

Методы долгосрочного прогноза ледовитости неарктических морей

Как известно, прогнозы ледовых условий на морях позволяют планировать сроки начала и окончания навигации, решать проблемы рыболовного промысла и эксплуатации гидротехнических сооружений.

В настоящее время Гидрометцентром России составляются оперативные прогнозы ледовых условий на Белом, Балтийском, Черном, Азовском, Каспийском, Охотском, Японском и Беринговом морях. Они основываются на использовании физико-статистических методов. Подобные прогнозы по заблаговременности подразделяются на сверхдолгосрочные или сезонные (на шесть месяцев и более), долгосрочные (до полутора месяцев), среднесрочные (от пяти до восьми суток) и краткосрочные (от одних до трех суток). В данной обзорной статье рассматриваются только методики долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов характеристик ледового режима морей.

Одним из главных показателей ледового режима моря является ледовитость, которая определяется, как процент покрытия льдом акватории моря. От данных по ледовитости с помощью эмпирических зависимостей можно перейти к данным о толщине, сплоченности льда, удаленности кромки от берегов и другим важным ледовым характеристикам. В настоящее время накопилось достаточно наблюдений за изменчивостью ледовых условий в открытом море, что дает возможность выявить в них ряд особенностей.

Одна из первых работ в этой области была выполнена Г. Клейтоном [5]. За период 1791-1906 гг. им были проанализированы ряды месяцев в году, в течение которых побережье Исландии покрыто льдом, и ряды чисел Вольфа, характеризующих солнечную активность. Основываясь на анализе годовых и пятилетних скользящих средних, он показал, что среднее число месяцев, когда побережье Исландии покрыто льдом, составляет 2,4 при максимуме и 2,0 при минимуме солнечных пятен, помимо этого, он установил, что ледовитость выше при максимуме солнечных пятен, чем при минимуме. Тем самым Клейтон подтверждает существование отрицательной корреляции между температурой поверхности земли и числом солнечных пятен. Им же было высказано предположение о том, что имеется положительная корреляция между числом айсбергов в Атлантическом океане, появляющихся за год, и циклом солнечных пятен.

Л.Мекинг [19] в 1918 г. высказывал идею о том, что количество льда в море подвержено периодическим колебаниям, вызванным вариациями в параметрах солнечной активности. При этом, период максимальной солнечной активности соответствует уменьшению количества льда и наоборот, период минимальной активности- увеличению.

В период с пятидесятых по семидесятые годы XX века были выполнены исследования, рассматривающие связь солнечной активности с ледовитостью и другими гидрометеорологическими параметрами моря [10]. Между тем, как справедливо отметил Н.А. Белинский [2], подобная взаимосвязь обнаруживается весьма слабо и не позволяет предсказывать даже общий характер ледовой обстановки на море. Изменчивость ледовых условий следует, прежде всего, рассматривать в непосредственной связи с изменениями характера и интенсивности атмосферной циркуляции.

Основы долгосрочных прогнозов ледовых условий заложены в трудах В.Ю. Визе, Н.Н. Зубова, В.В. Шулейкина. Ими были установлены главные факторы, формирующие ледовый режим морей [1], и разработаны методы прогноза положения кромки льда в море.

В.Ю. Визе установил наличие связи между ледовитостью арктических морей и параметрами солнечной активности, но она оказалась непостоянной (связь была обратной с 1896 по 1912 г. и прямой с 1913 по 1935 г., затем снова обратной). Визе объяснял это тем, что колебания солнечной активности влияют на интенсивность атмосферной циркуляции, а не на ее тип.

Н.Н. Зубов показал, что ледовитость Баренцева моря зависит от аномалий температуры воды, обусловленных влиянием атлантических вод. Количественные оценки влияния атлантических вод на арктические моря были получены В.В. Шулейкиным путем расчета теплового баланса Карского моря. В дальнейшем, исследования этих ученых были расширены и углублены на основе накопленных материалов наблюдений на морях Арктического бассейна и на неарктических морях в работах Д.Б. Карелина, М.М. Сомова, Н.А. Белинского, А.И. Каракаша, Я.А. Тютнева и др. Все эти работы были направлены на установление эмпирических зависимостей между ледовыми явлениями и факторами, их обуславливающими.

Продолжением работ В.Ю. Визе занимался И.М. Соскин. Он пришел к выводу, что солнечное воздействие на гидросферу осуществляется не непосредственно, а через атмосферную циркуляцию. Вместе с тем, он отметил, что связи, основанные на учете солнечной активности, не могут быть использованы для прогноза, т.к. они ухудшаются при увеличении рядов наблюдений [1].

Расчеты теплового баланса Карского моря, выполненные В.В.Шулейкиным, показали степень взаимодействия между морем и атмосферой и роль отдельных составляющих теплового баланса в предсказании температуры воды и состояния льда.

Согласно классификации методов ледовых прогнозов С.И. Кан [7] в первую группу входят работы, в которых прогнозы даются на основе предшествующих метеорологических и гидрологических ледовых условий. Примером, типичным для первой группы, служат весенние ледовые прогнозы, охватывающие круг явлений, связанных с разрушением и исчезновением льда в море, время которых в значительной степени определяется количеством образовавшегося за зиму льда. После того, как лед в море появился, в течение нескольких месяцев, пока происходит увеличение его мощности до максимальных величин, а затем и разрушение, большое значение приобретает и “ледовая инерция”. Это дает возможность получить зависимость между максимальной за зиму толщиной льда и сроками его разрушения.

Во вторую группу входят методы, в основе которых лежит использование начальных данных и заданных метеорологических условий. Сроки появления льда и замерзания определяются теплозапасом вод, что в свою очередь обусловлено состоянием процессов в атмосфере за время, в течение которого складываются условия, приводящие к льдообразованию, включая адвекцию теплых и холодных вод океаническими течениями.

Н.А. Белинский и М.Г. Глаголева [3] вслед за Н.А. Багровым предложили использовать новую форму учета атмосферной циркуляции в морских прогнозах: аналитическое представление гидрометеорологических полей в виде математических рядов П.Л. Чебышева, а позднее - разложение по естественным составляющим. Разложение полей в ряды дало большие возможности для анализа основных воздушных потоков, в связи с чем появилась возможность разработки методов предсказания некоторых элементов ледового режима морей.

А.Н. Крындин [12] показал, что лучшей характеристикой атмосферной циркуляции для долгосрочного прогноза ледовитости и положения кромки льда на Черном и Азовском морях является поле температуры воздуха нижнего пяти-километрового слоя атмосферы.

В ряде работ, выполненных в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ), а затем в Государственном океанографическом институте (ГОИН) [13] привлекались данные не только по приземным картам, но и для более высоких слоев атмосферы (карты АТ500 и ОТ 500/1000). При построении прогностических зависимостей для предсказания, например, сроков появления льда на Черном и Азовском морях, были отобраны частные коэффициенты разложения поля АТ 500, которые характеризуют положение и интенсивность высотного гребня и высотной ложбины.

С.И. Кан и Я.А. Тютнев исследовали влияние температурного поля в северной части Атлантического океана на ледовитость Азовского и Каспийского морей [1]. Они получили достаточно тесную связь между средней ледовитостью в январе-феврале и суммой аномалий

температур воды в августе, по данным кораблей погоды А, В, С, D, E, М. Эта связь, по мнению С.И. Кан и Я.А. Тютнева, имеет следующий вид:

$$S_1 = -13,5 \sum \Delta t_w + 54,$$

$$S_2 = -2,5 \sum \Delta t_w + 78,$$

где S_1 и S_2 – средняя ледовитость на Азовском и Каспийском морях, $\sum \Delta t_w$ – сумма аномалий температуры воды в августе. Таким образом, методика позволяет по распределению температуры воды в океане в августе судить о ледовитости моря в начале и середине зимы.

Аналогичный вид, имеет и полученная ими же зависимость для прогноза ледовитости Охотского моря:

$$S_{XII} = -6,64A_{00} - 20,2A_{10} - 35,62A_{20} + 21,58,$$

где S_{XII} - ледовитость Охотского моря в декабре (в %); A_{00} , A_{10} , A_{20} - коэффициенты разложения поля температуры воды в августе по полиномам Чебышева. Общий коэффициент корреляции $R = 0,74$, обеспеченность невыхода ошибок за пределы $0,67\sigma$ равна 88%.

К третьей группе прогнозов С.И. Кан [7] относит прогнозы, основывающиеся на выявлении зависимостей между гидрометеорологическими явлениями и солнечной активностью- сверхдолгосрочные ледовые прогнозы. Основной физической предпосылкой одного из таких методов послужила возможность использовать существующие в природе циклические колебания. Проведенный в работе [9] анализ корреляционных функций и спектральных плотностей показал, что большинство гидрометеорологических элементов подвержены циклическим колебаниям, равным полугоду и году, в то время как другие циклы имеют меньшее значение. Это послужило основанием для принятия в качестве срока заблаговременности прогнозов промежутков времени, равный году. Были выявлены связи между полями атмосферного давления и температурой воздуха со сдвигом в один год. Общий вид уравнения:

$$\sum t_a = f(A_p),$$

где $\sum t_a$ - сумма средних месячных температур воздуха по районам или пунктам в n -году; A_p - алгебраическая сумма 16 коэффициентов разложения поля давления по полиномам Чебышева в году $n-1$. Составляющие теплового баланса в холодное время года подвержены большим колебаниям, чем в теплое, и поэтому, главным образом, зимние условия определяют состояние моря в последующие месяцы. Это послужило основанием для использования поля давления не за весь год, а лишь за зимние месяцы.

Располагая прогнозом температуры воздуха на следующую зиму, на его основе переходят к расчетам ледовых характеристик, что дает возможность на протяжении зимы уточнять и локализовать прогнозы. Существует и другое направление: разработка в соответствии с теми же исходными положениями прогноза кромки льда в море, ледовитости и др. Такого рода зависимости были получены для прогноза ледовитости на Азовском, Каспийском, Балтийском и Охотском морях.

А.И. Каракаш [8] при установлении зависимостей для прогноза ледовитости неарктических морей использовал следующие данные:

- среднюю месячную ледовитость моря;
- коэффициенты разложения приземного барического поля за январь-март;
- среднюю месячную температуру воздуха над морем в январе-феврале;
- температуру 200 метрового слоя воды на меридиане Кольского полуострова в феврале (как показатель теплового состояния атлантических вод).

Уравнения были составлены для предвычисления средней месячной ледовитости и средней за зиму ледовитости по всем неарктическим морям. Основные выводы его работы таковы.

1. Данные наблюдений за ледовитостью неарктических морей можно рассматривать как случайную функцию распределения, подчиняющуюся закону нормального распределения.
2. По данным о средней ледовитости за зиму можно определить ледовитость моря в любом месяце с вероятностью знака аномалии 0,80-0,90.
3. Взаимосвязи ледовитости моря с предшествующей атмосферной циркуляцией, температурой воздуха и температурой воды дают возможность предвычислять ледовитость обеспеченностью более 80%.
4. Наличие связи между ледовитостью моря, температурой воздуха и отдельными характеристиками льда (толщиной, протяженностью трассы и т.д.) позволяет оценивать последние по предсказанным двум первым элементам.

Иной подход к изучению ледовых условий и их прогноза представлен в работе С.Г. Николаева [15]. Он рассматривал ледовитость Балтийского моря в момент максимального развития ледяного покрова, как интегральную характеристику погодообразующих процессов над северной Европой за осенний и зимний сезоны. В свою очередь на формирование барических полей, согласно [18], оказывают влияние деформационные силы, возникающие вследствие изменения скорости вращения Земли и колебаний оси ее вращения. Такое представление о деформационном механизме космическо-земных связей послужило рабочей гипотезой при разработке методов долгосрочного прогнозирования ледовых условий на Балтийском море. В результате, эмпирическим путем было установлено, что максимальное развитие ледового покрова на Балтийском море определяется положением мгновенного полюса вращения Земли относительно центральных меридианов секторов геомагнитного поля в моменты реперных осенне-зимних геомагнитных возмущений. В качестве характеристик, непосредственно коррелирующих с максимальной ледовитостью Балтийского моря, предлагалось вычислять обобщенные гелиогеофизические индексы, которые представляют собой угловые расстояния между меридианом возмущенного полюса и ближайшим центральным меридианом одного из 45-градусных секторов геомагнитного поля. Метод позволяет составлять ледовые прогнозы с заблаговременностью от 3 до 12 мес.

В работе [6] были выявлены 14-месячные периоды колебаний градиентов давления и соответствующих аномалий воздушных переносов для арктических морей. Это обстоятельство по мнению авторов должно вызывать 6-7-летние колебания ледовитости; при этом ее аномалии должны смещаться с востока на запад. Был проведен расчет взаимных корреляционных функций между ледовитостью некоторых морей, а также между ледовитостью и координатами полюса Земли, которые подтвердили замеченные закономерности.

Аналогичные исследования по сверхдолгосрочным прогнозам ледовитости были выполнены И.В.Максимовым [14]. Он считал, что режим океана подвержен солнечно-обусловленным, нутационным и лунно-солнечным долгопериодическим приливным вариациям [14]. На основе наблюдений над ледовитостью Баренцева моря за 1900-1960 гг. им были выявлены следующие квазигармонические колебания:

$$S_{\text{сум}} = S_0 + R_3 + P_5 + S_8 + S_{14} + S_{80}.$$

Здесь, S_0 - среднее значение площади льда в море за время с 1900 по 1960 г.; R_3 - трехлетняя вариация ледовитости, по мнению Н.П. Смирнова, она объясняется малыми вариационными изменениями скорости вращения Земли; P_5 - нутационная вариация ледовитости; S_8 и S_{14} - колебания ледовитости, обусловленные так называемым одиннадцатилетним солнечным циклом, при изучении этого цикла в периодограмме наблюдались раздвоения этого цикла на две крайние частоты; S_{80} - колебания ледовитости, вызванные, предположительно, вековым циклом солнечной активности. Из этих

соображений, И.В.Максимову удалось получить уравнение для прогноза ледовитости, имеющее вид [14]:

$$S_{\text{сум}} = 38,0 + 1,8\sin(109,1^\circ t + 103^\circ) + 2,7\sin(72,0^\circ t + 299^\circ) + \\ + 6,5\sin(44,0^\circ t + 6^\circ) + 7,8\sin(25,7^\circ t + 57^\circ) + 12,0\sin(4,5^\circ t + 63^\circ).$$

Амплитуды даны в процентах отношения площади льда ко всей площади моря, фаза- в градусах.

Большинство из выполненных на настоящее время работ по ледовым прогнозам носят узко региональный характер. Так, в монографии В.В.Бетина и Ю.В. Преображенского [4] по Балтийскому морю приводятся исторические сведения и результаты натурных наблюдений над ледовыми и метеорологическими условиями зим в Европе за период, который охватывает в общей сложности свыше двух тысяч лет, некоторые результаты исследований ледовитости бассейнов Балтийского и Северного морей и ее многолетней изменчивости. Авторы [4] указывают, что ледовитость Балтийского моря должна отражать изменения климатических условий района. На основе наиболее длительного (122-летнего) ряда наблюдений был построен ряд скользящих 3-, 5-, 11- и 33-летних средних величин ледовитости моря и получены колебания различной продолжительности. Показано, что на периоды 5-6 или 8-9 лет накладываются колебания с более длительными периодами (от 15 до 110 лет). Выявленные периоды вековых колебаний ледовитости Балтийского моря совпадают с периодами доминирующих гармоник, рассчитанных Л.С. Бергом, во временных рядах хода уровня Каспийского моря. Характерно, что почти аналогичные колебания выявил Х. Симойки [20] в многолетнем ряде хода температуры воздуха за зимний период в Хельсинки. Наличие такой периодичности позволило ему сделать попытку рассчитать с помощью гармонического анализа многолетний ход зимних температур в Хельсинки. Тесная связь между многолетним ходом ледовитости Балтийского моря и температурой зим в Хельсинки, а также наличие единой периодичности колебаний этих элементов дает возможность предвычислять этим же путем ход ледовитости Балтийского моря на два десятилетия вперед.

В [10] была установлена связь между положением кромки льда на Каспийском море и циклональной и антициклональной деятельностью в октябре-ноябре, представленной коэффициентами полиномов Чебышева. Приведены сведения о характеристиках ледового режима Каспийского моря по 30-летнему ряду данных, распределение ледового покрова по месяцам с указанием климатических условий, оказывающих на него непосредственное воздействие. Анализируются колебания ледовитости по месяцам холодного периода года и по годам, выявлена связь ледовитости с температурным режимом атмосферы.

Методика прогноза протяженности ледовой трассы, продолжительности ледового периода и толщины льда для некоторых портов Азовского моря была предложена в статье Я.А. Тютнева [16]. Получены расчетные формулы для прогноза сроков развития толщины льда 10-15 см и 20-25 см. Так, для сроков наступления толщины льда 10 см, уравнения имеют следующий вид:

$$D = 42 - 0,16 \sum_{\text{XI}}^{\text{I}} t, \\ D = 67 - 0,15 \sum_{\text{XI}}^{\text{XII}} t,$$

где $\sum_{\text{XI}}^{\text{XII}} t$ - сумма градусо-дней мороза за ноябрь- декабрь, $\sum_{\text{XI}}^{\text{I}} t$ - то же за ноябрь-январь.

Температура воздуха бралась по данным, полученным на гидрометеостанции Таганрога. Аналогичные зависимости были получены и для прогноза сроков образования льда толщиной в 20-25 см. В этой же работе Я.А. Тютневым было выведено и уравнение для прогноза протяженности ледовой трассы в милях:

$$L = 0,51 \sum t - 3,$$

где L - протяженность ледовой трассы в милях, $\sum t$ - сумма градусо-дней мороза, подсчитанная на гидрометеостанции Таганрога.

В обзорной статье В.С. Красюка, М.Д. Андреева и др. [11], указывается, что наличие связи между средней месячной ледовитостью и средним месячным положением кромки льда позволяет давать прогнозы положения и границ льда: чем больше ледовитость, тем мористее располагается кромка льда; будущее положение средней месячной кромки льда определяется по ледовитости и положению кромки льда в предыдущую зимнюю навигацию с учетом многолетнего положения кромки и предстоящей ледовитости моря.

Средняя оправдываемость долгосрочных (до полутора месяцев) прогнозов ледовитости неарктических морей за 1987-1989 гг. составила 84% (по климатической норме этот же период 68%). Прогноз толщины льда оправдался на 87% (по климатической норме 65%) [11].

В справочном пособии [17] рассмотрены процессы образования, роста и таяния морского льда, его фазовый состав, кристаллографическое строение и физические свойства. Представлены основные сведения о статистических и численных методах оценки региональных ледовых условий различной заблаговременности. Дается описание методов сбора, обработки и анализа данных наблюдений, полученных активными и пассивными дистанционными средствами, установленными на летательных аппаратах и на подводных объектах. Приводятся краткие сведения о физических основах применения этих методов, исторические сведения о разработке ледовых прогнозов и наблюдении за ледовыми условиями. Показываются задачи, организация и структура ледово-информационных систем, вопросы, связанные с формированием банка данных по морскому льду.

Выводы

1. Основы долгосрочного прогноза ледовых условий на неарктических морях были заложены в двадцатых–тридцатых годах прошлого столетия. Уже тогда стало очевидно, что геофизические процессы, если и влияют на ледовый покров то через сложную опосредованную связь, включающую в себя изменения параметров атмосферной циркуляции.

2. Наибольшее развитие методы долгосрочных ледовых прогнозов получили в пятидесятых–семидесятых годах двадцатого века, когда накопился достаточно большой архив данных, как по ледовым характеристикам, так и по параметрам атмосферы и моря.

3. Большинство методов долгосрочных ледовых прогнозов имеют физико-статистическую основу. В них учитываются характеристики циркуляции атмосферы, поля температуры воздуха и температуры поверхности океана, разложенные по собственным векторам. Также разработаны методы, учитывающие влияние на ледовые условия геофизических процессов, таких как солнечная активность, скорость вращения Земли и др. Однако опыт использования таких методов в оперативной практике невелик.

Список литературы

- 1 Абузьяров З.К., Шамраев Ю.И. Морские гидрологические информации и прогнозы.- 1974.- Л.: Гидрометеоиздат.
- 2 Белинский Н.А. Использование некоторых особенностей атмосферных процессов для долгосрочных прогнозов.- 1957.- Л.: Гидрометеоиздат.
- 3 Белинский Н.А., Глаголева М.Г. Метод расчета температуры воды в верхнем слое моря в теплую часть года //Метеорология и Гидрология.- 1960.- № 7.- С. 14-21,

4. Бетин В.В., Преображенский Ю.В. Суровость зим в Европе и ледовитость Балтики .- 1962.- Л.: Гидрометеиздат.- С. 94-107.
5. Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода, климат.- 1981.- Л.: Гидрометеиздат.- С.109.
6. Гудкович З.М., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. “Полюсный прилив” в атмосфере высоких широт и колебания ледовитости арктических морей.- Докл. АН СССР.- 1970.- №4.- С. 954-957.
7. Кан С.И. Современное состояние методов ледовых прогнозов на морях СССР.- “Океанология”.- 1967.- Т.7.- Вып. 5.- С. 786-792.
8. Каракаш А.И. Ледовые прогнозы на неарктических морях СССР // Тр. Центр. Ин- та прогнозов.- 1969.- Вып.51.- С. 101-119.
9. Каракаш А.И., Ющак Т.Ф. О долгосрочных ледовых прогнозах.- Тр. Центр. Ин- та прогнозов // 1966.- Вып.156.- С. 89-98.
10. Каракаш Е.С. Об изменчивости ледовитости и положения кромки льда на Северном Каспии // Тр.ГОИН.- 1960.- Вып. 54.- С. 5-21.
11. Красюк В.С., Андреев М.Д., Пономарев В.Н., Прохорова Т.М. Прогнозы ледовых условий на неарктических морях СНГ // Тр. Центр. Ин-та прогнозов.- 1992.- Вып.324.- С. 119-123.
12. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на Черном и Азовском морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН.- 1964.- Вып. 76.- С. 7-79.
13. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения и положения кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. Гос. океанографич. ин-та.- 1964.- Вып.71.- С. 5-82.
14. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана.- 1970.- Л.: Гидрометеиздат.- С. 447.
15. Николаев С.Г. Опыт учета астрономических и геофизических данных при долгосрочном прогнозировании ледовых условий на Балтийском море // Тр. ЦИП.- 1981.- Вып.241.- С. 99-105.
16. Тютнев Я.А. Расчет и прогноз ледовых явлений в некоторых портах Азовского и Черного морей // Тр. ЦИП.- 1966.- Вып. 156.- С. 99-104.
17. Фролов И.Е., Гаврило В.П. Морской лед: сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий. (справочное пособие).- Спб.: Гидрометеиздат.- 1997.- С. 1-2.
18. Шулейкин В.В. Физика моря.-М.: Наука.- 1968.- С 1083.
19. Meking L. Nordamerika, Nordeuropa und der Golfstrom in der elfjarigen Klimaperiode A.n.n.d. Hydrographil usw.- 1918.