

УДК: 551.467.312

К вопросу составления долгосрочного прогноза колебаний площади льда в Охотском море

*В. М. Пищальник, В. В. Иванов, П. А. Трусков*¹

Предложен прогноз ледовитости Охотского моря (аккумулятивной площади ледяного покрова) на ближайшие 20 лет. Используются два варианта исходных данных. Первый вариант – это запись межгодовых вариаций ледовитости с 1936 по 2010 гг., второй вариант с 1957 по 2010 гг. Для каждого из вариантов рассмотрены данные трех типов, первый тип – площади, накопленные за январь-февраль, второй – за январь, февраль, март, апрель, третий вариант – площади, накопленные с декабря по май. Прогноз опирается на выделение когерентных периодических вариаций, которое проведено методом последовательных спектров. При применении метода к вариациям ледовитости обнаружен значительный вклад некогерентной компоненты. Чтобы обойти эту трудность, предложено отдельно прогнозировать высокочастотную и низкочастотную компоненты. Сравнение прогнозов по наборам данных различной длительности показывает, что увеличение длительности приводит к заметному уменьшению оценки отрицательного тренда вариаций площади ледяного покрова, который обычно рассматривается как эффект глобального потепления. Сравнение периодов и фаз когерентных колебаний ледяного покрова и солнечной активности показывает, что вариации тренда аккумулятивной площади ледяного покрова связаны с вариациями солнечной активности, важнейшими из которых являются вариации с периодами 11 лет и 2,3 года.

Ключевые слова: когерентная компонента, метод последовательных спектров, площадь ледяного покрова, прогноз

Forecast variations of the area Okhotsk Sea ice cover by successive spectra.

Vladimir M. Pischalnik, Sakhalin State University; Vladimir V. Ivanov, Tsunami lab. of IMGIG FEB RAS; Pavel A. Truskov, Sakhalin Energy Investment Co. Ltd.

The forecast of the area of the ice fields at the Okhotsk Sea is regarded. The two variants of data have been used. The first variant is the records of the accumulative area of ice for period from 1936 to 2010, the second variant is the same variations for period from 1957 to 2010 years. For each variant the three type of data are regarded. The first one is the accumulative area for January and February, the second one is the area for January, February, March and April, the third one is the area for period from December to May. The forecast is based on the separation of the coherent components of the variations. The separation have been done by the method of sequential

¹ *Пищальник Владимир Михайлович* – профессор кафедры геомониторинга и геоинформационного картографирования СахГУ, доктор технических наук; *Иванов Владимир Васильевич* – ведущий научный сотрудник Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, доктор физико-математических наук; *Трусков Павел Анатольевич* – начальник отдела согласований Сахалин Энерджи Инвестмент Компании Лтд, доктор технических наук.

spectra. The comparison of the forecast by row with different duration show that the increasing of duration decreases the value of negative trend of forecasting area. The comparison of the periods and phases of the coherent variations of the ice area and Sun activity show that the area variations related with variations of Sun activity and the main action is connected with variations on periods 11 years and 2–3 years.

Keywords: Coherent component, Sequential Spectra, Accumulative ice area, forecast.

Введение

Условия технологического обслуживания нефтедобывающих платформ предполагают круглогодичную работу судов-снабженцев как на судоходных трассах, так и непосредственно в местах добычи нефтяных углеводородов. Планируемый период освоения ресурсов нефти и газа на шельфе о. Сахалин по оценкам экспертов составляет 40–50 лет. В зимний период времени, помимо повышенной штормовой активности, серьезным препятствием для плановой работы судов в Охотском море является наличие ледяного покрова. Средняя продолжительность ледового сезона у восточного побережья Сахалина составляет 190–200 дней [6]. В этой связи для нефтедобывающих компаний вопросы мониторинга состояния и прогнозирования ледяного покрова на ближайшую и отдаленную перспективу приобретают особое значение [14]. Ледовые прогнозы являются также неотъемлемым элементом при планировании и добыче морских биологических ресурсов. И, наконец, эти вопросы на фоне глобальных климатических изменений имеют и чисто научный аспект.

Исследование формирования ледяного покрова является составной частью общего исследования изменений климата Земли, которое в последние годы наиболее заметно проявляется в условиях высоких широт. В этих исследованиях важно в трендах гидрометеорологических параметров выделять вариации, связанные с антропогенной деятельностью, которые происходят на фоне естественных вариаций разнообразных геофизических процессов [16]. Последнее обстоятельство часто приводит к неоднозначности толкования причин изменений климата и, как следствие, неопределенности в принятии решений.

В предлагаемой работе, на основе 75-летних наблюдений за изменениями площади ледяного покрова в Охотском море с помощью метода последовательных спектров (который позволяет корректно фильтровать шумы, выделять присущие данному явлению когерентные колебания и восстанавливать очищенные от шумов их тренды [1]), предпринята попытка прогноза вариаций ледовитости на ближайшие 20 лет.

Исходные материалы и методы их обработки

Исходными данными в настоящей работе являются результаты расчетов ежемесячной площади ледяного покрова по наблюдениям с 1929 по 2010 гг. По способу производства наблюдений за ледяным покровом исследуемый период условно можно подразделить на три этапа. Первый этап –

с 1929 по конец 1950-х гг.; второй – с конца 1950-х по 1992 гг. и третий – с 1993 г. по настоящее время.

На первом этапе вычисление площади ледяного покрова, оценка состояния льда внутри массива и определение местоположения его кромок производились по нерегулярным (попутным) судовым донесениям и эпизодическим данным ледовых авиационных разведок. Наиболее освещены наблюдениями были акватории судоходных трасс в проливе Лаперуза и на подходах к порту Магадан, а также районы традиционного зимнего промысла гидробионтов. По сведениям А. Н. Крындина [4] за период с 1929 по 1960 гг. для Охотского моря составлено 360 карт фактической ледовой обстановки, по которым была вычислена площадь ледяного покрова. С помощью графиков годового хода разрозненные по времени наблюдения приводились к одной дате на середину месяца и вычислялись вполне сравнимые среднемесячные значения ледовитости. В 55 случаях (~15 %) исходной информации для составления ежемесячных ледовых карт было не достаточно. Наиболее значительные пропуски относятся к периоду начала наблюдений за состоянием ледяного покрова в море. Так, например, в 1931 г. цитируемому выше автору [4] за весь сезон не удалось составить ни одной полной ледовой карты. По одной карте было составлено в 1930, 1933 и 1934 гг. По этой причине за начало ряда был принят 1935 г. с полным комплектом ледовых карт. В период с 1935 по 1952 гг. редкие пробелы в рядах данных были восстановлены на основе среднемесячных значений, рассчитанных для всего ряда наблюдений, с учетом выявленных закономерностей изменения площади ледяного покрова от количества аккумулированного тепла в период, предшествующий ледовому сезону, и количеству холода в текущий ледовый сезон. Для этой цели по значениям среднесуточной температуры воздуха после перехода ее через 0 °С как в сторону повышения, так и в сторону понижения температуры, были вычислены суммы градусодней тепла и мороза, осредненные по пяти метеорологическим станциям, расположенным вдоль северо-западного побережья Охотского моря [10, 7].

Второй этап – регулярные авиационные наблюдения за состоянием ледяного покрова с обязательным определением местоположения кромок льда – для Охотского моря продолжался с 1957 по 1992 гг. Ледовые авиационные разведки проводились планомерно один раз в декаду. Они выполнялись с ноября по июнь и равномерно покрывали галсами всю заполненную дрейфующим льдом акваторию моря. При этом для решения специальных задач (обеспечение безопасности судоходства, промысла морского зверя и т. д.) в этот период не исключалось проведение дополнительных наблюдений на ограниченных акваториях. Все составленные карты ледовой обстановки, включая данные прибрежных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, усреднялись для данной декады по всему морю. Таким образом, минимальная дискретность карт ледовой обстановки на втором этапе исследований составляла одну декаду. Определенные на их основе характеристики

ледяного покрова эквидистантны, что позволило получить надежные статистические характеристики [5, 6].

Основу наблюдений *третьего этапа* составляют данные дистанционного зондирования Земли. Сканеры первого поколения с искусственных спутников Земли серий «NOAA», «МЕТЕОР», «КОСМОС» и т. п., начиная с 1970 г. позволяли ежедневно получать черно-белое изображение ледяного покрова дальневосточных морей как в видимом диапазоне, так и в режиме радиолокации. С 2002 г. для Дальнего Востока основным инструментом мониторинга земной поверхности служит 36-канальный сканер MODIS с разрешением 250–1000 м, установленный на спутниках «TERRA» и «AQUA». Из-за сильного влияния облачности на точность определения границ массива льда дешифрирование спутниковых снимков в видимом диапазоне для получения расчетных характеристик ледяного покрова в рамках всего моря на регулярной основе не производилось. Для определения внешних границ ледяного покрова и границ зон различной сплоченности внутри массива льда японские исследователи с 1970 г. используют методику обработки данных радиолокационного зондирования, основанную на принципе распознавания образов. Полученные результаты в виде карт-схем (с выделенными штриховкой для черно-белых или цветовой гаммой зонами различной сплоченности льда) с частотой от двух раз в неделю до двух раз в месяц выставляются Национальными центрами обработки гидрометеорологической информации Японии (Japan Meteorological Agency) и США (National/Naval Ice Center) в Интернете [8, 9]. Таким образом, минимальная дискретность карт-схем ледовой обстановки на третьем этапе исследований составляет 3–4 суток.

Оценка точности результатов расчетов площади ледяного покрова всегда вызывала острые дискуссии у специалистов и должна являться результатом самостоятельного исследования, которое планируется выполнить в ближайшее время. В рамках настоящей работы приведем лишь некоторые цифры, которые могут быть полезны при качественной оценке прогноза.

Исходя из современных знаний об изменчивости режима ледяного покрова дальневосточных морей, площадь льда, вычисленная по местоположению ледовых кромок, не может являться объективным показателем как в силу своей значительной синоптической изменчивости, так и дискретности производства самих наблюдений.

На первом этапе исследований (эпизодические судовые и единичные авиационные наблюдения) А. Н. Крындин (1964) оценивает ошибку своих расчетов в 10 % от оцененной площади ледяного покрова. На втором этапе по результатам учащенных авиационных наблюдений впервые были получены надежные сведения о скоростях смещения кромки ледяного массива, которая может достигать 30 и более миль/сут. Впоследствии эти данные были подтверждены при дешифрировании спутниковых снимков. Также было показано, что в зависимости от направления и продолжительности ветрового воз-

действия смещение кромок в различных частях моря может одновременно происходить в противоположные стороны, при этом сама величина ледовитости для моря в целом изменяется незначительно. Преобладающий тип атмосферной циркуляции, наряду с термическими условиями, является одним из основных факторов, определяющих ледовитость моря в каждый конкретный ледовый сезон. Согласно результатам проведенных расчетов, на разных стадиях существования ледяного покрова 30-мильное смещение кромки может составлять от 5 до 60 % его площади (соответственно в периоды максимальной и начальной (конечной) стадий развития).

Следующим фактором, влияющим на точность определения площади ледяного покрова, является учет его сплоченности, который дает дополнительно ошибку в определении истинной величины площади от 3–5 % в начале и в конце ледового сезона до 10–15 % в период его максимального развития. К этому следует добавить и инструментальную ошибку вычисления площадей для характерных масштабов ледовых карт, которая по нашим оценкам варьирует от 3 до 7 %. Таким образом, суммарная ошибка вычисления площадей, по-видимому, может быть до двух раз больше, чем заявленная в цитируемой выше работе [4].

Методы обработки данных

В работе [1] предложен метод выделения когерентных колебаний в длительных рядах наблюдений за гидрометеорологическими параметрами. Под когерентными подразумеваются такие периодические колебания, которые сохраняют неизменными амплитуду и фазу на всем временном отрезке исследуемого ряда. Признаком когерентности является возможность вычисления параметров гармоника соответствующего спектрального максимума. Для получения очищенных от когерентных колебаний трендов предлагается предварительно вычитать такие компоненты из исследуемого сигнала. Их оценка и последовательное вычитание из искомой записи и составляют суть метода последовательных спектров. Окончанием процесса вычисления является момент, когда после вычитания гармоника вновь появляется в спектре.

Предложенный метод успешно применялся для анализа рядов гидрометеорологических параметров большой длительности (длительность ряда определяет максимальное значение периода когерентного колебания, которое может быть вычтено из основного сигнала) [2]. С его помощью удается выделять относительно слабые, но чисто периодические эффекты на фоне непериодических вариаций большой амплитуды. Таких эффектов обнаруживается достаточно много, а в сумме они могут сильно исказить общее представление о самом тренде. Поэтому при построении последовательных спектров для любого циклического процесса на первом этапе определяются параметры главного максимума. В дальнейшем спектр вычисляется повторно, после вычитания из сигнала периодической компоненты, соответствующей главному

максимуму. На каждом этапе вычислений строится спектр и определяются параметры одной гармоники, соответствующей максимальной спектральной амплитуде. Для каждой компоненты вычисляются период, амплитуда (в единицах измерения наблюдаемого сигнала), и фаза (в радианах), относящаяся к моменту начала записи. Результат вычисления представляется в виде последовательной суммы компонент, упорядоченных в порядке уменьшения амплитуд. Отметим, что с каждой из компонент может быть связан отдельный физический процесс, проявление которого в исследуемом явлении обнаруживается как появление гармоники на той же частоте. Тренд определяется после того, как из несущего сигнала будут вычтены все обнаруженные периодические компоненты.

С целью получения более устойчивой характеристики ледовитости (устранение высокочастотных шумов) для каждого ледового сезона были вычислены три варианта ее аккумулярованных сумм путем последовательного сложения среднемесячных величин в различных сочетаниях (рис. 1).

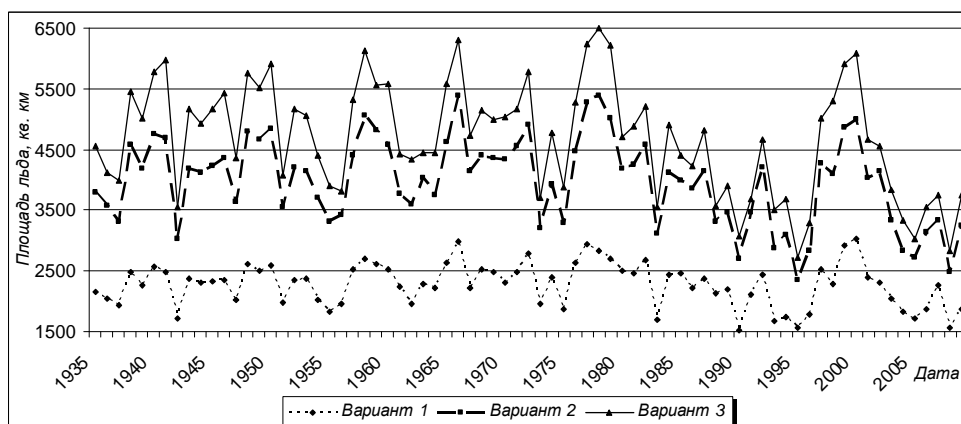


Рис. 1. Аккумулятивные суммы площади ледяного покрова Охотского моря. Вариант 1 – сумма ледовитости за два месяца (февраль и март) в период максимального развития ледяного покрова; вариант 2 – за четыре месяца (январь-апрель) – период наиболее устойчивой направленности развития ледовых процессов; вариант 3 – за шесть месяцев (декабрь-май)

Анализируя представленные на рис. 1 ряды, можно сделать заключение, что аккумулятивная сумма площадей льда для вариантов 1 и 2 изменяется практически синхронно. Для ряда варианта 3 проявляется эффект как появления дополнительных пиков (1940, 1960 гг.), так и их сглаживания (1999 г.). По-видимому, это следствие дополнительного учета ледовитости в начальный (декабрь) и завершающий (май) периоды ледового сезона. Характерной особенностью развития ледовых процессов в указанные месяцы является их значительная изменчивость, поэтому и в начале, и в конце ледового сезона тренд на нулевом уровне значимости выделить не удается [6].

Обсуждение результатов расчетов

Как было отмечено выше, суть метода последовательных спектров заключается в обработке и анализе спектров. При вычислении спектра по ограниченному участку сигнала (каким, по сути, является любой ряд гидрометеорологических параметров) возникают существенные искажения, связанные с

Таблица 1
Последовательный спектр вариаций
рабочего сигнала для варианта 2

<i>№ n/n</i>	<i>Амплитуда, км²</i>	<i>Период, годы</i>	<i>Фаза, радиан</i>
0	179,6411	10,1736	1,2900
1	317,6878	17,9960	0,1022
2	236,3805	10,0925	1,3340
3	222,5980	24,1195	0,9685
4	151,0227	11,8731	0,4031
5	194,0464	46,3506	1,0999
6	113,8385	14,8861	1,1237
7	64,9919	98,0557	0,8571

неучтенными участками исследуемого ряда. С целью устранения таких искажений из основного сигнала вычитают компоненту, полученную путем сглаживания сигнала по интервалу, превышающему половину периода наблюдения для данного ряда. Поэтому до начала оценки последовательного спектра (на этапе подготовки данных к расчетам) была выполнена процедура устранения эффекта ограниченной продолжительности ряда наблюдений, посредством вычитания из основных сигналов

результатов сглаживания по интервалу 50 лет. И только после этого по оставшемуся сигналу вычислялись последовательные спектры. Полученный таким образом сигнал является рабочим материалом (далее – рабочий сигнал) для дальнейшего анализа.

В полученном таким образом рабочем сигнале для варианта 3 удалось определить (и в последствии вычесть из него) 10 гармоник, а для варианта 2 – 7 гармоник. Для варианта 1 процесс вычисления останавливался уже на первом шаге в связи с выходом на некогерентную гармонику. Другими словами, главная компонента вариации данного ряда является некогерентной, поэтому предлагаемый метод не работает. В связи с этим ряд для варианта 1 из дальнейшего анализа был исключен.

В качестве примера в табл. 1 приведены характеристики последовательного спектра рабочего сигнала для варианта 2. Следует отметить, что в таблице отчетливо видны характерные периоды вариаций, известные из анализа солнечной активности [15]. Это периоды 11 лет, 24 года и 46 лет, а также период 17 лет, полученный нами ранее при анализе спектров вариаций стока р. Амур [3].

Сравнительный анализ прогностической и фактической кривых на рис. 2 позволяет заключить, что значительная часть рабочего сигнала при таком подходе не прогнозируется. Значительно лучшие результаты можно получить, если этот сигнал разделить на три части: 1 – усредненная часть рабочего сигнала (тренд), 2 – низкочастотная часть рабочего сигнала (периоды которой больше периода первой некогерентной компоненты) и 3 – высоко-

*К вопросу составления долгосрочного прогноза колебаний площади льда
в Охотском море*

частотная часть рабочего сигнала (периоды которой меньше периода первой некогерентной компоненты).



Рис. 2. Прогноз рабочего сигнала для варианта 2

При составлении прогноза низкочастотной компоненты рабочего сигнала расчеты часто прекращаются вследствие выхода процесса вычислений на нулевую частоту, превышающую длительность исходного ряда наблюдений. В таких случаях для продолжения расчетов необходимо заново вычлесть теперь уже из рабочего сигнала компоненту, сглаженную по половине интервала наблюдений (которую в последствии добавим к суммарному тренду), а остаток сигнала прогнозировать тем же методом путем независимых вычислений. При такой обработке низкие частоты в последующих вычислениях ограничиваются частотами первой некогерентной гармоники. Именно такая ситуация и возникла при анализе низкочастотной компоненты для вариантов 2 и 3.

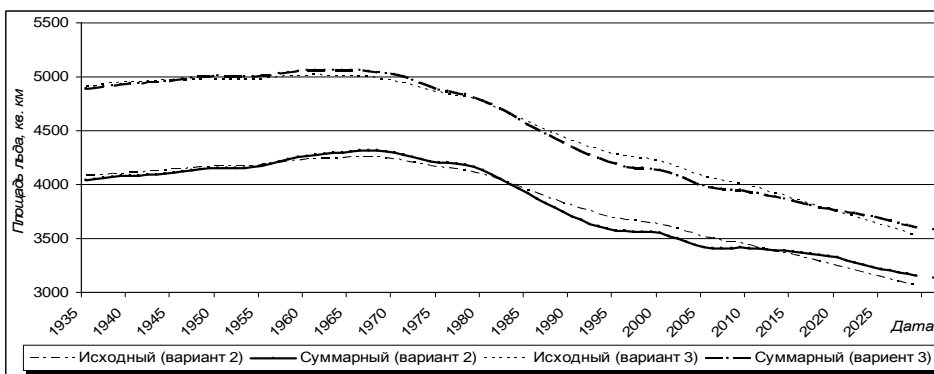


Рис. 3. Тренды исходных рядов и суммарные тренды, вычисленные для прогноза вариаций площади льда в Охотском море для варианта 2 и варианта 3

При анализе трендовых составляющих сначала вычисляется тренд исходного ряда, затем тренд низкочастотной составляющей. Очищенный суммарный тренд получается посредством вычитания из исходного его низкочастотной компоненты (рис. 3, 4).

На графиках видно, что сигнал содержит интенсивные когерентные низкочастотные компоненты, которые в конце 1970-х годов изменяют направление тренда в обоих вариантах расчета (рис. 4).

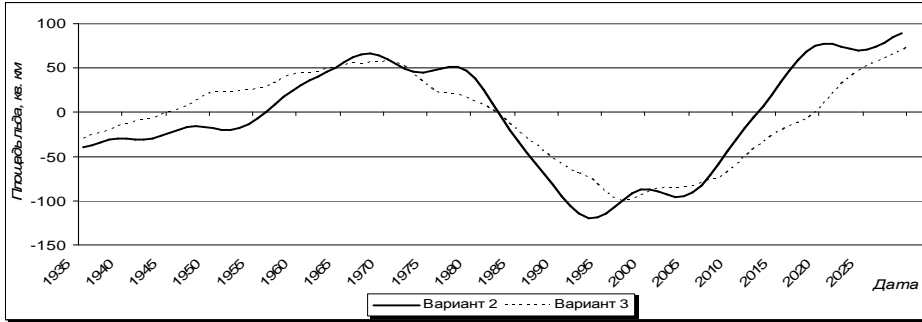


Рис. 4. Компоненты трендов низкочастотной составляющей для вариантов 2 и 3

Из этого следует, что эффект глобального потепления, рассматриваемый как отрицательная производная тренда ледовитости, после учета низкочастотной компоненты существенно уменьшается и в последующие тридцать лет практически сводится к нулю.

Таблица 2

Последовательный спектр высокочастотной компоненты сигнала для варианта 2

№ n/n	Амплитуда, км ²	Период, годы	Фаза, радиан
1	342.435247	6.652837	0.575941
2	261.999251	10.199603	0.474324
3	291.508561	2.558266	1.313869
4	192.428063	4.774144	1.252014
5	185.254449	2.442673	1.218333
6	168.600871	8.544865	1.022712
7	152.510175	3.144571	0.564197
8	136.819493	2.676473	0.074437
9	136.330459	5.681565	0.781137
10	138.454850	4.444967	0.626411
11	122.706412	2.811325	0.786211
12	121.186393	5.143625	1.048763
13	111.452149	2.182967	0.519884
14	101.814230	11.171775	1.127559
15	94.511969	7.293884	1.339983
16	91.673485	4.194067	0.256830

На следующем этапе анализа исследуем сигнал, оставшийся после вычитания из рабочего сигнала низкочастотной компоненты прогноза. Эта часть вариаций также может быть спрогнозирована методом последовательных спектров. Но при этом, из-за повторного вычитания компоненты, сглаженной по половине интервала наблюдений, теперь при анализе гармоник рассматриваются только компоненты с периодами меньше 10 лет. Такой прием применяется нами впервые. Ранее, при составлении прогноза в работе [3], все вычисленные в пределах первой полусотни гармоник были когерентными. В качестве примера в табл. 2 приведен расчет последовательного спектра полученной описанным выше способом для варианта 2 высокочастотного сигнала.

На следующем этапе по вычисленному последовательному спектру сигнала (табл. 2) был построен прогноз высокочастотной компоненты вариации

ций площади ледяного покрова для варианта 2 (рис. 5). На графике видно, что сумма 16 гармоник достаточно надежно отражает все характерные черты искомой кривой.

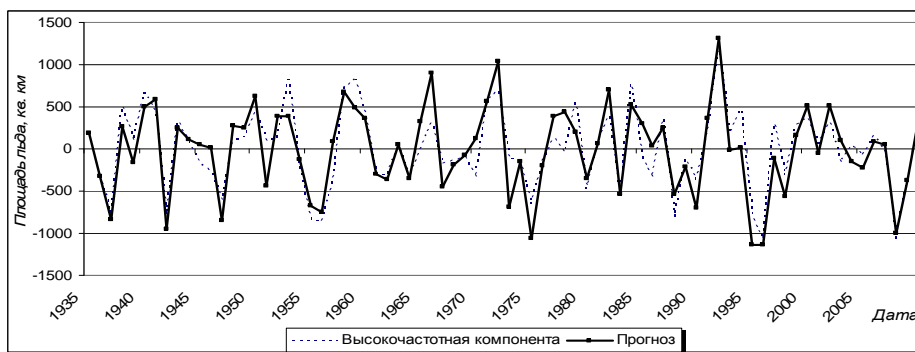


Рис. 5. Высокочастотная компонента сигнала и ее прогноз, вычисленный методом последовательного спектра по 16 гармоникам

Сумма тренда, прогноза низкочастотной компоненты и прогноза высокочастотной компоненты и представляет собой суммарный прогноз вариаций площади ледового покрова в Охотском море, составленного методом последовательных спектров. При составлении прогноза вычисленный тренд линейно продлевался также на последующие 20 лет (рис. 6).

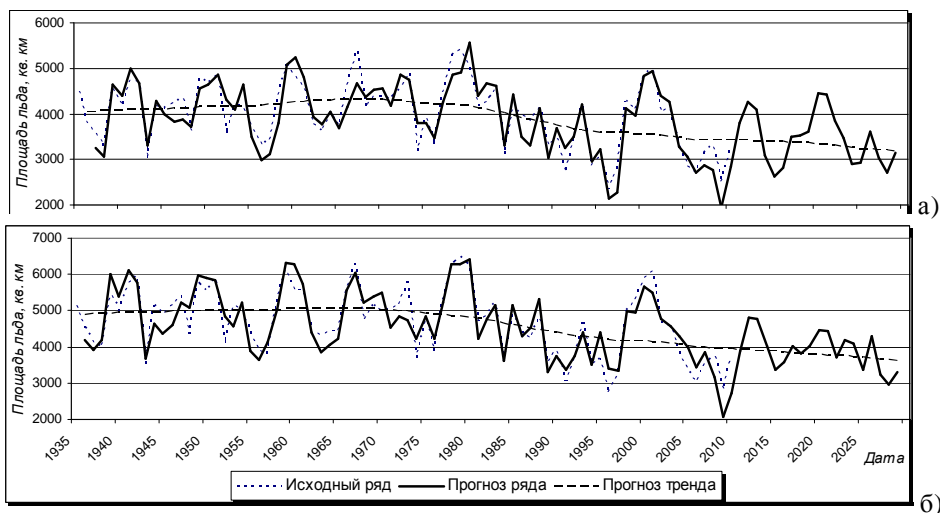


Рис. 6. Суммарный прогноз вариаций площади льда и ее тренда в Охотском море. а) – для варианта 2; б) – для варианта 3

На рис. 6 хорошо видно, что кривые суммарного прогноза для обоих вариантов достаточно надежно повторяют исходные ряды, но при этом каждая из них имеет свои особенности в отклонениях. Общим моментом является

значительное занижение прогнозного минимума ледовитости в 2009 г. (на 13 % для варианта 2 и на 16 % для варианта 3 от его абсолютного значения). Приблизительно такая же ситуация сохраняется и в 2010 г. Если проанализировать относительную ошибку прогноза на каждом этапе исследования (имеющего свою точность вычисления прогнозируемой величины), то можно отметить, что минимальный размах в варианте 2 и максимальный в варианте 3 приходится на конец ряда наблюдений (табл. 3). На остальных этапах они примерно одинаковы, а для середины ряда, как и при оценке общей точности наблюдений, ошибка прогноза приближается к 20 %.

В настоящее время сделать оценку прогноза на перспективу пока не представляется возможным. Она может быть оценена только апостериорно

Таблица 3
Оценка относительной ошибки прогнозов

Период наблюдений	1935–1956 гг.	1957–1992 гг.	1993–2010 гг.
Размах относительной ошибки	Для расчета по варианту 2		
	+11 % – –21 %	+13 % – –18 %	+17 % – –9%
	Для расчета по варианту 3		
	+11 % – –18 %	+18 % – –13 %	+27 % – –20 %

после завершения срока наблюдения. Однако существует еще методическая ошибка, которая определяется точностью и полнотой

данных, которую можно посчитать. Основой такой оценки является сравнение прогнозов, полученных по рядам различной длительности наблюдений. Различия прогнозных величин площади ледяного покрова и определяет методическую погрешность, обусловленную неполнотой измерений.

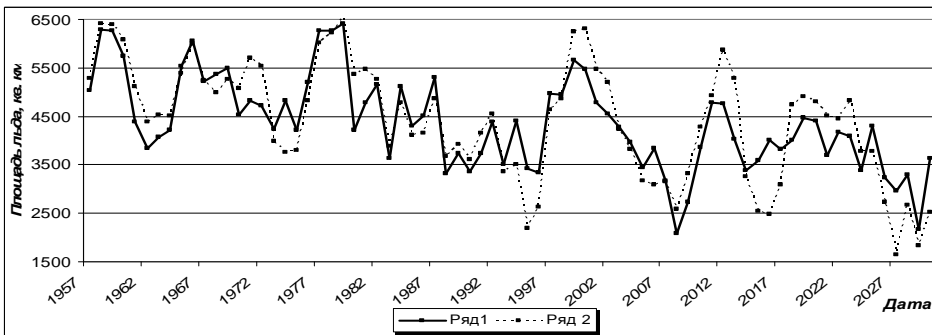


Рис. 7. Прогноз вариаций площади льда Охотского моря для варианта 3, рассчитанный по рядам разной продолжительности. Ряд 1 – с 1936 по 2010 гг., ряд 2 – с 1956 по 2010 гг.

В настоящей работе такая оценка была выполнена для варианта 3 по вычисленным прогнозам для полного ряда наблюдений (1935–2010 гг) и ряда наблюдений по второму и третьему этапам (1957–2010 гг.). На рис. 7 приведены графики прогноза обоих рядов для общего временного интервала. Хорошо видно, что прогностическая кривая, построенная по короткому ряду,

при сохранении в целом характера изменчивости имеет значительно больший размах. Для оценки качества прогноза удобно рассматривать безразмерную величину отношения квадрата разности к квадрату самой величины (рис. 8). На графике видно, что при прогнозе по короткому ряду наблюдается ошибка тренда и ошибка фазы периода 11-летних колебаний, которые начинают сказываться на 10-й прогнозный год. Фактически это соответствует ошибке ~6 % к концу срока прогноза. Таким образом, суммируя все ошибки, можно заключить, что точность прогнозной оценки вариаций площади ледяного покрова в Охотском море для каждого конкретного года, рассчитанной методом последовательных спектров, будет находиться в пределах 25–30 % от фактической площади льда.

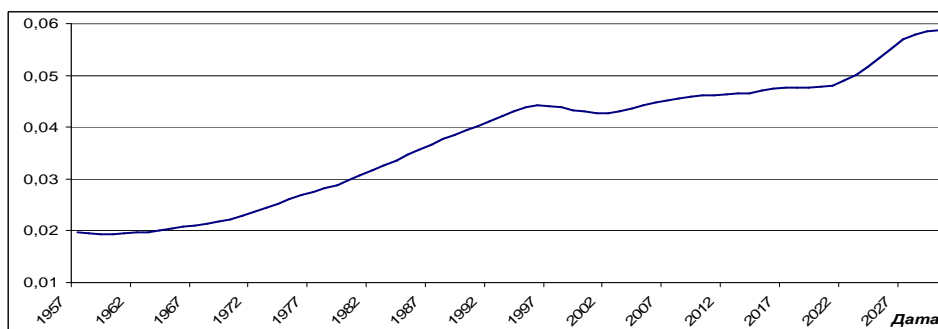


Рис. 8. Методическая ошибка прогноза

Согласно прогностической кривой, вычисленной для варианта 2 (рис. 6а), увеличение ледовитости моря до среднего уровня и выше (средняя величина аккумулярованной площади ледяного покрова для исследуемого ряда по варианту 2 составляет 3 990 тыс. км²) должно произойти в ледовые сезоны 2013 и 2014 гг. Превышение будет незначительным, не более 5 % (годы-аналоги: 1999, 2002 и 2003 гг.). К 2016 г. ледовитость значительно снизится (год-аналог: 2006 г.). Далее последует повышение ледовитости, и в ледовые сезоны 2021 и 2022 гг. она вновь может превысить средние значения на ~10 % (год-аналог 1997 г.). Во второй половине третьего десятилетия характерные ежегодные колебания будут происходить на общем фоне ее понижения.

Согласно прогностической кривой, вычисленной для варианта 3 (рис. 6б), увеличение ледовитости моря до нормы также предполагается в 2013 и 2014 гг. (средняя величина аккумулярованной площади ледяного покрова для исследуемого ряда по варианту 3 составляет 4 690 тыс. км²). Затем заметное понижение ледовитости к 1916 г. и в дальнейшем характерные ежегодные колебания в пределах ее нормальных значений на фоне общего понижения ледовитости до конца 1930-х годов.

Таким образом, оба варианта прогноза дают практически идентичный результат: тенденцию увеличения ледовитости в ледовые сезоны 2013 и

2014 гг., понижения ледовитости к 2016 г. и далее колебания в пределах нормы на общем фоне понижения ледовитости к концу 1930-х годов. Полученная оценка изменения ледовитости во втором десятилетии XXI века не противоречит сверхдолгосрочному прогнозу, рассчитанному в работе [13].

При таких сверхдолгосрочных прогнозах количественную величину прогноза целесообразно оценивать пока только на качественном уровне, поскольку она является многофакторной функцией, характеризующей эволюцию ледяного покрова комплексов прямых и обратных связей, происходящих в системе океан – ледяной покров – атмосфера. Корректнее говорить о направленности развития ледовых процессов в ту или иную сторону. В прогнозе суммарного тренда ледовитости отчетливо проявляется колебания периодов 17 и 46 лет (табл. 1). По другим сведениям периоды этих колебаний составляют 18 и 50 лет [13].

Следует обратить внимание еще на один не основной, но достаточно неожиданный результат исследований.

При анализе аккумулированных запасов тепла и холода в атмосфере по 120-летним рядам наблюдений за среднесуточной температурой воздуха [7, 10, 11, 12], был получен промежуточный вывод, что понижение ледовитости в последние 30 лет обусловлено повышением температуры воздуха в весенний период и, соответственно, смещением дат перехода температуры воздуха через 0 °С на более ранние сроки. Этот вопрос требует дополнительной проработки и должен стать предметом дальнейших исследований.

Также находит свое подтверждение выдвинутая ранее гипотеза [13, 6], что 11-летний цикл колебаний ледовитости связан с солнечной активностью. Анализ последовательных спектров солнечной активности, проведенный на основе измерений солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см проведен в работе [15]. Последовательный спектр когерентных гармоник колебаний солнечной активности, записанной как вариация интенсивности радиоизлучения с длиной волны 10,7 см, показан в табл. 4. Аналогичный спектр был вычислен и для чисел Вольфа. На графиках (рис. 9) отчетливо видно, что с точностью до погрешностей вычисления фаза колебаний площади льда противоположна фазе солнечного радиоизлучения и фазе чисел Вольфа. Данный факт свидетельствует о том, что колебания площади льда с периодом 10,5 лет связаны с вариациями колебаниями солнечной активности.

Таблица 4

Спектральные линии вариаций солнечного радиоизлучения [15]

№ n/n	Амплитуда, км ²	Период, год	Фаза, радиан
1	10,7243	64,5291	0,5074
2	7,9881	-16,3683	-0,9133
3	28,1129	-14,7728	-1,0801
4	5,3485	11,810	0,1818
5	12,4669	7,1064	-0,1137
6	9,3858	5,7106	-1,1805
7	3,2283	5,4962	-0,0100
8	2,6515	5,4694	-0,9745
9	2,3234	5,0913	-0,0082
10	0,9264	-5,0778	0,2178
11	5,7988	4,7893	-0,3914
12	50,4093	4,3134	0,1851
13	3,5047	4,3281	-0,6697
14	17,4297	-4,0438	1,2881
15	1,0106	-3,7606	0,2622

*К вопросу составления долгосрочного прогноза колебаний площади льда
в Охотском море*

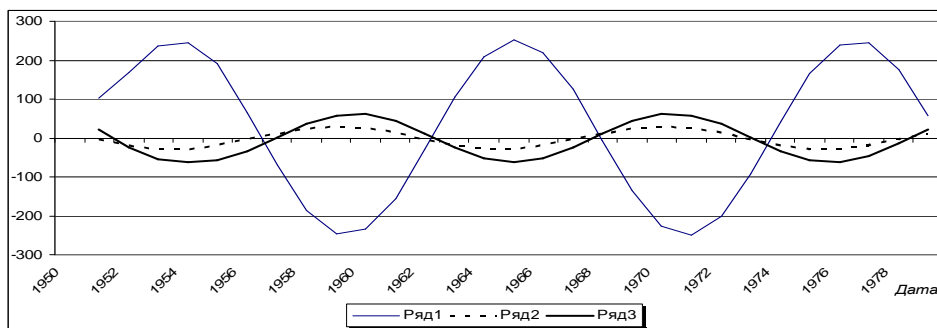


Рис. 9. Сопоставление фаз колебаний гармоника площади льда (ряд 1) с фазой колебаний солнечной активности (числа Вольфа, ряд 2) и с фазой вариаций солнечного радиоизлучение на длине волны 10,7 см (ряд 3). Анализируется сильнейшая гармоника с периодом 10,5 лет

Некоторые замечания можно сделать и относительно вычисленной ранее высокочастотной компоненты (рис. 6). Источником этой компоненты также является солнечная активность. Этот источник выделен как девятая строка последовательного спектра (табл. 4). Однако особенность его проявления состоит в том, что он наблюдается на комбинации частот квазидвухлетней составляющей (период 2,3 г.) и 11-летних колебаний, а амплитуды этих линий значительно больше амплитуды линии, которая отчетливо прослеживается в последовательном спектре вариаций площади ледяного покрова (табл. 2).

Выводы

1. Прогноз вариаций площади ледяного покрова в Охотском море, выполненный методом последовательных спектров для двух вариантов подготовки исходных данных, позволяет составить сценарий ее изменчивости на период до 2030 г. В ближайшие годы будет преобладать тенденция увеличения ледовитости с достижением максимума в ледовые сезоны 2013 и 2014 гг. Затем знак тенденции поменяется на противоположный, и к 2016 г. ожидается понижение ледовитости до минимума, примерно соответствующего ледовитости 2006 г. В последующее пятилетие ледовитость вновь достигнет нормы (или даже несколько превысит ее) в ледовые сезоны 2021 и 2022 гг. Далее ежегодные колебания будут происходить в около средних величин ледовитости на общем фоне понижения ее к концу 1930-х годов.

2. Вопрос о выборе предиктанта (аккумулированная сумма площадей льда за 4 или за 6 мес. или дополнительный учет каких-либо других показателей эволюции ледяного покрова) на данном этапе исследований остается открытым. Для ответа на него необходимо предварительно выполнить детальную оценку точности вычисления ледовитости на всех этапах исследований и

рассчитать переходные коэффициенты между ними, районировать акваторию моря по формальным ледово-географическим признакам и определиться с абсолютным значением величин площадей, вычисляемым в настоящее время с помощью ГИС-технологий. Представляется, что наиболее корректным предиктантом, который тесно связан с гидрометеорологическим режимом, должен быть объем льда в море или отдельном его районе.

Литература

1. Иванов В. В. Периодические колебания погоды и климата // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 122. – С. 777–811.
2. Иванов В. В. Тонкая структура годового спектра вариаций температуры в г. Александровск-Сахалинский // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 9. – С. 37–49.
3. Иванов В. В., Пищальник В. М., Леонов А. В., Любичкий Ю.В. К прогнозу разрушения ледяного покрова в устьях крупных рек // Известия РАН. – Сер. геогр. – 2011. – № 5. – С. 52–59.
4. Крындин А. Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. – 1964. – С. 5–81.
5. Плотников В. В., Якунин Л. П., Петров А. Г. Ледовые условия и методы их прогнозирования // Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. – Т. IX: Охотское море. – Вып. 1: Гидрологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – С. 291–340.
6. Плотников В. В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 172 с.
7. Разуваев В. Н. Суточные данные о температуре воздуха и сумме осадков по 233 станциям СССР. – Обнинск: НИИ гидрометеорологической информации, 1993. – 133 с.
8. [Электронный ресурс 1]: http://goos.kishou.go.jp/rrtdb/img/goosmail_white.gif.
9. [Электронный ресурс 2]: <http://www.natice.noaa.gov/pub>.
10. [Электронный ресурс 3]: <http://cdiac.ornl.gov/climate/variables.html>.
11. [Электронный ресурс 4]: RP5
12. [Электронный ресурс 5]: Сервер ГМЦ
13. Сорокин Ю. Д., Устинова Е. И., Хен Г. В. Долгопериодная изменчивость ледовитости дальневосточных морей и прогноз ее ледовитости // XII международная конференция по промысловой океанографии. Светлогорск, 9–14 сентября 2002 г. Тезисы докладов. – Калининград: АтлантНИРО, 2002. – С. 226–228.
14. Тамбовский В. С., Пищальник В. М. Мониторинг состояния ледяного покрова для обеспечения морских операций при поисковом бурении на нефть и газ на северном шельфе о. Сахалин // Лед и снег. – 2010. – № 3 (111). – С. 89–94.
15. Терез Э. И., Иванов В. В., Терез Г. А. О влиянии солнечной активности на периодические вариации некоторых атмосферных и метеорологических параметров // Известия Крымской астрофизической обсерватории, 2007. – С. 191–197.
16. Huang N. E. The Role of the Ocean in the Global Climate Change. PORSEC 2010. Proceeding. NTOU. Keelung, Taiwan. 2010. – P. 3.