегического командования и управления. Способность каждой из сторон запустить свои стратегические ракетные силы в условиях атаки другой стороны может оказаться менее надежной, чем при любом другом сценарии нападения.

С другой стороны, при планировании внезапной атаки крылатых ракет существует риск преждевременного ее обнаружения или иных неудач. ПЛАРБы или бомбардировщики могут быть обнаружены при передвижении к местам запуска. В случае КРМБ сами запуски, которые должны быть осуществлены при очень напряженных временных ограничениях, могут быть обнаружены или близко находящимися судами, подлодками и самолетами, или же обширной сетью американских подводных датчиков (что справедливо по отношению к подлодкам СНГ). Даже при отсутствии системы контроля воздушного пространства, способной надежно обнаруживать крылатые ракеты, несколько ракет могут быть обнаружены либо в полете, либо в результате аварии. Такое преждевременное обнаружение может дать стране - объекту атаки несколько часов после предупреждения для подготовки или для нанесения обезоруживающего удара.

Существуют также потенциально серьезные трудности для связи, командования и управления, возникающие при внезапной атаке крылатых ракет, особенно при использовании КРМБ. Подлодка, находящаяся на ударной позиции и не обнаруженная другой стороной, может оказаться неспособной передать эту информацию или отменить атаку, если, как она полагает, оказалась обнаруженной. Запускающие КРМБ подлодки должны быть выдвинуты вперед (по крайней мере для современной дальности РМБ), если они собираются суметь покрыть всю территорию США или СНГ. Для СНГ такое выдвижение вперед будет противоречить давно установленной традиции поддерживать плотный контроль над стратегическими ядерными подлодками.<sup>39</sup> Постоянно поддерживать готовность к внезапной атаке крылатых ракет на военно-морских базах может также стать существенной нагрузкой для подводного атакующего флота каждой из сторон. С другой стороны, вывод атакующих КРМБ на ударную позицию в условиях немигнуемого кризиса может потребовать нескольких недель, а за это время кризис может уже пройти или усилиться.

Эти соображения могут привести военных планировщиков к выводу, что опережающая атака либо слишком проблематична, либо слишком дорога, чтобы прорабатывать ее в качестве надежного варианта для включения в свой план ядерной войны. Но похоже, что обе страны сохраняют значительный потенциал внезапного нападения крылатых ракет, даже если они не заинтересованы в настоящее время в дальнейшем развитии такого потенциала. Менее шумные подлодки, КРМБ и КРВБ с большей дальностью и

меньшей вероятностью обнаружения, менее шумные способы запуска КРМБ - все эти усовершенствования с военной точки зрения представляют интерес не только для внезапного нападения крылатых ракет. Более того, еще до взаимного одностороннего снятия КРМБ с развертывания Бушем и Горбачевым не требовалось четкого разделения между разными уровнями угрозы, так как способность к внезапной атаке крылатых ракет могла развиваться постепенно, без заметного большого скачка. Например, хотя разработка и развертывание малозумных советских подлодок, предназначенных для управляемых ракет SS-N-21, и их развертывание вблизи американского побережья могла представлять очевидную угрозу, было трудно или даже невозможно узнать, находится ли на вооружении у патрулирующих вдоль побережья США подлодок много торпед и мало крылатых ракет, или наоборот (по крайней мере, без интрузивного режима верификации). Более того, предназначенные для поражения наземных целей КРБМ, развернутые для покрытия американских или советских целей для любых задач, даже только для ответного удара, могут развертываться таким же образом, как и для внезапной атаки.<sup>40</sup> Хотя решения Буша и Горбачева о помещении ядерных КРМБ на склады стали важными шагами в уменьшении опасности внезапного нападения крылатых ракет, проблема далека от конечного решения, поскольку ядерные КРМБ могут быть развернуты заново (и нет верификации их снятия), а ядерные КРВБ остаются развернутыми.

#### СЛЕДУЕТ ЛИ БЕСПОКОИТЬСЯ О ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕЗАПНОГО НАПАДЕНИЯ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ ?

Если, как мы доказали, возможность внезапного нападения крылатых ракет потенциально представляет очень серьезную угрозу для стабильности, то почему этой проблеме уделяется столь мало внимания? Частично это может быть вызвано широко распространенным представлением о том, что крылатые ракеты являются стабилизирующим оружием, и неполным знанием недостатков возможностей контроля воздушного пространства. Однако (это справедливо по крайней мере для США) другой важный фактор связан с тем, что угроза со стороны крылатых ракет СНГ появилась относительно недавно и она развивалась в период улучшения отношений между США и СНГ.

Можно выдвинуть предложение, что Соединенным Штатам и СНГ следует просто продолжать пренебрегать этой проблемой.

Сегодня ядерная война между этими двумя странами кажется почти невероятной. Если бы такая война и произошла, то ей предшествовал бы период ухудшения отношений, который дал бы возможность принять меры по отношению к этой угрозе. Более того, с учетом всех связанных с внезапным нападением крылатых ракет неопределенностей далеко не очевидно, выберет ли страна, решившая осуществить ядерный удар по другой стране, именно этот вариант. Таким образом, можно предположить, что в некоторой ситуации лучшим действием будет просто игнорировать проблему, особенно если решение кажется сложным или дорогим.

Однако откладывать решения до того времени, когда отношения между США и СНГ ухудшатся, рискованно, потому что такой поворот событий может произойти слишком быстро, чтобы эффективно прореагировать на него. В этой обстановке крылатые ракеты могут не только представлять прямую военную угрозу, но и привести к серьезным перекосам в оборонительной политике. При соответствующем наборе политических и внешних обстоятельств угроза внезапной атаки крылатых ракет легко может стать новым "окном уязвимости", но только более серьезным, поскольку влияет на две ноги триады.

Хотя неясно, попытается ли любая страна даже при серьезном кризисе использовать крылатые ракеты в качестве оружия внезапного нападения, такая атака может показаться невероятной только лишь по той причине, что мы привыкли мыслить в терминах очень малого времени после предупреждения о нападении баллистических ракет. При подобном нападении атакуемая сторона видит приближающуюся атаку и успех нападения (в единицах уничтоженных ядерных сил) зависит от того, успеет ли она прореагировать вовремя. При нападении крылатых ракет успех зависит от атакуемой страны, которая не видит приближение атаки. Неясно и неопределимо, какое из предприятий более рискованно. Ясно однако, что будущность нападающего, предпринимающего любую форму внезапной противосиловой атаки, будет зависеть (по крайней мере до определенного предела) от уязвимости сил каждой страны и состояния их систем предупреждения. В интересах обеих стран предпринять любые возможные шаги, чтобы исключить любой тип внезапного нападения.

Другой источник озабоченности связан с тем, что попытки создать на скорую руку потенциал обнаружения в кризисной обстановке может привести к опасным ложным тревогам. Даже хотя крупномасштабный запуск баллистических ракет является не-

двусмысленным событием с явно выраженными характерными особенностями и даже хотя обе страны работают с системами предупреждения об атаке баллистических ракет много лет, ложные сигналы о нападении баллистических ракет остаются поводом для беспокойства. Такие ложные тревоги легко разрешимы в условиях низкого уровня международной напряженности, но окажутся гораздо более беспокойными и опасными во время серьезного кризиса.

Крылатые ракеты выдвигают гораздо более суровые проблемы ложной тревоги. Обнаружение крылатых ракет неизбежно придется осуществлять в условиях беспорядочного фона и их легко будет спутать с разными военными и гражданскими самолетами (и наоборот). В идеальном случае система предупреждения о крылатых ракетах должна пройти долгий период проверки и подгонки за время низкого уровня напряженности между США и СНГ. Попытки быстро установить и ввести в действие систему предупреждения о крылатых ракетах в результате ухудшения отношений между США и СНГ может привести к ложным тревогам, что увеличит риск неумышленной ядерной войны.

Таким образом, если развертывание крылатых ракет смотрится как относительно невинное занятие в современной стратегической обстановке, оно может принять совсем иной вид, если наступит серьезный кризис в отношениях между США и СНГ. В такой ситуации способность к внезапной атаке ядерных КРМБ может стать исключительно дестабилизирующим фактором. Кроме того способность крылатых ракет угрожать выживаемости элементов стратегических ядерных сил может ослабить стремление США и СНГ к глубоким сокращениям их стратегических ядерных арсеналов, поскольку выживаемость станет все более важным фактором по мере количественного сокращения вооружений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на представление как о стабилизирующем оружии, крылатые ракеты потенциально принадлежат к наиболее дестабилизирующим видам ядерного оружия, поскольку ни США, ни СНГ не обладают системами, способными обеспечить надежное предупреждение о маломасштабной атаке крылатых ракет. По существу ядерное сдерживание остается основой политики как США, так и СНГ. Их сдерживающие факторы опираются на триаду ядерных сил, две из трех ног которой для своей выживаемости полагаются на тактическое предупрежде-

ние. Покуда США и СНГ продолжают полагаться на ядерное сдерживание, созданное этими силами, им не следует пренебрегать системами предупреждения от которых зависит выживаемость этих стран. Поскольку возможные решения данной проблемы могут потребовать больших предварительных сроков, именно сейчас настало время что-то сделать по этому поводу еще до возникновения кризиса или ухудшения отношений между США и СНГ. Конечно, перспективы обращения к этой проблеме зависят от стоимости и осуществимости возможных решений, которые мы рассмотрим в следующей статье.<sup>41</sup>

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Сиднея Дрелла, Лизбет Гронлунд, Дэвида Райта и двух анонимных рецензентов за полезные обсуждения и замечания.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. George N. Lewis and Theodore A. Postol, "Nuclear Cruise Missiles After the Cold War," submitted to Science & Global Security.
2. Разграничительная линия между крылатыми ракетами большой и малой дальности установлена по договору СТАРТ при 600 км как для КРМБ, так и для КРВБ. США раньше разворачивали ряд старых крылатых ракет большой дальности. Смотрите книгу Kenneth P. Werrell, *The Evolution of the Cruise Missile* (Washington DC: US Government Printing Office, 1983).
3. Недавно сообщалось, что США переделали несколько ядерных ALCM-B в обычные ALCM-C и что небольшое число этих ALCM-C было использовано в войне против Ирака. "ALCMs in Iraq," *Aviation Week and Space Technology*, 136, 3, 20 January 1992, p.19; "Air Force Launched 35 ALCMs on First Night of Gulf Air War," *Defense Daily*, 17 January 1992, p.88.
4. Для общего обсуждения характеристик современных крылатых ракет большой дальности с акцентом на "Томагавк" и ALCM-B (США) смотрите: Ronald Huisken, *The Origin of the Strategic Cruise Missile* (New York: Praeger, 1981) pp. 3-14; John C. Toomay, "Technical Characteristics," in Richard K. Betts, ed., *Cruise Missiles: Technology, Strategy, Politics* (Washington DC: Brookings, 1981), pp.31-52; and Kosta Tsipis, "Cruise Missiles," *Scientific American*, 236, 2,

February 1977, pp.20-29.

Характеристики современных КРМБ и КРВБ США и СНГ, включая ракеты с меньшей дальностью, приведены в работах Valerie Thomas, "Verification of Limits on Long-Range Nuclear SLCMs," *Science & Global Security*, 1, 1-2, 1989, pp.27-57; and T.K.Longstreth and R.A. Scribner, "Verification of Limits on Air-Launched Missiles," in Frank von Hippel and Roald Z. Sagdeev, eds., *Reversing the Arms Race: How To Achieve and Verify Deep Reductions in the Nuclear Arsenals* (New York: Gordon and Breach, 1990) pp.181-235.

5. Цитата взята из заявления президента Буша с инициативами США по сокращению вооружений. Тексты заявления президента Буша и ответа президента Горбачева приведены в статье "A New Era of Reciprocal Arms Reductions: Texts of President Bush's Nuclear Initiative and Soviet President Mikhail Gorbachev's Response," *Arms Control Today*, 21, 8, October 1991, pp.3-6.
6. US Department of Defense, *Soviet military Power* (Washington DC: US Government Printing Office, 1989) p.49.
7. Важность операционной дальности можно увидеть из сравнения операционных дальностей вариантов "Томагавк" для обычной атаки на корабли и наземные цели. Хотя эти ракеты сходны по полному весу и весу топлива, их операционные дальности отличаются чуть ли не в три раза (1300 км при атаке на наземные цели и 450 км для атаки на корабли). Эта разница связана с необходимостью для морского варианта облететь значительный район, чтобы достичь цели.
8. Это не полностью оптимизированная дальность, поскольку не принята во внимание зависимость расхода топлива от скорости для определения оптимальной скорости.
9. Этот значительный поправочный множитель может быть связан в основном с необходимостью пролетать над районами, карта которых известна, чтобы обновлять информацию для системы наведения. ВМФ США заявил, что использование навигационной системы GPS для обычного "Томагавк" (при этом пропадает необходимость пролетать над изученными районами для обновления системы наведения) увеличит расстояние между стартом и целью максимум на 20%.

Смотрите заявление контр-адмирала William C. Bowes (Director, Cru-

- ise Missile Program) before the Defense Subcommittee of the House Appropriation Committee, 21 April 1988, p.11.
10. Американская усовершенствованная крылатая ракета АСМ, дальность которой, как сообщают, составляет 4000 км, сможет достичь Москвы с Северного полюса.
  11. TERCOM определяет положение крылатой ракеты при помощи радарного высотомера и барометрических измерений для определения высотного профиля местности, который сравнивается с исследованным заранее высотным профилем местности. Эта информация используется затем для коррекции ошибок инерциальной системы наведения. Tsipis, "Cruise Missiles"; J.P.Golden, "Terrain Contour Matching (TERCOM): A Cruise Missile Guidance Aid," in Image Processing for Missile Guidance, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 238, 1980, pp.10-18; and W.R.Baker and R.W.Clem, Terrain Contour Matching Primer, ASD-Tr-77-61, Directorate of System Engineering, Aeronautical Systems Division, Wright-Patterson Air Force Base, August 1977.
  12. Круговая вероятная ошибка (КВО) "около 76 метров" была приведена при показаниях в Конгрессе коммодором Роджером Бэконом (US House of Representatives, Armed Service Committee, Department of Defense Authorization Hearings for Fiscal Year 1985, part 2, p.392), хотя некоторые оценки КВО приводят к более низким значениям порядка 30 м (Thomas B.Cochran, William M.Arkin, and Milton M. Hoenig, Nuclear Weapons Databook, Volume I: US Nuclear Forces and Capabilities (Cambridge, Massachusetts: Ballinger, 1984), p.187.  
 Вариант "Томагавк" с обычной боеголовкой для нападения на наземные цели содержит цифровой коррелятор для сопоставления данных системы наведения с измерениями, что уменьшает КВО примерно до 7-8 м (J.R.Carr and J.S.Sobek, "Digital Scene Matching Area Correlator" in Image Processing for Missile Guidance, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 238, 1980, pp.36-41.
  13. Ядерная боеголовка с мощностью 150 килотонн при взрыве на высоте 100 м создаст максимальное избыточное давление свыше 700 атм при дальности 80 м от проекции точки взрыва. Как полагают, современные американские шахты укреплены до давлений 130-200 атм. Смотрите Samuel Glasstone and Philip J.Dolan, The Effects of Nuclear Weapons (Washington DC: US Government Printing Office, 1977), pp.110-111; Barbara G.Levi, Mark Sakitt, and Art Hobson, eds., The Future of Land-Based Strategic Missiles (New York: American Institute of Physics, 1989) p.32.
  14. Сложность этого вида наведения можно также перевести на язык меньшей надежности по сравнению с баллистическими ракетами. Но как кажется, по мере набора операционного опыта с крылатыми ракетами против наземных целей, надежность будет улучшена.
  15. Ракета использует радарный высотомер для определения своей высоты над уровнем земли. В работе Tsipis "Cruise Missiles", p.24 приведены значения высоты полета для "Томагавк": 20 м над водой, 50 м над умеренно холмистой местностью и 100 м над горами. В других работах приводятся данные, из которых следует, что ракета "Томагавк" имеет "командную высоту" 98 м над умеренно холмистой местностью и 139 м над сильно пересеченной. Обсуждается установка нового крыла на "Томагавк", что уменьшит эти значения до 60 м и 113 м, соответственно. V.J.Kuchta, "Technology Advances in Cruise Missiles", AIAA Paper No.81-0937, AAA 1981 annual meeting, Long Beach, California, 12-14 May 1981.
  16. Longstreth and Scribner, "Verification of Limits on Air-Launched Cruise Missiles," p.2142. Однако на АСМ были замечены лазерные сигналы, что привело к предположениям, что эта ракета может использовать для навигации лазерную систему. "Air Force Displays Advanced Cruise missile for First Time," Aviation Week and Space Technology, 132, 20, 14 May 1990, p.30.
  17. "Air Force Launched 35 ALCMs", Defense Daily, 17 January 1992. [18] Рассматриваются методы для обычных усовершенствованных крылатых ракет большой дальности, включая лазерную локацию для отслеживания местности, получение ИК-изображений и радиолокаторы с синтезированной апертурой. Norman Friedman, World Naval Weapon Systems 1991/92 (Annapolis, Maryland: Naval Institute Press, 1991), p.123. Обзор новых подходов к усовершенствованию инерциальных систем наведения дан в работе J.T.Ritland, "Survey of Aided-Inertial Navigation Systems for Missiles," AIAA Guidance, Navi-

- gation and Control Conference, Boston, Massachusetts, 14-16 August 1989, pp. 608-617.
19. Например, значение 0.1 м приведено в статье John W.R. Lepingwell "Soviet Strategic Air Defense and the Stealth Challenge," *International Security*, 14,2, Fall 1989, p.85. Мы рассмотрим более детально ЭОП крылатой ракеты типа "Томагавк", как можно уменьшить эту ЭОП, а также ряд проблем, связанных с обнаружением целей с малой ЭОП в следующей статье (см. ссылку 1).
  20. Краткий, но представительный список значений ЭОП для самолетов приведен в книге Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd edition (New York: McGraw-Hill, 1980) p.44.
  21. Первая фаза развертывания ССП включает в себя 15 РЛС FPS-117 большой дальности - все они установлены. На второй фазе к середине 90-х годов должно быть развернуто 39 РЛС FPS-124 малой дальности для "перекрытия щелей". "US, Canada Agree To Renew NORAD Pact," *Aviation Week and Space Technology*, 134, 17, 29 April 1991, p.71.
  22. Министерство обороны США включило 242 миллиона долларов на систему ОTH-B в свой бюджет по программе борьбы с наркотиками на 1991 г. Большая часть этих затрат пошла бы на обеспечение одного из смотрящих на юг секторов центрального участка ОTH. Однако конгресс не одобрил этой заявки. US General Accounting Office, *Over-the Horizon Radar: Better Justification Needed For DoD System's Expansion*, GAO/NSIAD-91-61 (Washington DC: Government Accounting Office, January 1991); George Leopold, "Pentagon Seeks Drug Funds to Finance Portion of OTH-B Radar," *Defense Daily*, 5,8, 19 February 1990, p.12.
  23. В настоящее время участок на Восточном побережье работает только восемь часов в день при пятидневной рабочей неделе, а участок на Западном побережье законсервирован. Если потребуется, он может быть за шесть месяцев приведен в полную готовность. Neil Munro, "DoD Scrap Billion Dollar Over the Horizon Coastal Radars," *Defense News*, 6,3, 18 January 1991, p.6; "USAF Weighs Plan for Limited OTH-B Operations in Maine," *Aviation Week and Space Technology*, 134,17, 29 April 1991, p.69; "USAF Limits OTH-B on East Coast, Mothballs West Coast Site," *Aviation Week and Space Technology*, 134,22, 3 June 1991, p.24; W.C.Hidlay, "Maine Defense Radar To Run Only Part Time," *Boston Globe*, 28 May 1991, p.60.
  24. David Hughes, "Tests Verify OTH-B Radar's Ability to Detect Cruise Missiles," *Aviation Week and Space Technology*, 1-28,12, 21 March 1988, pp.60-65. Смотрите также показания генерала Moorman, US House of Representatives, Committee on Appropriations, DoD Appropriations for Fiscal Year 1989, part 6, pp.545, 562-563. Однако другие заявления о способности ЗГРЛС обнаружить крылатые ракеты не вызывают столь большой доверительности по сравнению с высказыванием командующего ПВО генерала Пиотровского: "Наши анализы показывают, что даже при наихудших условиях обнаружения крылатых ракет вероятность обнаружения системой ОTH-B хотя бы одной из десяти достаточно велика, так что Советам по-видимому нечего надеяться на успешную внезапную атаку". James W. Canan, "The Bif Hole in NORAD," *Air Force Magazine*, 72, -10, October 1989, pp.54-59.
  25. George Leopold, "Price Tag Changes OTH-B Mission," *Air Force Times*, 26 March 1990; Donald Woutat, "Radar Site's Wide Eye May Shift to Drug War," *Minneapolis Star Tribune*, 15 February 1990, p.1.
  26. Эти графики были построены с использованием процедур, намеченных в статье J.M.Headrick, "HF Over-the-Horizon Radar," in Merrill I. Skolnik, ed., *Radar Handbook*, 2nd edition (New York: McGraw-Hill, 1990), и обсужденных более детально в Приложении Б.
  27. Как представляется, общая длина линии, покрываемой ССП, составляет около 5500 км и поэтому каждая из 54 РЛС в среднем перекрывает круг с радиусом 51 км. РЛС для перекрытия щелей расположены на башнях высотой 6-30 м (US House of Representatives, Armed Services Committee, DoD Authorization for Fiscal Year 1985, part 4, p.1270). Если предположить, что типичная антенна РЛС поднята на башню высотой 30 м и что она должна обеспечить покрытие выше 60 м по высоте, тогда радиус обнаружения при ровной земной поверхности составит 54.5 км. Heilenday приводит следующие данные по относительному уменьшению дальности до горизонта: плоская местность - 0.85, малохолмистая местность - 0.65, холмистая местность - 0.5, смотрите книгу Frank Heilenday, *Principles of Air Defense and Air Vehicle Penetration* (Washington DC: CEE Press Book, 1988),

- р. 4.6. Если предположить, что среднее относительное уменьшение составляет 0.75, то фактическая дальность обнаружения составит около 41 км. Расстояние между РЛС придется уменьшать еще больше, чтобы добиться кое-какого перекрытия между соседними РЛС. Этот результат совпадает с оценками Delaney's, по которым РЛС наземного базирования способна обнаруживать цели на высоте 60 м при дальности 30-45 км, William P. Delaney, "Air Defense of the United States," *International Security*, 13, 1, Summer 1990, pp. 181-211.
28. Судя по описанию, ССП скорее уменьшает щели в перекрытии на малой высоте системой дальнего раннего предупреждения, нежели удаляет их. Об этом говорится в показаниях генерал-майора J.A. Shoud (US House of Representatives, Armed Service Committee, DoD Authorization for Fiscal Year 1985, part 4, p. 1268). Канадский министр обороны Перрин Битти сказал, судя по сообщениям, что крылатые ракеты СНГ могут пролетать под ССП. Смотрите статью David Hughes, "USAF Will Develop Major Radar Upgrade for its E-3 AWACS Fleet," *Aviation week and Space Technology*, 128, 21, 23 January 1989, pp. 45-49.
  29. Текущие планы предусматривают, что эта система будет обновлена более совершенными РЛС. Требования к новым РЛС ARSR-4 содержат возможность обнаружения целей с ЭОП - 0.1 м на расстояниях 160 км. Предложенная компанией "Дженерал Электрик" РЛС ARSR-4, как говорят, "очень напоминает" РЛС FPS-117, которую компания поставила для ССП. Philip Klass, "Four Radar Firms Vie for FAA/USAF Air Surveillance Radar Contract," *Aviation Week and Space Technology*, 128, 21, 23 May 1988, pp. 93-99.
  30. Самолеты АВАКС первоначально предназначались для тактических задач. Однако восемь из них сейчас намечаются для охраны континента в военное время. Смотрите статью Arthur Charo, *Continental Air Defense: A Neglected Dimension of Strategic Defense*, CSIA Occasional Paper No 7 (Cambridge, Massachusetts: Center for Science and International Affairs, Harvard University, 1990), p. 19. ВМФ США имеет также свыше 100 самолетов E2-C с бортовыми обзорными РЛС "Соколиный глаз" (Hawkeye), которые также первоначально отводились для тактических задач.
  31. US General Accounting Office, Drug Smuggling: Capabilities for Interdicting Private Aircraft Are Limited and Costly, GAO/GGD (Washington DC: General Accounting Office, June 1989).
  32. Один из путей значительного уменьшения шума, производимого запускаемой с подлодки ракетой заключается в том, чтобы поместить ее в плавучую капсулу, которая выскакивает из воды до зажигания двигателя ракеты. Как сообщается, американской противолодочной ракете "Лэнс", запускаемой с подлодок, пришлось прибегнуть к такой процедуре, чтобы удовлетворить требованиям к скрытым действиям. Смотрите книгу Friedman, *World Naval weapon Systems 1991/92*, p. 691.
  33. Theodore A. Postol, "Banning Nuclear SLCM's - It Would Be Nice If We Could," *International Security*, 13, 3, Winter 1988/89, pp. 191-202.
  34. Об американских базах бомбардировщиков написано в статье Longstreth and Scribner, "Verification of Limits on Air-Launched Cruise Missiles," p. 202. Там не содержится база ВВС Лоринг в штате Мэн, где размещены B-52 с обычным вооружением, и недавно прекратившие активную деятельность базы ВВС в Пизе и Питтсбурге. В соответствии с договором СТАРТ тяжелые советские бомбардировщики размещены на двух украинских базах, одной казахской и одной базе в России. Robert S. Norris and William M. Arkin, "Nuclear Notebook", *Bulletin of the Atomic Scientists*, 48, 1, January/February 1992, p. 48.
  35. Среди других возможных целей стратегических сил базы самолетов-заправщиков, центры управления запусками МБР (особенно если соглашения по контролю над вооружениями приведут к значительному их сокращению по сравнению с полным числом около ста до договора СТАРТ) и базы подвижных ракет, которые разбегаются для сохранности при предупреждении (особенно в том случае, когда на одной базе размещено заметное число ракет).
  36. Картер приводит список девяти крупных командных центров, которые он рассматривает как цели первой категории важности: национальный военный командный центр (Пентагон), запасной национальный военный командный центр (Форт Ричи, Мэриленд), Белый дом, штаб-квартира стратегического авиационного командования в Омахе, Небраска [Прим. ред.: штаб-квартира САК закрыта 01.6.92 ], штаб-квартира НОРАД (Колорадо-Спрингс, Колорадо),

штаб-квартира атлантического командования (Норфолк, Вирджиния), штаб-квартира тихоокеанского командования (Оаху, Гавайи), Кемп-Дэвид (Мэриленд) и Маунт Везер (Вирджиния). Ashton B. Carter, "Assessing Command System Vulnerability," in Ashton B. Carter, John D. Steinbruner, and Charles A. Zraket, eds., *Managing Nuclear Operations* Washington DC: Brookings Institution, 1987), p.561.

37. Такие самолеты (командные посты, воздушные центры управления запусками ракет, самолеты-ретрансляторы системы связи) по крайней мере вплоть до недавнего времени находились в состоянии повышенной боевой готовности для старта по сигналу предупреждения о нападении. Возможно, что часть из них или все они сейчас сняты с боевой готовности, хотя их очень быстро можно вернуть в такой режим при возрастании международной напряженности. В число этих самолетов входят: воздушный пункт управления при чрезвычайном положении (ВПУЧП) и самолет-ретранслятор системы управления после нападения противника (СУПН) на базе ВВС Гриссом в Индиане (хотя самолет ВПУЧП, который будет использовать президент, остается в Индиане, его база, как говорят, находится в Арканзасе на базе ВВС Блайтвилл [ныне Экер]; два воздушных пункта управления запусками ракет (ВПУЗР) на базе Минот, Северная Дакота; другой ВПУЗР и запасной ВКП и не находящийся в воздухе самолет "Зеркало" на базе ВВС Оффат, Небраска. Воздушные командные посты атлантического (Норфолк, Вирджиния) и тихоокеанского (Гавайи) командования также являются вероятными целями. Смотрите работы A. Carter, "Assessing Command System Vulnerability," and Bruce G. Blair, *Strategic Command and Control: Redefining the Nuclear Threat* (Washington DC: Brookings Institution, 1985).

Воздушный командный пункт САК (стратегического авиационного командования) "Зеркало" (Looking Glass) больше не находится в воздухе непрерывно, но он летает в течение непре-

сказуемых интервалов и поэтому не может надежно быть под прицелом, хотя его база может стать целью для атаки. Самолет ВМФ ТАСАМО для связи с подлодками также был снят с ~~постоянного дежурства~~ в воздухе.

38. Предполагаемое число баз рассредоточения американских бомбардировщиков принято равным 75 в работе Alton H. Quanbeck and Archie L. Wood, *Modernizing the Strategic Bomber Force* (Washington DC: Brookings Institution, 1976), p.51. В работе Картера "Assessing Command System Vulnerability," p. 566 приводится 58 баз бомбардировщиков и заправщиков САК, а также баз рассредоточения САК первого и второго порядка. Число баз рассредоточения СНГ может оказаться значительно меньше. По оценкам число баз бомбардировщиков в СНГ, куда включены базы промежуточной и малой дальности, а также планируемые базы в Арктике, составляет 24. Barbara G. Levi, Frank N. von Hippel, and William H. Daugherty, "Civilian Casualties from 'Limited' Nuclear Attacks on the Soviet Union," *International Security*, 12, 3, Winter 1987/88, pp. 168-189.

При серьезном кризисе часть бомбардировочных сил может предположительно быть приведена в состояние боевой воздушной готовности. Эти самолеты фактически окажутся нечувствительными к нападению крылатых ракет.

39. David Holloway and Condolezza Rice, "The evolution of Soviet Forces, Strategy, and Command," in Kurt Gottfried and Bruce Blair, eds., *Crisis Stability and Nuclear War* (New York: Oxford University Press, 1988) p.144; Rose Gottemoeller, *Land-Attack Cruise Missiles*, Adelphi Papers No. 226 (London: International Institute for Strategic Studies, 1987/88) p.23.
40. Даже хотя советские подлодки класса "Янки" используются для патрулирования в относительной близости от побережья США просто потому, что их ракеты обладают небольшой дальностью, они тем не менее вызывают беспокойство в связи с возможностью нанесения менее обнаружимой атаки.
41. George N. Lewis and Theodore A. Postol, "Possible Responses".

## ДАЛЬНОСТЬ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ ТИПА "ТОМАГАВК"

Джордж Н. Льюис, Теодор А. Постол

В этой заметке обсуждаются факторы, влияющие на дальность полета крылатых ракет и их техническая реализуемость.

Авторы заметки работают в Массачусетском технологическом институте по программе изучения обороны и контроля над вооружениями.

В этой заметке производится оценка дальности крылатых ракет типа "Томагавк" и возможности ее дальнейшего увеличения. В табл. 1 приведена сводка технических характеристик ракеты "Томагавк", использованных в этих оценках.

Дальность полета крылатой ракеты на постоянной высоте определяется уравнением Бреге:<sup>1</sup>

$$R = \frac{V L}{c D} \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right) = \frac{V C_L}{c C_D} \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right) \quad (1)$$

где  $V$  - скорость самолета,  $c$  - удельный расход топлива,  $L/D$  - отношение коэффициентов подъемной силы и сопротивления,  $W_i$  - начальный вес самолета,  $W_f$  - конечный вес самолета,  $C_L$  - коэффициент подъемной силы,  $C_D$  - коэффициент сопротивления.

Поскольку в процессе полета по мере израсходования топлива отношение  $L/D$  изменяется, то следует использовать либо усредненное значение этого отношения, либо производить расчеты для коротких участков полета, на которых это отношение остается постоянным. Для расчета дальности необходимы данные о подъемной силе, сопротивлении и расходе топлива. Эти параметры крылатых ракет будут рассматриваться в последующих разделах.

### ПОДЪЕМНАЯ СИЛА И СОПРОТИВЛЕНИЕ

Выражения для подъемной силы и сопротивления можно записать в следующем виде:

$$L = \frac{\rho V^2 C_L S_{ref}}{2} \quad (2a)$$

$$L = \frac{\rho V^2 C_L S_{ref}}{2} \quad (2b)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха и  $S_{ref}$  - опорная площадь (как правило, площадь сечения крыла).

При полете на постоянной высоте подъемная сила должна быть равна весу самолета; поэтому требуемое значение коэффициента  $C_L$  для заданной высоты полета (т.е. заданной плотности) может быть рассчитано по значению скорости.

Оценка коэффициента сопротивления более сложна. Если скорость достаточно мала, то влиянием сжимаемости воздуха можно пренебречь и коэффициент сопротивления будет определяться следующей формулой:

$$C_D = C_{DP} + \frac{C_L^2}{e \cdot AR \cdot \pi} \quad (3)$$

где  $C_{DP}$  - коэффициент паразитного торможения (при нулевой подъемной силе),  $e$  - коэффициент эффективности самолета (или коэффициент эффективности Освальда), характеризующий отличие крыла самолета от идеального крыла, и  $AR$  - отношение размаха крыла к средней длине его хорды (для крылатой ракеты "Томагавк"  $AR = 6$ ).

Это выражение, связывающее коэффициент подъемной силы с коэффициентом сопротивления, называют полярной сопротивляемостью. Первый член этого выражения называют паразитным торможением, которое не связано с подъемной силой. Для дозвуковых самолетов этот коэффициент в основном определяется поверхностным трением, при этом могут быть рассчитаны составляющие коэффициента для отдельных элементов конструкции (фюзеляжа, крыльев и стабилизатора) и коэффициент сопротивления самолета будет равен сумме этих

Таблица 1  
Аэродинамические характеристики крылатой ракеты "Томагавк"  
с ядерной боеголовкой<sup>а</sup>

Вес	1184 кг
Диаметр	0,52 м
Длина	5,55 м
Площадь поверхности фюзеляжа	9,12 м <sup>2</sup>
Размах крыльев	2,59 м
Средняя хорда крыла	0,43 м
Отношение размаха к средней хорде	6,0
Опорная площадь крыла	1,11 м <sup>2</sup>
Отношение толщины крыла к хорде	0,082
Площадь стабилизатора	0,84 м <sup>2</sup>
Отношение толщины и хорды стабилизатора	0,083
Вес топлива <sup>б</sup>	513 кг

<sup>а</sup> E.C. Rooney, R.E. Craig, "Development of Techniques and Correlation of Results to Accurately Establish the Lift/Drag Characteristics of an Air Breathing Missile from Analytical Predictions, Sub-Scale and Full-Scale Wind Tunnel Tests and Flight Tests", in "Performance Prediction Methods", AGARD Conference Proceedings No. 242, Neuilly-sur-Seine, France, Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1977, pp. 16.1 - 16.18; General Dynamics Company, "Cruise Missile Mass Properties Summary", GDC-AUR-89-052, March 1989.

<sup>б</sup> Оценка массы топлива основана на предположении о том, что в ракете "Томагавк" с обычной боеголовкой (BGM-109) находится 272 килограмма топлива (General Dynamics Company, "A New Dimension in Conventional Airpower: Medium Range Air-to-Surface Missiles"). Предполагается, что различие массы ракеты "Томагавк" с обычной боеголовкой (1293 килограмма) и с ядерной боеголовкой (1184 килограмма) связано с тремя причинами: разницей в массе боеголовок (450 килограммов для обычной и 123 килограмма для ядерной), разницей в массе систем наведения (95 килограммов для обычной и 45 килограммов для ядерной), и различием в массе топлива. Эти значения взяты из статьи Kosta Tsipis, "Cruise Missiles", Scientific American, v. 236, No. 2, February 1977, pp. 20 - 29. Отсюда получается разница в массе топлива в 268 килограммов. Считая, что 90 процентов от этой массы представляет собой массу полезного топлива, мы получаем величину массы полезного топлива на ракете с ядерной боеголовкой в 513 килограммов. Отношение сухой массы крылатой ракеты к массе заправленной ракеты равно 0,57; для сравнения отметим, что это отношение для ракеты ALCM-B равно 0,58 (John C. Toomay, "Technical Characteristics", in Richard K. Betts, ed., "Cruise Missiles: Technology, Strategy, Politics", Washington, DC, Brookings, 1981, pp. 31 - 52.

составляющих.<sup>2</sup> Второй член в выражении называют индуцированным сопротивлением, которое связано с подъемной силой и пропорционально квадрату коэффициента подъемной силы  $C_L$ .

Относительно простая геометрия крылатой ракеты "Томагавк" позволяет оценить эти параметры по формулам, приведенным в учебниках по конструированию самолетов.<sup>3</sup> Мы получили, что:

$$C_D = 0,034 + 0,071C_L^2 \quad (4)$$

На рис. 1 показаны поляра сопротивления, рассчитанная по нашей формуле, вместе с опубликованной поларой сопротивления крылатой ракеты AGM-109. Эта ракета представляла собой вариант крылатой ракеты "Томагавк" воздушного базирования,

который не был выбран для программы ALCM-B. Она на 60 сантиметров длиннее "Томагавка", но считается, что их коэффициенты подъемной силы и сопротивления близки.<sup>4</sup> Как видно из рис. 1, наши оценки действительно дают близкие результаты, однако, паразитное сопротивление ракеты AGM-109 несколько больше в режиме малых значений  $C_L$ , где применимы наши предположения (если подставить в наши расчеты данные о коэффициенте сопротивления крылатой ракеты AGM-109, то оценка дальности несколько уменьшится).<sup>5</sup>

#### ДВИГАТЕЛЬ КРЫЛАТОЙ РАКЕТЫ "ТОМАГАВК" И УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА

На крылатой ракете "Томагавк" уста-

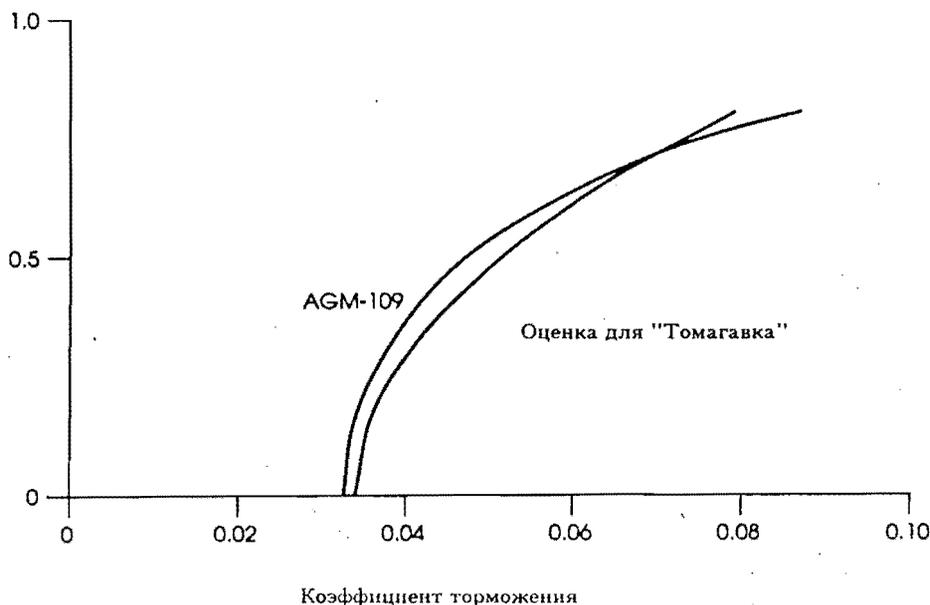


Рисунок 1

Сравнение наших расчетов полярны сопротивления с опубликованными данными для ракеты AGM-109 (см. статью В. J. Kuchta, "Technology Advances in Cruise Missiles", AIAA Paper No. 81-0937, AIAA 1981 Annual Meeting and Technical Display - Frontiers of Achievement, Long Beach, California, 12 - 14 May 1981).

навливается турбовентиляторный двигатель F-107-WR-400 фирмы Williams Research Corporation, который, так же как и двигатель F-107-WR-101 для разрабатываемой крылатой ракеты воздушного базирования ALCM-B, был создан на базе спроектированного на той же фирме двигателя меньших размеров WR-19.<sup>6</sup> В ходе создания этих двигателей в их конструкцию было внесено много усовершенствований, и этот процесс до сих пор продолжается. Двигатель F-107-WR-101 весит примерно 66 килограммов, а его максимальная тяга на уровне моря равна 290 килограммам силы.<sup>7</sup>

Основным параметром двигателя, определяющим дальность полета крылатой ракеты, является удельный расход топлива. Эта величина соответствует количеству топлива, которое надо затратить на поддержание определенного уровня тяги в течение определенного времени, и обычно измеряется в килограммах израсходованного топлива за час на килограмм тяги (или час<sup>-1</sup>). В большинстве обсуждений крылатой ракеты "Томагавк" принимается значение удельного расхода топлива, равное 1,0 час<sup>-1</sup>, однако некоторые авторы считают, что эта

величина еще лучше, и достигает примерно 0,7 час<sup>-1</sup>.<sup>9</sup> Мы увидим в дальнейшем, что эти величины не обязательно не совместимы друг с другом.

По данным изготовителя двигателя F-107-WR-101, его статический удельный расход топлива на уровне моря равен 0,686 час<sup>-1</sup> (см. ссылку<sup>10</sup>). Эту величину нельзя использовать для оценки дальности полета ракеты "Томагавк", потому что она получена на стенде без учета влияния потока набегающего воздуха. С увеличением скорости удельный расход топлива турбовентиляторного двигателя растет, и влияние этого эффекта тем больше, чем больше степень обхода.<sup>11</sup> Кроме того, установка двигателя в корпус приводит к росту удельного расхода топлива, но эти потери обычно не превышают нескольких процентов.<sup>12</sup> Поэтому в полете удельный расход топлива крылатой ракеты "Томагавк" будет больше, чем на испытательном стенде, на 30 - 40 процентов, и в качестве разумного первого приближения для полета на уровне моря можно будет принять величину в 0,9 - 1,0 час<sup>-1</sup>.

Более точную оценку удельного рас-

хода топлива в зависимости от высоты и скорости можно получить из анализа идеального цикла двигателя этого типа.<sup>13</sup> Полученная зависимость удельного расхода топлива от числа Маха на различных высотах показана на рис. 2.<sup>14</sup> При расчетах дальности полета мы использовали эти значения, увеличенные на 3 процента для учета потерь, связанных с установкой двигателя в корпус.

### МАКСИМАЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ

Теперь мы обладаем всей информацией, необходимой для оценки дальности полета крылатой ракеты типа "Томагавк" на фиксированной высоте с постоянной скоростью. Результаты этих статей были представлены

в статье авторов в предыдущем выпуске журнала<sup>15,16</sup> (см. табл. 2). Тем не менее, максимальная дальность не достигается при полете на постоянной высоте с постоянной скоростью. Из уравнения Бреге следует, что дальность полета будет максимальной при максимуме величины  $(V/c) \{L/D\}$ .

При оценке максимальной дальности делалось обычное предположение о слабой зависимости удельного расхода топлива от скорости, которая не влияет на определение оптимального значения скорости для максимальной дальности.<sup>17</sup> При этом предположении максимальная дальность будет достигаться при выполнении следующего условия:<sup>18</sup>

$$C_L = \sqrt{\frac{C_{DP} \cdot \pi \cdot AR \cdot e}{3}} \quad (5)$$

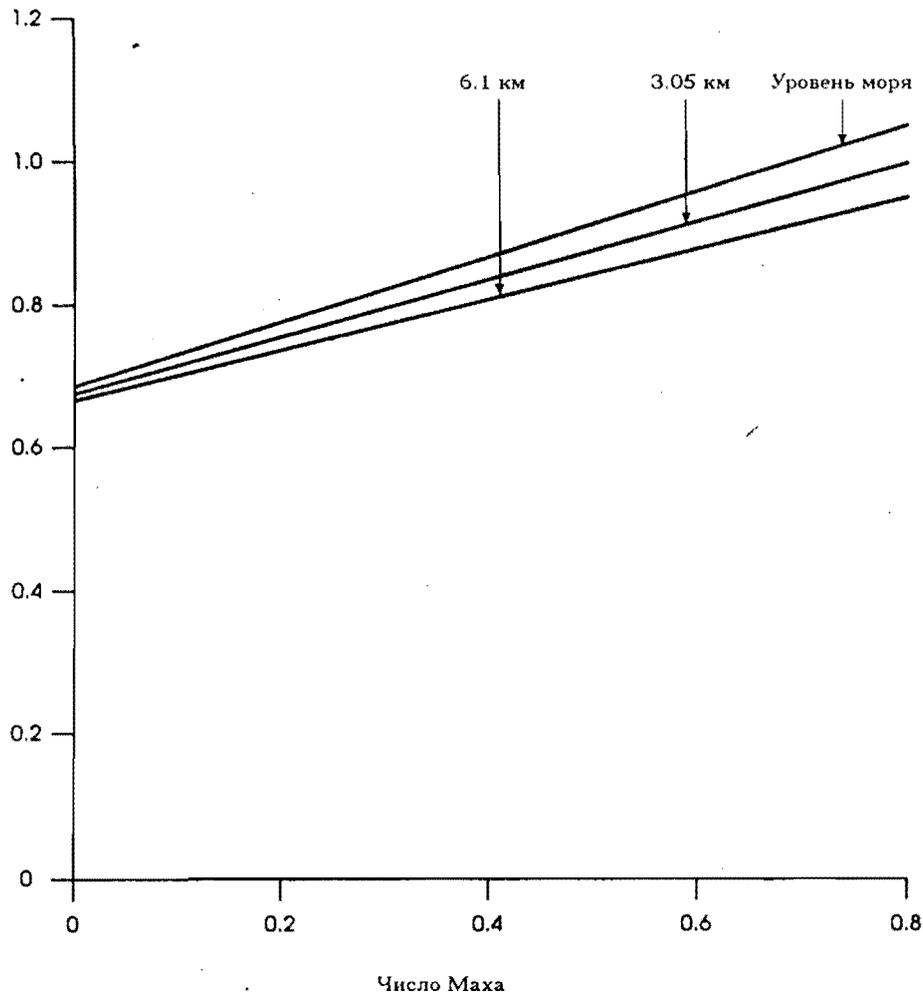


Рисунок 2

Расчетная зависимость удельного расхода топлива ракеты "Томагавк" от скорости.

На основании этого выражения были построена приведенная на рис. 3 кривая зависимости оптимальной скорости  $V_{best}$  крылатой ракеты "Томагавк" от доли израсходованного топлива.<sup>19</sup> Значения максимальной дальности полета, рассчитанные для оптимальной скорости, изменяющейся в течение полета в зависимости от массы крылатой ракеты, также приведены в табл. 2 предыдущей работы авторов.<sup>15</sup>

При анализе этих результатов следует иметь в виду следующие особенности. Во-первых, в этих расчетах пренебрегается зависимостью удельного расхода топлива от скорости; при учете этого эффекта оптимальная скорость несколько уменьшится, а дальность полета несколько увеличится. Во-вторых, удельный расход топлива турбо-

вентиляторных двигателей увеличивается, когда тяга снижается до уровня менее 70 процентов от максимального. В наших расчетах этого не учитывалось,<sup>20</sup> что приведет к предположительно небольшому снижению дальности. И, наконец, для достижения максимальной дальности следует изменять не только скорость, но и высоту полета.

#### УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ ТИПА "ТОМАГАВК"

Дальность полета крылатой ракеты типа "Томагавк" ограничивается объемом топлива, который она может нести с собой.<sup>21</sup> Поэтому самым простым способом увеличения ее дальности является увеличение объема топливных баков.<sup>22</sup> Однако, во

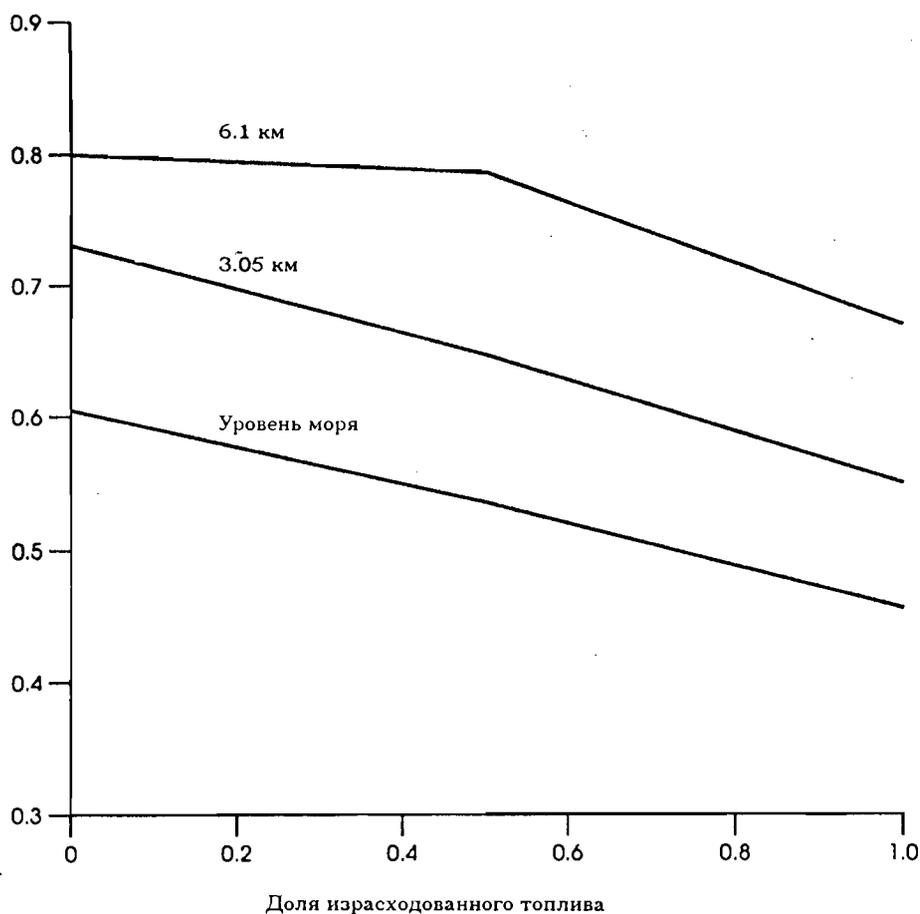


Рисунок 3

Оптимальная по максимальной дальности скорость ракеты "Томагавк" на трех различных высотах в зависимости от доли израсходованного топлива. В этих расчетах не учитывалась зависимость удельного расхода топлива от скорости, что приводит к небольшому уменьшению оптимальной скорости по сравнению с указанной.

многих случаях размер ракеты определяется из других соображений, таких, как необходимость размещения в существующих пусковых установках. В последующем обсуждении мы будем исходить из того, что повышение дальности должно проводиться при условии сохранения объема крылатой ракеты.

Рассмотрим по порядку факторы, способные увеличить дальность полета крылатых ракет.

*Легкие элементы конструкции.* Применение новых материалов позволяет уменьшить вес элементов конструкции крылатой ракеты. Для оценки возможного выигрыша в дальности мы предположим, что вес конструкции ракеты "Томагавк" можно уменьшить на одну треть.<sup>23</sup> В нашей аэродинамической модели это приведет к выигрышу по дальности на уровне моря в 100 километров (на 3,3 процента) при постоянном числе Маха  $M = 0,65$ , или к выигрышу в 330 километров (на 9,7 процента; в этом случае дальность полета по прямой линии достигнет 3730 километров) при оптимизации скорости. Таким образом, можно надеяться, что существенное уменьшение массы конструкции позволит добиться выигрыша по дальности примерно на 10 процентов, или даже больше, если изменения в конструкции позволят увеличить объем топливных баков.<sup>24</sup>

*Улучшенная аэродинамика.* Дальность может быть увеличена при улучшении аэродинамического качества конструкции; например, при использовании крыльев с лучшим отношением подъемной силы к сопротивлению, позволяющим уменьшить оптимальную скорость полета.<sup>25</sup> Один из новых предлагаемых вариантов крыла ракеты "Томагавк" позволит увеличить подъемную силу без увеличения размеров крыла, обеспечивая повышение дальности на 5 - 10 процентов.<sup>26</sup>

*Модернизация системы наведения.* Изменение принципов построения системы наведения может повысить оперативную дальность крылатых ракет "Томагавк" за счет уменьшения необходимости в дополнительных маневрах отклонения от прямолинейного курса для применения карт местности. Улучшение характеристик системы TERCOM или разработка новых типов датчиков для новых карт местности уменьшит необходимость в маневрах за счет расширения возможных типов местности, пригодных для построения карт. Применение спутниковой навигационной системы GPS может полностью устранить необходимость в отклонении от прямого курса для наведения,<sup>27</sup> тем не менее, из-за связи с потенциально уязвимыми спутниками маловероятно, что

от наведения по местности полностью откажутся, по крайней мере, в стратегических крылатых ракетах с ядерными боеголовками. США собираются установить приемники системы GPS на всех ракетах "Томагавк Блок III" с обычными боеголовками для атаки наземных целей; однако эти приемники будут не столько заменять существующие системы наведения, сколько дополнять их. ВМС США отмечало, что применение системы GPS на ракетах "Томагавк" с обычными боеголовками увеличит их дальность на 20 процентов.<sup>28</sup>

*Применение технологии защиты от обнаружения ("Стелс").* Использование этой технологии позволит увеличить оперативную дальность крылатых ракет по двум причинам. Во-первых, исчезнет необходимость в маневрах для обхода защищенных районов, и, во-вторых, большую часть полета крылатые ракеты смогут проводить на большой высоте. Пригодность любого подхода в реальных условиях будет определяться не столько эффективностью технологии защиты от обнаружения, сколько уровнем развития датчиков обнаружения и системы обороны противника.

С другой стороны, использование этой технологии приведет к фактическому уменьшению дальности полета по прямой из-за увеличения веса, ограничения объема топливных баков за счет ограничений по форме объекта для снижения радиолокационного отражения или установки толстых поглощающих покрытий, и ухудшения аэродинамических характеристик.

*Улучшение параметров топлива.* Поскольку дальность крылатой ракеты "Томагавк" ограничена объемом находящегося на ней топлива, более предпочтительно использовать топливо с высокой плотностью энергии.<sup>29</sup> В ракете "Томагавк" используется топливо RJ-4, известное также под названием TX-димер.<sup>30</sup> Плотность этого топлива на 13 процентов больше, а плотность энергии - на 12 процентов больше, чем у стандартного топлива реактивных самолетов ВМС США JP-5. Известно, что замена топлива JP-5 на топливо RJ-4 позволила увеличить дальность полета ракет "Томагавк" на 200 километров,<sup>31</sup> но более высокоэнергичные топлива, способные в принципе увеличить дальность полета на 645 километров, были отвергнуты из-за повышенной опасности при возможном проливе.<sup>32</sup> Известно достаточно большое количество топлив, которые обладают большей плотностью энергии, чем RJ-4 (например, RJ-5, известное также под названием Шеллдайн-X, у которого плотность энергии на 15 процентов больше, чем у RJ-4, и на 29 процентов бо-

льше, чем у JP-5).<sup>33</sup> Некоторый интерес вызывали также суспензии бора или углерода в высокоэнергичном топливе, у которых плотность энергии может быть существенно больше,<sup>34</sup> однако, в последние годы больший интерес для увеличения дальности полета крылатых ракет привлекает не улучшение параметров топлива, а повышение характеристик двигателей.<sup>35</sup>

*Модернизация двигателей.* По-видимому, самым важным резервом повышения дальности полета крылатых ракет является уменьшение удельного расхода топлива. Уже неоднократно проводились отдельные улучшения двигателей ракеты "Томагавк", и в настоящее время планируется установка новых двигателей F-107-WR-402 на ракетах с обычными боеголовками для поражения наземных целей, у которых удельный расход топлива будет меньше на 3 процента, а максимальная тяга больше на 19 процентов.<sup>36</sup>

Новые конструкции двигателей позволят осуществить гораздо большее уменьшение удельного расхода топлива. Новые конструкции турбовентиляторных двигателей с повышенной степенью обхода (равной 3,0) и с очень большой степенью обхода (равной 10) позволят уменьшить удельный расход топлива при числе Маха  $M = 0,65$  и полете на уровне моря соответственно до  $0,8$  и  $0,7 \text{ час}^{-1}$  (см. ссылку<sup>37</sup>). Исследование возможных конструкций турбовентиляторных двигателей на основе технологий, доступных к 2000 году, показало, что эффективность использования топлива может быть повышена на 38 процентов.<sup>38</sup>

В последние годы в качестве потенциального средства значительного повышения дальности полета крылатых ракет рассматриваются пропеллерно-турбовентиляторные двигатели.<sup>39</sup> Такие двигатели могут обладать вдвое меньшим удельным расходом топлива,<sup>40</sup> что позволит увеличить дальность полета крылатых ракет в два раза.

Очевидно, что модернизированные маленькие двигатели способны значительно увеличить дальность полета крылатых ракет. Насколько большим станет такое увеличение, зависит от успеха в решении технических проблем (например от создания складывающихся лопастей пропеллеров новых двигателей, способных уместиться в узком корпусе крылатой ракеты), совместимости этих решений с требованиями понижения радиолокационной отражательной способности, и оправданности дополнительных затрат на исследования и разработки с точки зрения повышения дальности полета крылатых ракет.

## ВЫВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ДАЛЬНОСТИ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ

В последние годы в США наблюдается значительный интерес к созданию крылатых ракет с обычными боеголовками с дальностью полета, вдвое превышающей дальность аналогичных ракет "Томагавк".<sup>41</sup> В результате проведенных выше обсуждений можно сделать вывод, что такая задача вполне реальна, хотя ее, может быть, будет трудно реализовать уже в следующем поколении крылатых ракет.

Хотя текущие интересы сосредоточены на крылатых ракетах с обычными боеголовками, вполне вероятно, что созданная для них технология найдет свое применение и для ракет с ядерными боеголовками. Увеличение современной дальности полета ядерных крылатых ракет на 50 процентов позволит достичь оперативной дальности в 4500 километров, а максимальная дальность полета будет еще больше.<sup>42</sup>

Такое увеличение дальности позволит значительно увеличить угрозу внезапной ядерной атаки крылатыми ракетами. Бомбардировщики смогут запускать их с очень больших расстояний без риска обнаружения. Подводные лодки смогут находиться на больших расстояниях от берегов США или СНГ при нанесении ударов в глубину их территории. Кроме того, увеличение дальности полета облегчит маневры для использования разрывов в противовоздушной обороне противника.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Это уравнение можно найти во многих учебниках, например, в книге R.S. Shervell, "Fundamentals of Flight", 2nd edition, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1989, глава 15.
2. Коэффициенты сопротивления отдельных компонентов могут быть рассчитаны при помощи эмпирически определенных факторов формы. Кроме того, следует учитывать многочисленные дополнительные причины сопротивления, связанные, например, с воздухозаборником двигателя, с интерференцией потоков около различных компонент, с кручением крыльев, с подъемной силой стабилизатора, с влиянием устройств управления. Большая часть дополнительных составляющих сопротивления сравнительно невелика и может быть включена в эмпирические выражения для сопротивления основ-

- ных компонентов. В ссылке 1 отмечается, что вклад дополнительных составляющих составляет от 6 до 10 процентов (далее мы будем использовать максимальную оценку; см. ссылку 1, стр. 184).
3. Помимо цитированной в ссылке 1 книги, рассматриваемые здесь вопросы обсуждаются в следующих учебниках: Leland M. Nicolai, "Fundamentals of Aircraft Design", San Jose, California, METS Inc., 1984; Daniel P. Raymer, "Aircraft Design: A Conceptual Approach", Washington, DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989; Jan Roskam, "Airplane Design, Part VI: Preliminary Calculation of Aerodynamic, Thrust and Power Characteristics", Ottawa, Kansas, Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1987; Egbert Torenbeek, "Synthesis of Subsonic Airplane Design", Boston, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1982.
  4. R.E. Craig, R.J. Reich, "Flight Test Aerodynamic Drag Characteristics Development and Assessment of Inflight Propulsion Analysis Methods for AGM-109 Cruise Missile", AIAA Paper No. 81-2423, AIAA/SETP/SFTE/SAE/ITEA/IEEE 1st Flight Testing Conference, Las Vegas, Nevada, 11-13 November 1981, табл. 3, рис. 23 и 24.
  5. Наша полярная сопротивляемость в целом соответствует и полярная сопротивляемости "типичной крылатой ракеты" ( $C_D = 0,03 + 0,07 C_L^2$ , см. статью Leland M. Nikolai, "A Perspective on the Requirements for Advanced Cruise Missiles", AIAA Paper No. 79-1817, AIAA Aircraft Systems and Technology Meeting, New York, 20 - 22 August 1979). Хотя в статье Nikolai не указывалось, что эта полярная сопротивляемости связана с какой-либо конкретной крылатой ракетой, на приведенном в этой статье рисунке изображена крылатая ракета "Томагавк". Полярная сопротивляемости в статье Nikolai соответствует числу Маха  $M = 0,7$ , а наша полярная - числу Маха  $M = 0,65$ , но в этом диапазоне скоростей зависимость полярной сопротивляемости от числа Маха очень слаба.
  6. Эти двигатели и история их создания описаны в статьях T.K. Wills, E.P. Wise, "Development of a New Class of Engine - The Small Turbofan", AIAA Paper No. 76-618, AIAA/SAE 12th Propulsion Conference, Palo Alto, California, 26 - 29 July 1976; L. Cruzen, "Cruise Missile Propulsion Versus Commercial Airliner Propulsion - Different Challenges Can Produce Similar Engine Cycles", AIAA Paper No. 83-1176, AIAA/SAE/ASME 19th Joint Propulsion Conference, Seattle, Washington, 27 - 29 June 1983.
- Двигатель крылатой ракеты "Томагавк" очень похож на двигатель системы ALCM-B, и отличается от него только конструктивными особенностями, связанными с различными условиями установки и разным расположением воздухозаборного устройства (см. ссылку 6, статью T.K. Wills, E.P. Wise, стр. 15).
7. См. ссылку 6, статью Cruzen, табл. 1.
  8. Kosta Tsipis, "Cruise Missiles", Scientific American, v. 236, No. 2, February 1977, pp. 20 - 29; John C. Toomay, "Technical Characteristics", in Richard K. Betts, ed., "Cruise Missiles: Technology, Strategy, Politics", Washington, DC, Brookings, 1981, pp. 31 - 52.
  9. Doug Richardson, "Cruise Missiles", Flight International, v. 112, No. 3577, October 1977, pp. 963 - 968.
  10. См. ссылку 6, статью L. Cruzen, рис. 3.
  11. См. ссылку 1, стр. 344 - 345, и ссылку 3, книгу Daniel P. Raymer, стр. 17 - 18. В двигателе F107-WR-101 степень обхода очень мала (равна 1,00, см. ссылку 6, статью L. Cruzen, табл. 2). В турбовентиляторном двигателе часть энергии турбореактивного двигателя используется для раскрутки вентилятора низкого давления. В этом случае большая масса воздуха ускоряется до меньшей скорости (по сравнению с обычным турбореактивным двигателем), что приводит к повышению эффективности. Степенью обхода называют отношение массы воздуха, направляемого в обход турбореактивного двигателя, к массе воздуха, проходящего через него. Чем больше степень обхода, тем, вообще говоря, больше эффективность использования топлива.
  12. При разработке конструкции "Томагавка" был ограничен объем топливных баков, что заставило изменить конструкцию воздухозаборного устройства (см. статью Richard DeMeis, "Designing the Cruise Missile: General Dynamics BGM-109 Tomahawk", Aerospace America, v. 23, No. 1, January 1985, pp. 110 - 114).
  13. Этот анализ был сделан Джерри Шиханом (работавшим в то время в программе исследований по обороне и контролю над вооружениями Массачусетского технологического института, а сейчас перешедшего в управление технических оценок конгресса США). В нем

- использовались программы для ЭВМ ONX и OFFX, разработанные Джеком Маттингли (см. руководство Jack D. Mattingly, "On-Design and Off-Design Aircraft Engine Cycle Analysis Computer Programs: ONX and OFFX User Guide", Washington, DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1990). Эти программы были разработаны для книги Jack D. Mattingly, William H. Heiser, Daniel D. Daley, "Aircraft Engine Design", Washington, DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1987.
14. Для того, чтобы программа анализа двигателя сходилась при всех значениях скорости и высоты, потребовалось использовать степень обхода, на сорок процентов большую действительной. Это приводит к переоценке зависимости удельного расхода топлива от скорости и к уменьшению дальности полета на несколько процентов (при больших скоростях).
  15. Джордж Н. Льюис, Теодор А. Постол, "Ядерные крылатые ракеты большой дальности и проблемы стабильности", Наука и всеобщая безопасность, т. 3, вып. 1, 1992, стр. 36.
  16. В этих расчетах полет разбивался на 1130 отрезков, на каждом из которых расходовался один фунт (0,454 кг) топлива.
  17. См. ссылку 1, главу 15, и и ссылку 3, книгу Daniel P. Raymer, главу 17.
  18. См. ссылку 1, стр. 278.
  19. При расчете оптимальной скорости  $V_{best}$  предполагалось, что скорость достаточно мала для того, чтобы не возникало сопротивление от сверхзвуковых волн. Это предположение выполняется при числах Маха, меньших 0,76. Если расчеты приводили к большим значениям оптимальной скорости, то проводились новые расчеты с учетом сверхзвукового волнового сопротивления.
  20. В ссылке 6, статье Т.К. Wills, Е.Р. Wise (стр. 14), приводились сведения о зависимости удельного расхода топлива от тяги двигателя крылатой ракеты "Томагавк". Там отмечалось, что уменьшение тяги до половины номинального уровня приводит к увеличению удельного расхода топлива на 10 процентов.
  21. Поначалу крылатые ракеты "Томагавк" на подводных лодках с обычными боеголовками были ограничены по весу. Для того, чтобы ракетный ускоритель смог выбросить крылатую ракету с обычных глубин запуска и разогнать ее до крейсерской скорости, приходилось сливать часть топлива. Впоследствии эта проблема была решена за счет применения более мощного ракетного ускорителя.
  22. Большая дальность крылатой ракеты АСМ в основном связана с увеличением запаса топлива за счет увеличения объема топливных баков по сравнению с крылатой ракетой АLCM-В.
  23. В ссылке 8, статье Kosta Tsipis (стр. 22), отмечается, что вес конструкции крылатой ракеты "Томагавк" равен 364 килограммам. Сокращение веса конструкции на одну треть приведет к снижению веса всей ракеты с 1185 до 1064 килограммов. Поскольку количество топлива на ракете "Томагавк" ограничивается не весом, а объемом, уменьшение веса конструкции не может привести к аналогичному увеличению запаса топлива. При оценках мы считали, что запас топлива не менялся.
  24. Обычная боеголовка ракеты "Томагавк Блок III" меньше по размерам и на 114 килограммов легче, что позволяет увеличить запас топлива. Вместе с уменьшением удельного расхода топлива на 3 процента за счет более эффективного двигателя это позволило увеличить дальность на 29 процентов, или с 1300 до 1670 километров, см. статью Stanley W. Kandebo, "US Fires Over 25 Percent of its Conventional Land Attack Tomahawks in First Week of War", Aviation Week and Space Technology, v. 134, No. 4, 28 January 1991, pp. 29 - 30.
  25. На начальной стадии в различных вариантах крылатой ракеты "Томагавк" предполагалось использовать два типа крыльев - один для повышенной маневренности, и другой - для повышенной дальности. В дальнейшем на всех ракетах "Томагавк" устанавливались крылья для повышенной маневренности, см. статью E.C. Rooney, R.F. Lauer, "Correlation of Full Scale Wind Tunnel and Flight Measured Aerodynamic Drag", AIAA Paper No. 77-996, AIAA/SAE 13th Joint Propulsion Conference, Orlando, Florida, 11 - 13 July 1977, p. 7.
  26. B.J. Kuchta, "Technology Advances in Cruise Missiles", AIAA Paper No. 81-0937, AIAA 1981 Annual Meeting and Technology Display - Frontiers of Achievement, Long Beach, California, 12 - 14 May 1981, pp. 4 - 6.
  27. Навигационная система с использованием сигналов от спутников GPS будет легче и меньше системы TERCOM.

28. Заявление директора проекта крылатых ракет контр-адмирала Уильяма С. Боуэса перед подкомиссией по обороне Комиссии Конгресса США по ассигнованиям 21 апреля 1988 года (см. стр. 11). Адмирал Боуэс заявил, что применение навигационной системы GPS позволит увеличить дальность на 20 процентов. Не исключено, что это увеличение дальности частично связано с ограничениями размеров наземных карт системы TERCOM. Однако, прилагаемая иллюстрация указывает на то, что в основном это увеличение может быть связано с возможностью отказа от маневров для прохождения над участками карт системы TERCOM. Это объясняет также различие между оперативной дальностью и дальностью полета по прямой.
29. C.L. Brackett, R.L. Trauth, "Small Turbine Engine Experience with High Density Fuels", AIAA Paper No. 83-1177, AIAA/SAE/ASME 19th Joint Propulsion Conference, Seattle, Washington, 27 - 29 June 1983; G.W. Burdette, H.R. Lander, J.R. McCoy, "High Energy Fuels for Cruise Missiles", AIAA Paper No. 78-267, AIAA 16th Aerospace Sciences Meeting, Huntsville, Alabama, 16 - 18 January 1978; "Fuel Research Spurred by Cruise Missiles", Aviation Week and Space Technology, v. 104, No. 4, 26 January 1976, pp. 111 - 113.
30. В крылатой ракете ALCM-B это топливо не используется из-за высокой температуры замерзания, высокой вязкости при низкой температуре и малой летучести, которые могут помешать его применению при низких температурах, которые часто сопровождают операции стратегической авиации. В крылатых ракетах ALCM-B применяется высокоэнергичное топливо JP-9, плотность и теплотворная способность которого близки к параметрам топлива RJ-4.
31. См. ссылку 12. Не совсем ясно, к какому варианту крылатых ракет "Томагавк" относится это замечание. Однако, поскольку увеличение дальности на 200 километров в случае ракет с обычными боеголовками для наземных целей соответствует увеличению на 18 процентов (с 1100 до 1300 километров), а для ракет с ядерными боеголовками - на 8,7 процента (с 2300 до 2500 километров), похоже, что оно относится к ракетам с ядерными боеголовками. Фактически применение RJ-4 приводит к увеличению удельного расхода топлива по сравнению с JP-5, поскольку его теплотворная способность на единицу массы меньше. Однако, топливо RJ-4 тяжелее, и обладает большим запасом энергии на единицу объема. Поскольку запасы топлива "Томагавк" ограничены не весом, а объемом, применение более тяжелого топлива эффективнее.
32. См. ссылку 12, стр. 113.
33. Не исключено, что это топливо упоминалось в предыдущей ссылке как слишком опасное, поскольку известно, что топливо RJ-5 рассматривалось для ракет "Томагавк", и что оно изготавливалось на основе инсектицида.
34. Теплотворная способность суспензии бора на 80 процентов выше, чем у топлива RJ-4 (однако, считают, что его ценность снижается из-за демаскирующего следа). Полагают также, что суспензия углерода может быть более подходящей, несмотря на то, что ее теплотворная способность всего на 27 процентов выше, чем у топлива RJ-4 (см. ссылку 5, стр. 3).
35. Bill Sweetman, Brian Wanstall, "Missile Propulsion Options Increase", Interavia, v. 44, No. 8, September 1989, pp. 912 - 916.
36. Этот новый двигатель используется в крылатых ракетах "Томагавк" с обычными боеголовками для поражения наземных целей, разработанных по программе "Блок III", начиная с 1991 года (см. Norman Friedman, "World Naval Weapon Systems 1991/1992", Annapolis, Maryland, US Naval Institute Press, 1991, p. 122).
37. W. Douglas Hoy, "Long-Range Subsonic Cruise Missile Propulsion Performance Design", AIAA Paper No. 86-1547, AIAA/SAE/ASME/ASEE 25th Joint Propulsion Conference, Monterey, California, 10 - 12 July 1989.
38. R. Pampreen, "Engine Studies for Future Subsonic Cruise Missiles", AIAA Paper No. 86-1547, AIAA/SAE/ASME/ASEE 22nd Joint Propulsion Conference, Huntsville, Alabama, 16 - 18 June 1986. В этой статье отмечается также, что в рекуперативном турбовентиляторном двигателе удельный расход топлива можно улучшить на 13 процентов, то этот выигрыш будет нейтрализован снижением объема топливных баков за счет большего размера двигателя.
39. Breck W. Henderson, "Propfan Engine May Be Suitable for Next Generation Cruise Missile", Aviation Week and Space Technology, v. 136, No. 1, 6 January 1992, pp. 62 - 63; ссылка 34, стр. 913. Пропеллерно-вентиляторный дви-

гатель представляет собой турбовентиляторный двигатель, у которого вентилятор размещен за пределами кожуха, что позволяет значительно увеличить степень обхода.

40. "Boeing Studies Long-Range Propfan-Powered ALCM", Aviation Week and Space Technology, v. 129, No. 8, 22 August 1988; ссылка 37, стр. 2; ссылка 35, стр. 913.
41. Однако, после ликвидации программы обычных крылатых ракет дальнего действия (Long-Range Conventional Cruise Missile Program) в США, по-видимому,

разработка подобных крылатых ракет прекращена.

42. Поскольку дальность таких ракет будет велика, они смогут проводить заметную часть полета на больших высотах, что позволит существенно увеличить дальность. Отметим также, что при больших дальностях полета можно будет развертывать крылатые ракеты наземного базирования, которые не подпадают под действие договора по РСД-РМД, если дальность их полета превышает 5500 километров.

## ЗАГОРИЗОНТНЫЕ РАДИОЛОКАТОРЫ И ОБНАРУЖЕНИЕ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ

*Джордж Н. Льюис, Теодор А. Постол*

В этой заметке рассматриваются возможности загоризонтной радиолокационной системы ОТН-В по обнаружению крылатых ракет и перспективы совершенствования систем такого класса.

Авторы заметки работают в Массачусетском технологическом институте по программе изучения обороны и контроля над вооружениями.

Загоризонтные радиолокаторы позволяют преодолеть ограничения прямой видимости обычных радиолокационных станций за счет отражения от ионосферных электронов перед отражением от целей, находящихся далеко за горизонтом. Определенная часть отразившейся от цели энергии радиолокатора может возвратиться к радиолокатору за счет аналогичного отражения от ионосферы.<sup>1</sup>

Эффективность отражения радиоволн от ионосферы зависит от частоты радиолокатора, угла падения волны на ионосферу (измеряемого от перпендикуляра к ионосферному слою) и концентрации электронов в ионосфере. Чем больше концентрация электронов или угол падения, тем выше максимальная частота отражающейся радиоволны. Частоты, на которых могут работать загоризонтные радиолокаторы, определяются природой ионосферы и находятся в диапазоне коротких волн от 3 до 30 МГц.

Несмотря на то, что ионосфера представляет собой очень сложную и динамичную среду, о ней можно сделать некоторые общие утверждения. Поскольку появление электронов в ионосфере обусловлено излучением Солнца, концентрация электронов в дневной ионосфере намного больше, чем в ночной. Поэтому максимальная рабочая частота загоризонтных радиолокаторов в дневное время обычно заметно выше, чем ночью. Кроме того, концентрация электронов, а вместе с ней и максимальная рабочая частота, увеличиваются в периоды повышенной солнечной активности (например, в максимуме 11-летнего солнечного цикла). Характеристики ионосферы меняются также от сезона к сезону и зависят от места расположения установки и направления наблюдений. Как правило, наблюдения в направлении полярных районов с повышенной ав-

роральной активностью невозможны.<sup>2</sup>

Другие важные характеристики загоризонтных радиолокаторов (такие, как уровни шума и потери при распространении) также сильно меняются от сезона к сезону, зависят от времени суток, уровня солнечной активности, расположения радиолокатора, направления наблюдений и других факторов. Ионосферное поглощение также может приводить к сильному ослаблению сигнала загоризонтных радиолокаторов. Как правило, поглощение в дневной ионосфере заметно сильнее поглощения в ночной атмосфере. В отличие от работающих на высоких частотах обычных радиолокаторов основными источниками шума загоризонтных радиолокаторов являются внешние источники, такие, как космические шумы, шумы искусственного происхождения и грозовые разряды. Шумы атмосферного происхождения усиливаются ночью и летом, и с уменьшением рабочей частоты.

Постоянно изменяющееся состояние ионосферы требует постоянного слежения за ее параметрами для того, чтобы подстроить рабочие характеристики радиолокатора к текущему состоянию ионосферы. Рабочую частоту радиолокатора приходится изменять не только для улучшения распространения вдоль определенного пути, но и для исключения сигналов от других радиопередатчиков.<sup>3</sup> Даже при постоянной подстройке параметров могут быть такие периоды возмущенного состояния атмосферы, при которых наблюдения на загоризонтных радиолокаторах будут вообще невозможными.<sup>4</sup>

При однократном отражении от ионосферы дальность действия загоризонтного радиолокатора может достигать 4 000 километров; обычно, однако, дальность ограничена величиной около 3 300 километров.

При многократном отражении можно достичь и большей дальности, однако этот метод непригоден для обнаружения интересующих нас целей с малым эффективным сечением отражения и дальше он обсуждаться не будет. Кроме того, у загоризонтных радиолокаторов имеется и нижний предел дальности действия, который может лежать в пределах от 500 до 1000 километров, или даже больше.<sup>5</sup>

Загоризонтные радиолокаторы работают на длинных волнах (от 10 до 60 метров) и поэтому для формирования узких пучков излучения следует применять антенны очень больших размеров. Кроме того, для работы на больших расстояниях следует использовать очень мощные радиопередатчики (с типичной мощностью от 0,1 до 1,0 мегаватта). Поэтому загоризонтные радиолокаторы представляют собой очень крупные сооружения, строительство которых довольно дорого.<sup>6</sup> Тем не менее, каждая из этих установок способна наблюдать за очень большим участком территории с типичной площадью от 4 до 5 миллионов квадратных километров в одном секторе наблюдения с угловой шириной около 60 градусов.<sup>7</sup> Ни один из радиолокаторов, за исключением космических, не способен обеспечить наблюдения за столь большой территорией.

В США в настоящее время ведутся две больших программы загоризонтных радиолокаторов - проект ВВС США OTH-B и проект ВМС США ROTHR с перемещаемыми радиолокаторами. Основное внимание мы будем уделять системе OTH-B как более мощной системе стратегического наблюдения за периметром США, в то время как система ВМС США в основном предназначена для решения тактических задач.<sup>9</sup> Система OTH-B стоимостью в 2,6 миллиарда долларов будет размещена в четырех районах на территории США - на восточном побережье в штате Мэн (с направлением на восток), на западном побережье на границе между штатами Калифорния и Орегон (с направлением на запад), на Аляске (с направлением на север) и в центральных штатах США (с направлением на юг). В каждом районе должно быть размещено по несколько радиолокаторов, каждый из которых должен перекрывать свой сектор шириной около 60 градусов; всего должно было быть построено 12 секторов.<sup>10</sup> В начале 1991 года восточный район был полностью закончен и вступил в строй; строительство западного сектора заканчивалось,<sup>11</sup> однако, в настоящее время становится очевидным, что строительство системы в целом вряд ли будет закончено (см. статью авторов в пре-

дыдущем выпуске журнала<sup>12</sup>).

Некоторые характеристики системы OTH-B приведены в табл. 1. В каждом секторе системы располагается приемная и передающая антенны, расстояние между которыми обычно составляет от 100 до 200 километров. Каждая из передающих антенн фактически состоит из шести отдельных антенн, каждая из которых работает в своем определенном диапазоне; общая длина комплекса составляет около 1110 метров. Эффективная мощность излучения (произведение мощности передатчика на коэффициент усиления антенны<sup>13</sup>) может достигать  $10^8$  Вт<sup>14</sup>. Ширина диаграммы направленности передающей антенны по азимуту составляет около 7,5 градусов. Длина приемных антенн восточного района системы составляет около 1520 метров, что позволяет сформировать четыре одновременно работающих пучка с угловой шириной около 2,75 градусов. Эти пучки позволяют проводить одновременные наблюдения участка длиной около 925 километров с угловой шириной в 7,5 градуса. Общий район наблюдений с угловой шириной в 60 градусов и глубиной от 925 до 3330 километров просматривается в результате последовательных наблюдений, для чего необходимо 24 отдельных сеанса.<sup>15</sup>

При освещении больших участков земной поверхности загоризонтным радиолокатором образуется сильный отраженный сигнал, который должен быть исключен при регистрации сигнала от цели. Так же, как и в других типах радиолокаторов, это делается при помощи анализа доплеровского спектра. Однако, поскольку при малых рабочих частотах и малых скоростях движения цели доплеровское смещение сигнала мало,<sup>16</sup> времена интегрирования сигнала в загоризонтных радиолокаторах должны быть значительно большими, чем у радиолокаторов прямой видимости.<sup>17</sup> Типичные времена интегрирования при слежении за самолетами лежат в интервале от 1 до 10 секунд.<sup>18</sup>

Длительные времена наблюдения желательны и для повышения сигнала к шуму. Однако, увеличение длительности наблюдений приводит к снижению скорости обзора. Так, на 24 сеанса наблюдения сектора загоризонтного радиолокатора потребуется 24 секунды при длительности сеанса в 1 секунду и 4 минуты при длительности сеанса в 10 секунд.

Мы сделаем простую оценку возможностей системы OTH-B по обнаружению крылатых ракет, используя уравнение загоризонтного радиолокатора. Эти расчеты позволят также прояснить различия между загоризонтными радиолокаторами и другими типами радиолокаторов. Такое уравнение

Таблица 1

Американская система ОTH-B (AN/FPS-118)<sup>a</sup>

Диапазон частот	5 - 28 МГц
Минимальная дальность	925 км
Максимальная дальность	3 330 км
Длина сегмента по дальности	925 км
Покрытие по азимуту	60°
Длина передающей антенны	1 106 м
Шесть отдельных антенн:	
Диапазон А	5,0 - 6,74 МГц
Диапазон В	6,74 - 9,09 МГц
Диапазон С	9,09 - 12,25 МГц
Диапазон D	12,25 - 16,5 МГц
Диапазон E	16,5 - 22,25 МГц
Диапазон F	22,25 - 28,0 МГц
Мощность передатчика	1 МВт
Эффективная мощность излучения	до 100 МВт
Ширина пучка передатчика по азимуту	7,5°
Модуляция	частотная или отсутствует
Частота модуляции	20; 30; 45 или 60 Гц
Ширина рабочей полосы	2,5; 5; 10; 50 или 100 Гц
Длина приемной антенны	1 518 м
Ширина пучка приемной антенны по азимуту	2,75° (4 пучка)

<sup>a</sup> Kenneth J. Stein, "Backscatter Radar Unit Enters Production Phase", Aviation Week and Space Technology, v. 177, No. 7, 16 August 1982, pp. 68 - 77; Chris Bulloch, "Beyond the Far Horizon: USAF's Ionosphere Bouncing Radar Finally Ready To Go", Interavia, v. 37, No. 12, December 1982, pp. 1302 - 1304; "New Radar Installations Promise 360-Degree Air Defense Perimeter", Aviation Week and Space Technology, v. 123, No. 23, 9 December 1985, pp. 55; Ramon Lopez, "The USA Builds its OTH-B Radar Barrier", Interavia, v. 42, No. 4, pp. 334 - 335; General Electric Company, "OTH-B ERS".

можно записать в следующем виде:

$$\frac{S}{N} = \frac{PG_t G_r t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N R^4 (kT) L_p L_s} \quad (1)$$

где P - средняя мощность,  $G_t$  - коэффициент усиления передающей антенны,  $G_r$  - коэффициент усиления приемной антенны, t - время наблюдения,  $\lambda$  - длина волны радиолокатора,  $\sigma$  - сечение рассеяния цели, R - расстояние до цели, kT - энергия теплового движения при комнатной температуре, N - шум окружающей среды (в единицах kT),  $L_p$  - потери при распространении сигнала,  $L_s$  - потери в системе.

Некоторые из этих параметров характеризуют систему самого радиолокатора, и поэтому они либо известны, либо могут быть оценены. Мы будем считать, что эффективная мощность излучения  $PG_t$  равна  $10^8$  Вт (или 80 дБ над уровнем в 1 Вт),<sup>19</sup> а коэффициент усиления приемной антенны

равен 30 дБ.<sup>20</sup> Считают, что без излишних затрат потери в системе загоризонтного радиолокатора не могут быть снижены ниже уровня в 10 дБ,<sup>21</sup> мы примем несколько более оптимистическую оценку в 7 дБ.

Можно считать, что время наблюдений (в пределах ионосферных ограничений) находится под контролем оператора системы. Мы будем считать, что при слежении за крупными целями (бомбардировщиками) время наблюдений будет равно 1 секунде, а при наблюдении целей с малым сечением отражения (крылатыми ракетами) составит 10 секунд. Большие времена наблюдений могут быть использованы при переходе к меньшим скоростям обзора (что, по-видимому, должно сопровождаться увеличением требований к вероятности обнаружения), или при наблюдениях районов, в которых была обнаружена цель.

Мы будем рассматривать два типа целей - крылатые ракеты типа "Томагавк" (см. ссылку<sup>22</sup>) и бомбардировщики; в обоих случаях мы будем считать, что цель дви-

жется непосредственно на радиолокатор. Эффективное сечение отражение для обеих типов целей зависит от частоты; графики значений сечения отражения, принятые в наших расчетах, можно найти на рис. 3 предыдущей работы тех же авторов.<sup>12,23</sup> Предполагалось также, что распространение сигнала по нескольким путям приводит к увеличению эффективного сечения на 6 дБ.<sup>24</sup>

Другие параметры уравнения радиолокатора (такие, как уровень шума, и потери при распространении) не находятся под прямым контролем оператора станции. При заданной дальности состояние ионосферы будет определять рабочую частоту. Потери при распространении<sup>25</sup> и уровень шума будут зависеть не только от состояния ионосферы, но и от рабочей частоты. Для каждого из этих параметров не только нельзя определить какого-либо определенного значения, но и нельзя задать определенной эмпирической функциональной зависимости, поскольку они будут определяться суточными и сезонными вариациями параметров ионосферы, состоянием солнечной активности, географическим расположением радиолокатора и направлением наблюдений.

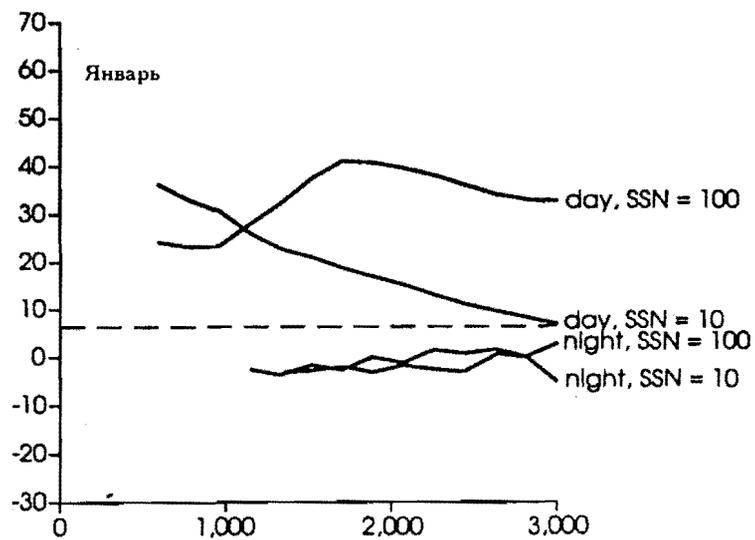
Хидрик<sup>26</sup> подготовил набор графиков для определения рабочей частоты, уровня шума и потерь при распространении для нескольких районов в дневное и ночное время, при низком и высоком уровнях солнечной активности, для каждого из четырех типичных месяцев (января, апреля, июля и октября). Эти графики использовались в нашей работе для определения величин  $\lambda$ ,  $N$  и  $R^4 L_p$ .

Результаты подстановки полученных величин в уравнение радиолокатора показаны на рис. 1 и 2 (см. также рис. 5 из предыдущей работы авторов<sup>12</sup>) в виде зависимости отношения сигнала к шуму от дальности при слежении за крылатой ракетой типа "Томагавк" для четырех времен года, в дневное и ночное время, для низкого и высокого уровня солнечной активности (индекс числа солнечных пятен ЧСП = 10 и ЧСП = 100). Пунктирной линией отмечен минимально необходимый уровень отношения сигнала к шуму (6 дБ), при котором еще можно проводить слежение по траектории полета.<sup>27</sup> Эти данные показывают, что в дневное время система ОТН-В, вообще говоря, способна обнаружить крылатые ракеты, но в ночное время эта возможность теряется, а в некоторых ситуациях величина сигнала становится меньше необходимой на два порядка

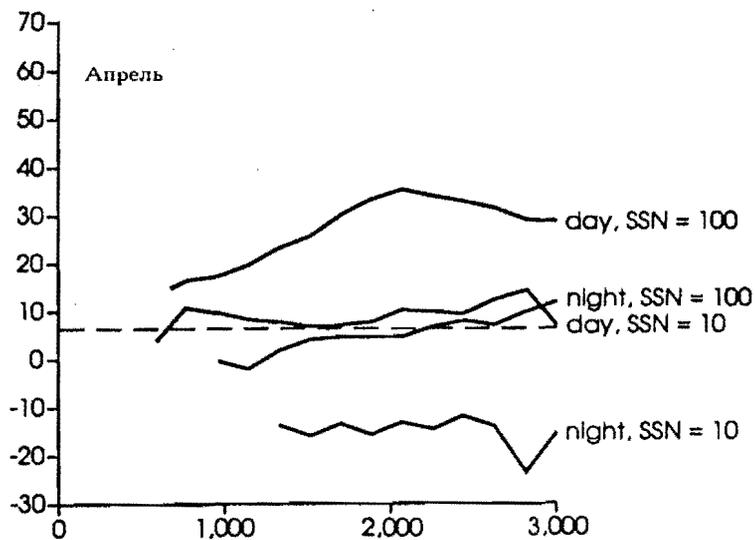
величины.<sup>28</sup> Ухудшение характеристик в ночное время связано с необходимостью перехода на более низкие частоты.<sup>29</sup> На низких частотах заметно увеличивается уровень шума, и, кроме того, понижается эффективное сечение рассеяния крылатой ракеты.

Мы можем сделать также простую оценку требований к уровню подавления фонового отраженного сигнала при слежении за крылатыми ракетами. Для загоризонтных радиолокаторов проблема подавления фонового отраженного сигнала более серьезна, чем для обычных радиолокаторов, поскольку возможности подавления определяются не столько характеристиками аппаратуры, сколько ионосферными эффектами. Максимальная ширина полосы системы ОТН-В равна 100 кГц, что соответствует разрешению по дальности в 1,5 километра.<sup>30</sup> Мы провели расчеты отношения сигнала к фоновому отраженному излучению при ширине диаграммы направленности приемной антенны в 2,5 градуса и обнаружении целей (крылатых ракет и бомбардировщиков) над поверхностью моря (в этом случае эффективная плотность сечения рассеяния равна -18 дБ<sup>31</sup>) для октября месяца. Результаты этих расчетов показаны на рис. 3. Учитывая, что для надежной регистрации сигнал должен быть на 4 дБ сильнее шума, мы можем видеть, что для надежного обнаружения крылатых ракет необходимо подавить фоновое отраженное излучение на 55 - 85 дБ, а при наблюдении бомбардировщиков - на 30 - 50 дБ. Последняя величина представляется вполне реальной. Однако, возможность выполнения требований в случае наблюдения крылатых ракет (в особенности, в ночное время) остается неясной (опубликованных данных о способностях подавления фонового отраженного излучения загоризонтными радиолокаторами в открытой печати нет).<sup>32</sup>

Попытки обнаружения крылатых ракет на загоризонтных радиолокаторах могут столкнуться с серьезной проблемой ложной тревоги. Такие ложные сигналы могут возникнуть от распространения по нескольким путям (при этом цель может появиться в нескольких интервалах дальности), от рассеяния на метеорных следах, или от рассеяния на неоднородностях атмосферы. Это представляет особую проблему для систем раннего предупреждения большой дальности, поскольку в этом случае проверка сигналов ложной тревоги будет особенно трудной.<sup>33</sup>



Дальность, км



Дальность, км

Рисунок 1

Отношение сигнала к шуму системы ОТН-В в зимнее и весеннее время. На рисунке приводятся кривые для дневного и ночного времени, а также для высокого (SSN = 100) и низкого (SSN = 10) уровней солнечной активности.

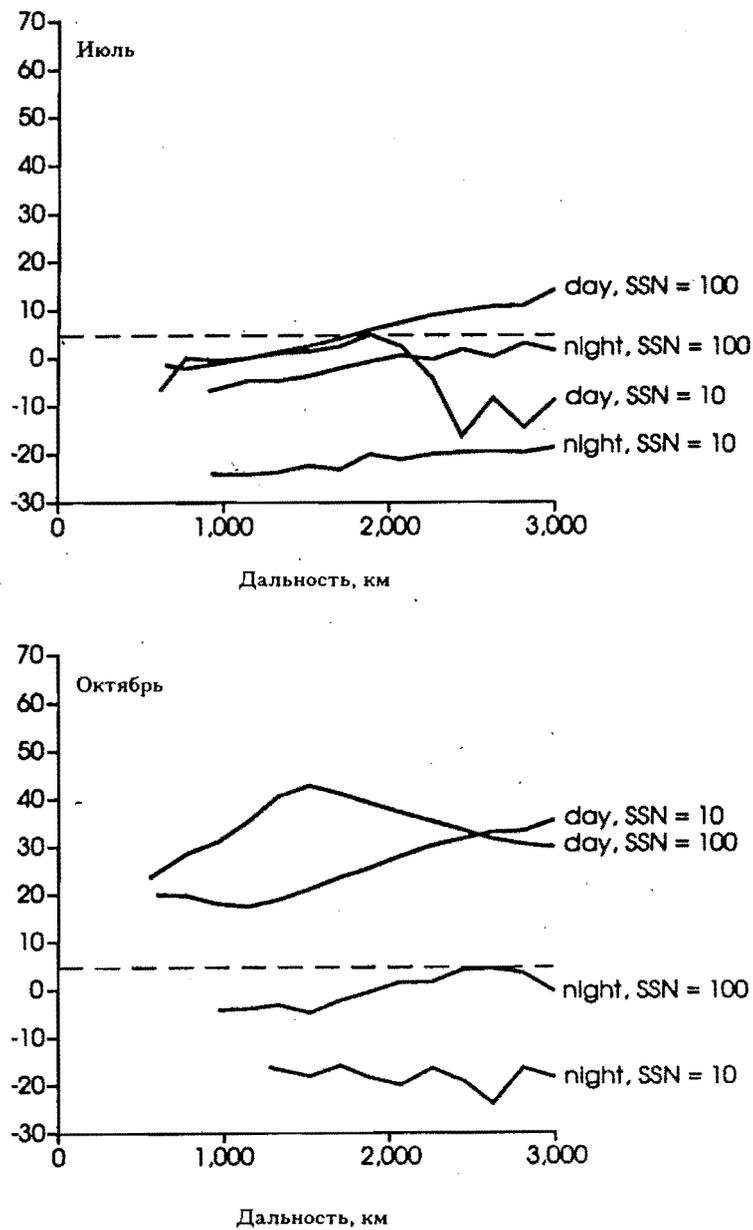


Рисунок 2

Отношение сигнала к шуму системы ОТН-В в летнее и осеннее время.  
 -На рисунке приводятся кривые для дневного и ночного времени, а также для высокого (SSN = 100) и низкого (SSN = 10) уровней солнечной активности.

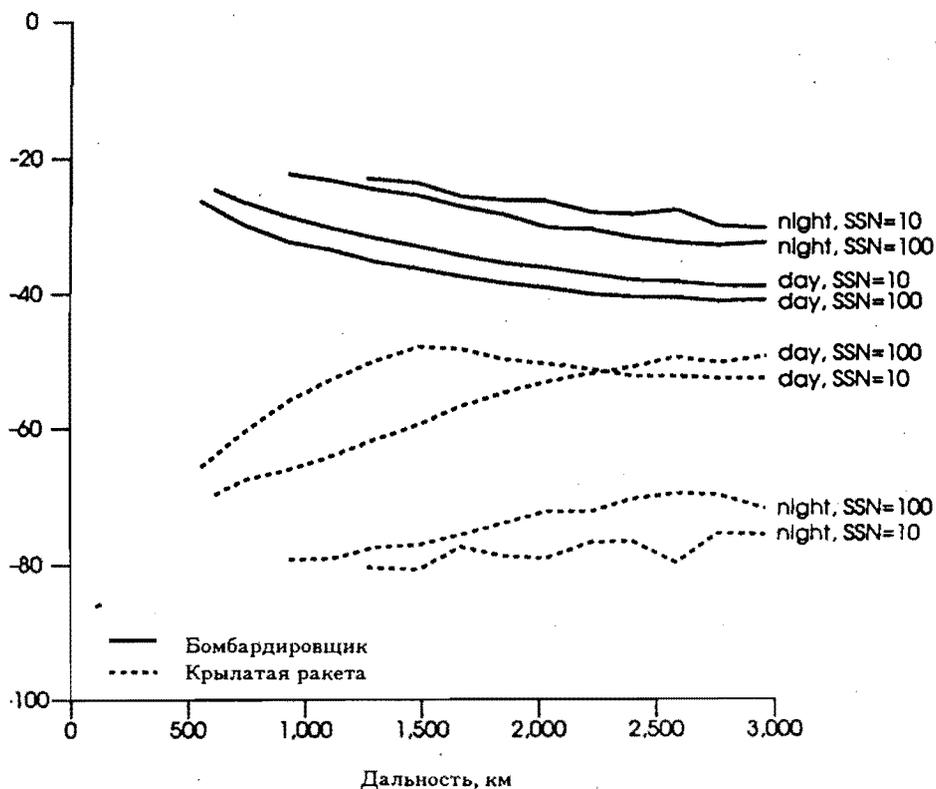


Рисунок 3

Отношение сигнала к фоновому отраженному излучению для системы ОТН-В при слежении за крылатыми ракетами и бомбардировщиками в осеннее время.

#### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ОТН-В И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗАГОРИЗОНТНЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ

После завершения строительства система ОТН-В вместе с Северной системой предупреждения обеспечит полный обзор подходов к воздушному пространству Северной Америки для целей с размерами бомбардировщиков. Тем не менее, эти системы не смогут обеспечить надежного обнаружения маломасштабной атаки крылатыми ракетами. Приведенные выше оценки показывают, что при благоприятных обстоятельствах система ОТН-В может обнаружить крылатые ракеты, но она не позволит сделать этого в течение длительных периодов неблагоприятных условий, в особенности ночью, или при низкой солнечной активности. Эти условия предсказуемы, и поэтому внезапную атаку крылатыми ракетами можно запланировать заранее.

Тем не менее, загоризонтные радиолокаторы представляют собой сравнительно дешевое средство слежения за большими территориями, и завершение строительства системы ОТН-В может быть оправдано хотя бы с точки зрения создания основной системы слежения за самолетами. Кроме того, законченная система ОТН-В позволит обнаружить атаки крылатыми ракетами в дневное время, сможет обнаружить бомбардировщики с крылатыми ракетами даже в ночное время, и способна внести достаточную неопределенность для того, чтобы даже ночью противник не мог быть полностью уверен в скрытности маломасштабной атаки крылатыми ракетами. Кроме того, система может быть усовершенствована для более надежного обнаружения крылатых ракет. Однако, представляется, что будет очень трудно и дорого усовершенствовать эту систему таким образом, чтобы она обеспечила непрерывное и надежное обнаружение

крылатых ракет, потому что в некоторых ситуациях характеристики системы могут ухудшаться на два-три порядка величины.

Решение не заканчивать систему ОТН-В и частично или полностью выключить уже построенные станции практически оставляет большую часть периметра территории США без наблюдения подлета низколетящих крылатых ракет. Несмотря на то, что при необходимости выключенные станции системы ОТН-В можно ввести в строй примерно за шесть месяцев,<sup>34</sup> попытки начала повторной эксплуатации во время кризисной ситуации способны привести к большому количеству ложных тревог. Планируемая система ВМС США ROTHR с 9 секторами в какой-то мере способна заменить систему ОТН-В, в зависимости от того, сколько секторов будет построено, и как они будут расположены.<sup>35</sup> Тем не менее, возможности обнаружения крылатых ракет системой ROTHR будут, по-видимому, еще хуже, чем у системы ОТН-В. Кроме того, система ROTHR не приспособлена для включения в общую систему противовоздушной и противокосмической обороны NORAD.<sup>36</sup>

Возможным решением проблемы обнаружения крылатых ракет может стать новый модернизированный и более мощный загоризонтный радиолокатор. Этот подход еще более предпочтителен по той причине, что в диапазоне низких частот, в котором работают загоризонтные радиолокаторы, очень трудно применить меры по снижению эффективного сечения отражения крылатых ракет.<sup>37</sup> Поэтому конструкторы загоризонтных радиолокаторов будут иметь дело с целью постоянного, хотя и малого, сечения, в отличие от конструкторов высокочастотных радиолокаторов, у которых сечения целей постоянно уменьшаются. Тем не менее, следует учитывать, что для обеспечения надежного обнаружения крылатых ракет может потребоваться улучшение отношения сигнала к шуму на два-три порядка величины и соответствующее улучшение возможностей подавления фонового отраженного сигнала.

Улучшение характеристик загоризонтных радиолокаторов может быть достигнуто несколькими способами. Может быть увеличена средняя мощность передатчика, длина приемной антенны и число одновременно действующих пучков. Значительное, хотя и дорогостоящее, улучшение может быть получено при переходе к двумерным решеткам приемных антенн.<sup>38</sup> Дальнейшие исследования могут принести лучшее понимание свойств ионосферы и работы загоризонтного радиолокатора, которое также должно сыграть свою роль в улучшении ха-

рактеристик системы.

Не исключено, что взятые вместе усовершенствования позволят создать систему загоризонтного радиолокатора, способную надежно обнаружить небольшое число крылатых ракет. Однако, для подтверждения этой возможности следует провести большое количество исследований и полевых испытаний. Такая система, скорее всего, будет стоить намного дороже, чем система ОТН-В стоимостью в 2,6 миллиарда долларов, и ее предельные возможности до сих пор остаются непонятными.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Полезные сведения о загоризонтных радарах можно найти в следующей литературе: J.M. Headrick, "HF Over-the-Horizon Radar", in Merrill I. Skolnik, ed., "Radar Handbook", 2nd edition, New York, McGraw-Hill, 1990; Gary R. Nelson, George H. Millman, "HF Sky-Wave Backscatter Radar for Over-the-Horizon Detection", IEE Radar Conference 1982, London, Institution of Electrical Engineers, 1982, pp. 97 - 100; W. Fenster, "The Application, Design and Performance of Over-the-Horizon Radars", IEE International Conference Radar-77, London, Institution of Electrical Engineers, 1977, pp. 36 - 40; James M. Headrick, Merrill I. Skolnik, "Over-the-Horizon Radar in the HF Band", Proceedings of the IEEE, v. 62, No. 6, June 1974, pp. 664 - 673; E.D.R. Shearman, "Over-the-Horizon Radar", in M.J.B. Scanlon, ed., "Modern Radar Techniques", New York, Macmillan, 1987. Обсуждение этого вопроса можно найти также в общих руководствах по радиолокации, например, в главе 14 книги Merrill I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", 2nd edition, New York, McGraw-Hill, 1980.
2. В областях повышенной магнитной активности вытянутые по магнитным силовым линиям трубки повышенной ионизации находятся в быстром движении. Поэтому спектр отражений от этих трубок довольно широк и для выделения сигналов от движущихся мишеней на фоне аврорального отраженного сигнала доплеровские методы неприменимы. См. ссылку 1, статью E.D.R. Shearman, стр. 224 - 225.
3. Диапазон коротких радиоволн сильно заполнен гражданскими радиостанциями. Это не только создает дополнительные помехи загоризонтным радиолокаторам. Сами радиолокаторы должны работать таким образом, чтобы не

- создавать дополнительных помех другим станциям. Поэтому они должны непрерывно следить за ситуацией в эфире и выбирать свободные участки диапазона. Этому помогают узкие рабочие диапазоны, но они приводят к плохому разрешению по дальности. Поэтому при работе загоризонтных радиолокаторов следует делать выбор между снижающим уровень шума узким рабочим диапазоном и ухудшением разрешения по дальности и сопровождающим его увеличением поверхностного отраженного сигнала.
4. В статье W. Fenster (стр. 38, ссылка 1) отмечается, что параметры загоризонтных радиолокаторов ухудшаются примерно в пяти процентах от общего времени наблюдений из-за ухудшения условий распространения, напротив, в статье J.M. Headrick утверждается, что длительность таких периодов составляет не более нескольких часов в год.
  5. Этот минимальный радиус действия обусловлен тем, что у реальных радиолокаторов есть минимальная рабочая частота, и с тем, что они могут работать только при довольно малых углах наклона.
  6. Стоимость всех 12 секторов программы OTH-B составляет 2,6 миллиарда долларов, или около 215 миллионов долларов на сектор (включая расходы на исследования и разработки).
  7. Например, было подсчитано, что строящиеся и предлагающиеся к постройке в США загоризонтные радиолокаторы (12 секторов OTH-B и 9 секторов ROTHR) смогут наблюдать около 20 процентов земной поверхности, см. David Hughes, "Navy Installs ROTHR Systems in Alaska to Protect Battle Groups in Pacific", *Aviation Week and Space Technology*, v. 131, No. 22, 27 November 1989, pp. 69 - 80.
  8. US General Accounting Office, "Over-the-Horizon Radar: Better Justification Needed for DoD Systems' Expansion", GAO/NSIAD-91-61, Washington, DC, US General Accounting Office, 1991.
  9. Описание системы ВМС США можно найти в ссылке 7. Мощность передатчиков системы OTH-B примерно в пять раз больше, чем у системы ROTHR, но у последней системы лучшие характеристики отсеивания шумового отражения из-за более узкого пучка диаграммы направленности приемников (у нее 16 пучков шириной  $0,5^\circ$ , а у системы OTH-B - четыре пучка шириной  $2,75^\circ$ ).
  10. Три сектора на восточном побережье, три сектора на западном, два на Аляске, и от двух до четырех в центральных штатах.
  11. По крайней мере один из секторов западного побережья использовался для демонстрационного слежения за целями, см. George Leopold, "Over-the-Horizon Radar Successfully Track Targets", *Defence News*, v. 5, No. 2, 8 January 1990, p. 15.
  12. Джордж Н. Льюис, Теодор А. Постол, "Ядерные крылатые ракеты большой дальности и проблемы стабильности", *Наука и всеобщая безопасность*, т. 3, вып. 1, 1992, стр. 36.
  13. Усиление передачи связано со способностью антенны фокусировать излучение в заданном направлении. Коэффициент усиления определяется отношением максимального потока излучения антенны к потоку изотропно излучающей антенны при той же мощности передатчика.
  14. Chris Bulloch, "Beyond the Far Horizon: USAF's Ionosphere Bouncing Radar Finally Set to Go", *Interavia*, v. 37, No. 12, December 1982, pp. 1302 - 1304. Эти значения соответствуют экспериментальному радиолокатору ERS с антенной меньших размеров (690 метров) по сравнению с антенной OTH-B (1110 метров). Однако, это увеличение размеров антенны прежде всего связано с добавлением двух сегментов для изменения рабочего диапазона с 6,7 - 22,3 МГц у ERS до 5 - 28 МГц у OTH-B.
  15. То есть, восемь шагов по азимуту в каждом из трех секторов дальности шириной по 930 километров позволяют перекрыть всю полосу от 930 до 3330 километров.
  16. Например, сигнал от крылатой ракеты со скоростью 900 километров в час сместится по частоте всего лишь на 25 Гц при рабочей частоте в 15 мегагерц.
  17. Это связано с тем, что разрешение доплеровского метода приблизительно обратнопропорционально длительности наблюдений.
  18. Верхний предел времени интегрирования определяется состоянием ионосферы, и может колебаться от 25 - 50 секунд до примерно 200 секунд, см. Joseph W. Mareska, James R. Barnum, "Theoretical Limitations of the Sea on the Detection of Low Doppler Targets by Over-the-Horizon Radar", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. AP-30, No. 5, September 1982, pp. 837 - 845.
  19. Поскольку общая мощность системы

- ОТН-В составляет около 1 МВт (12 передатчиков по 90 - 100 кВт каждый), а эффективная мощность (с учетом коэффициента усиления антенны) - около 100 МВт, то коэффициент усиления типичной антенны ОТН-В должен составлять около 20 дБ.
20. Как правило, приемная антенна системы ОТН-В обладает большим коэффициентом усиления по сравнению с передающей антенной. Длина приемной антенны ОТН-В (1,52 километра), тем не менее, заметно меньше длины антенны WARF ОТН-В в Калифорнии (2,55 километра), коэффициент усиления которой равен 30 дБ, см. Taylor W. Washborn, Lawrence E. Sweeney, James R. Barnum, Walter B. Zavoli, "Development of HF Skywave Radar for Remote Sensing Applications", in "Special Topics in HF Propagation", AGARD Conference Proceedings No. 263, Neuilly-sur-Seine, France, Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1979. Таким образом, предположение о коэффициенте усиления приемной антенны в 30 дБ является слишком оптимистичным.
  21. См. ссылку 1, статью Nelson, Millman, стр. 98.
  22. По-видимому, КРМБ SS-N-21 и КРВБ AS-15 несколько длиннее, чем крылатая ракета "Томагавк", но их длина не превышает 7 метров. Для рассматриваемой здесь ориентации эффективное сечение отражения этих крылатых ракет будет примерно в 2,5 раза (на 4 дБ) выше, чем у ракеты "Томагавк".
  23. В отличие от большинства самолетов, у которых размеры крыльев и фюзеляжа сравнимы, у крылатых ракет большой дальности крылья очень малы. Поэтому эффективное сечение отражения крылатой ракеты в диапазоне системы ОТН сильно зависит от поляризации, причем максимальное значение сечения достигается тогда, когда электрическое поле волны становится параллельным оси фюзеляжа. В рассматриваемом здесь случае предполагается, что крылатая ракета движется прямо на радиолокатор, и что направление распространения волны составляет 30 градусов с горизонталью. Поэтому сечение отражения волны с вертикальной поляризацией будет больше, чем у волны с горизонтальной поляризацией. Тем не менее, при распространении в ионосфере плоскость поляризации волны вращается, и контролировать ее направление на мишени невозможно. Поэтому сечение отражения крылатой ракеты будет колебаться в пределах от минимального (для горизонтальной поляризации) до максимального (для вертикальной поляризации) значений.
  24. См. ссылку 1, статью J.M. Headrick, стр. 24.26. Этот фактор в расчетах для рис. 3 не учитывался.
  25. Потери при распространении сигнала для загоризонтных радиолокаторов гораздо более серьезны, чем для радиолокаторов прямого видения (по крайней мере для тех, которые работают на частотах ниже 10 ГГц). Они обслаиваются несколькими причинами, включающими поглощение, ослабление и дефокусировку в атмосфере. Кроме того, большая часть антенн загоризонтных радиолокаторов линейно поляризована, и рассогласование поляризации из вращения плоскости поляризации в ионосфере также может привести к дополнительным потерям.
  26. См. ссылку 1, статью J.M. Headrick, стр. 24.28 - 24.35. Автор статьи отмечает, что "Анализ, проведенный для радиолокатора на среднеатлантическом побережье США, послужит хорошим приближением для любого радиолокатора в средних магнитных широтах".
  27. Это может служить грубой оценкой нижнего предела, основанной на утверждении из одного учебника по радиолокации: "...радиолокатор становится неэффективным, когда  $P_d < 0,5$  и  $P_{fa} > 0,01$ . Такая ситуация возникает при отношении сигнала к шуму, равного 6." См. работу J.C. Toomy, "Radar Principles for Non-Specialists", 2nd edition, New York, Van Nostrand Reinhold, 1989, p. 112. Величина  $P_d$  представляет собой вероятность обнаружения, а величина  $P_{fa}$  - вероятность ложной тревоги.
  28. Тем не менее, надо отметить, что неопределенности в оценке рабочих параметров загоризонтных радиолокаторов очень велики. В частности, наши оценки проводились для конкретного места расположения и для определенной ориентации. В статье J.M. Headrick в ссылке 1 (см. стр. 24.26) приведены диаграммы для штата Мэриленд и восточного направления. Там отмечается, однако, что эти оценки могут служить хорошим приближением для оценки параметров загоризонтных радиолокаторов в средних магнитных широтах, но в то же время разумный выбор мест расположения может привести к существенному улучшению характеристик системы. ВВС США заявляли, что выбор мест в центральном

- районе США производился из условия получения наилучших характеристик для работы в диапазоне выше 15 МГц (US House of Representatives, Department of Defense Appropriations for 1989, part 6, p. 562).
29. На слушаниях в Конгрессе США отмечалось, что система ОTH-B имеет хорошие возможности для обнаружения крылатых ракет, если она работает на частотах выше 15 МГц (US House of Representatives, Department of Defense Appropriations for 1989, part 6, p. 562). Тем не менее, на диаграммах из статьи J.M. Headrick в ссылке 1 (см. стр. 24.28 - 24.35) показано, что ночная рабочая частота, как правило, меньше 15 МГц, но иногда может достигать этих значений вблизи максимального радиуса действия радиолокатора.
  30. Для определения размеров освещаемого пятна разрешение радиолокатора следует умножить на секанс угла наклона луча к земной поверхности. В этом расчете этим эффектом пренебрегалось, поскольку возможная ошибка не превышала 0,6 дБ. Расчеты проводились по данным из статьи J.M. Headrick в ссылке 1 (см. стр. 24.28 - 24.35).
  31. Эффективное сечение отражения от поверхности можно характеризовать безразмерной величиной плотности отражения. Например, если эта величина равна типичному значению для поверхности океана в -18 дБ, то каждый метр освещенной земной поверхности будет действовать как отражатель с эффективным сечением  $0,016 \text{ м}^2$ .
  32. В статье J.M. Headrick из ссылки 1 (стр. 24.36 и 24.37) отмечается, что уровень диффузно отраженного сигнала на частотах далеко от пика максимального отражения может быть на 80 - 90 дБ ниже, чем в самом пике, что показывает возможность обнаружения по крайней мере при определенных условиях.
  33. В эксперименте 1978 года радиолокатор WARF OTH следил за авиалайнером на Тихом океане в течение 24 часов. Было обнаружено 50 из 59 полетов, несмотря на то, что мощность этого радиолокатора в двадцать раз меньше, чем у радиолокатора ОTH-B. Однако, было четыре случая ложной тревоги, обусловленные четырьмя различными причинами (распространением сигнала по нескольким путям, отказом аппаратуры, отражением от метеорных следов, а четвертая причина осталась неизвестной). См. W.B. Zavoli, T.W. Washburn, D. Westover, "Twenty-Four Hour Continuous Aircraft Surveillance at WARF, April 1978", SRI International, Technical Report 42, October 1978.
  34. "USAT Weighs Plan for Limited OTH-B Operations in Maine", Aviation Week and Space Technology, v. 134, No. 17, 29 April 1991, p. 69.
  35. До сих пор были объявлены четыре места расположения радиолокаторов системы ROTHR - в штате Вирджиния (в направлении на Карибское море), на Аляске, на острове Гуам и в Великобритании.
  36. См. ссылку 8, стр. 23.
  37. Основные методы уменьшения эффективного сечения отражения связаны с применением поглощающих радионизлучение материалов и выбором такой формы самолета, которая позволяла бы отражать излучение радиолокатора в боковом направлении. Оба метода становятся малоэффективными в рабочем диапазоне системы ОTH (15 - 60 метров), в котором длина волны становится большей размеров наблюдаемых объектов. Тем не менее, в этом диапазоне частот могут оказаться эффективными методы активного подавления отраженного сигнала.
  38. Такая двумерная решетка позволит использовать множественные узкие пучки диаграммы направленности приемной антенны. Это позволит улучшить как отношение сигнала к шуму за счет увеличения коэффициента усиления антенны, так и отношение сигнала к отраженной компоненте за счет уменьшения площади земной поверхности, охватываемой лучом приемной антенны.