

В.В. ПЛОТНИКОВ, В.А. ДУБИНА, С.И. КИСЛОВА

Оценка возможности долгосрочного моделирования состояния ледяного покрова (распределения сплоченности льда) в Японском море

На основе доступной цифровой информации о состоянии ледяного покрова Японского моря за период 1960–2019 гг. разработана и реализована обобщенная физико-статистическая модель долгосрочного прогноза полей сплоченности и возраста льда в море. Алгоритм модели включает увязанные в одну схему этапы экстраполяции реперных значений прогнозируемого элемента с заблаговременностью год и более и последующего полного восстановления всего поля. Данные процедуры в совокупности с архивом ледовой информации позволяют в первом приближении решить проблему долгосрочного моделирования ледовых условий на Японском море. Приводятся результаты испытаний, и делается вывод о перспективности предлагаемой методики и возможности ее практического применения.

Ключевые слова: сплоченность льда, моделирование, изменчивость, архив ледовой информации, алгоритм, оценки.

Assessment of the possibility of a long-term modeling of the ice cover condition in the Sea of Japan.
V.V. PLOTNIKOV, V.A. DUBINA (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok),
S.I. KISLOVA (Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok).

Using all available information about the ice cover condition in the Sea of Japan during 1960–2019, we developed and implemented the generalized physical and statistical model of a long-term forecasting for ice concentration fields and ice age in the sea. The model's algorithm includes the stages of extrapolation of the reference values of the predicted element with a lead time of a year or more, and the entire field's subsequent complete restoration, linked into the one scheme. These procedures, together with the ice information archive, allow us, in the first approximation, to solve the problem of a long-term modeling for the ice conditions in the Sea of Japan. The test results are presented, and the conclusion is made about the prospects of the proposed method and the possibility of its practical application.

Key words: ice concentration, modeling, variability, ice cover data, algorithm, estimation.

Введение

Японское море благодаря своим транспортным, минеральным, биологическим и рекреационным ресурсам имеет громадное значение для экономики Приморского края.

ПЛОТНИКОВ Владимир Викторович – доктор географических наук, *ДУБИНА Вячеслав Анатольевич – кандидат географических наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), КИСЛОВА Светлана Ивановна – научный сотрудник (Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток). *E-mail: dubina@poi.dvo.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН «Новые вызовы климатической системы Земли», проект № 18–1–004.

Однако наличие сезонного ледяного покрова вносит свои коррективы в процессы эффективного развития региона. Ледяной покров является главным лимитирующим фактором любой хозяйственной деятельности на море в холодный период года. Поэтому развитие системы мониторинга ледяного покрова в море считается важнейшей научно-практической задачей. Знание ледовой обстановки и ее предвидение (прогноз) открывают хорошие перспективы повышения эффективности хозяйственной деятельности за счет учета ледового фактора при планировании любых операций на море. Это подчеркивает насущную необходимость пристального внимания к состоянию и эволюции ледяного покрова.

Если характер ледового режима моря благодаря исследованиям Л.П. Якунина [11, 12], В.В. Плотникова [4, 6, 7], И.О. Думанской и др. [1, 9, 10] в целом изучен удовлетворительно, то проблема оценки эволюции (прогнозирования) состояния ледяного покрова до сих пор остается открытой. Особенно это относится к задачам долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования состояния ледяного покрова в море. Моделирование и прогноз ледовых условий в Японском море до последнего времени носили фрагментарный характер и включали в основном выявление зависимостей для определения ледовых фаз по пунктам и ледовитостей для отдельных районов или моря в целом [6, 12]. При этом необходимо отметить определенные успехи в использовании физико-статистических моделей при прогнозировании ледовых характеристик с заблаговременностью до трех декад [4].

В области гидродинамического моделирования можно упомянуть достаточно успешную реализацию динамической модели перераспределения льда в Татарском проливе [9]. Однако практическое использование подобных моделей затруднено и их применение требует постоянной статистической корректировки результатов.

Все это подчеркивает необходимость пристального внимания к мониторингу и моделированию состояния ледяного покрова, определяет актуальность, научную новизну и практическую значимость данного исследования.

Цель работы – оценка возможности долгосрочного моделирования состояния ледяного покрова (распределения сплоченности льда) в Японском море.

Впервые разработан алгоритм и реализована модель для долгосрочного (год и более) моделирования состояния ледяного покрова (многомерных распределений сплоченности льда) в Японском море. Подобные задачи ранее не ставились и не решались. Внедрение предлагаемой технологии позволит поднять уровень научно-технического потенциала края в области долгосрочного планирования и в последующем реализовать ее для целей судоходства, рыбного промысла, развития аквакультуры, гидротехнического строительства и т.д. на акватории Японского моря.

Исходные данные и методы

Исходной информацией для создания архива данных о распределениях сплоченности льда на Японском море послужили:

- база данных «Состояние ледяного покрова Японского моря»*, содержащая сведения о полях сплоченности и возрасте льда с 1960 по 2019 г.;
- карты анализа ледовой обстановки в море за период 1972–2019 гг. с периодичностью 3–4 дня (http://www.natice.noaa.gov/products/weekly_products.html).

Информация о состоянии ледяного покрова моря (поля сплоченности) осреднялась по 10-дневным периодам. Численные значения сплоченности льда [3, 4, 6, 7] снимались в центрах районов, на которые разбивалось море (рис. 1).

Метод прогноза основан на экстраполяции с заблаговременностью год и более некоторых значений прогнозируемого параметра (сплоченности льда), снятых в заранее определенных районах, с последующим восстановлением всего поля.

*Состояние ледяного покрова Японского моря: св-во о гос. регистрации базы данных / В.В. Плотников, С.П. Шкорба, И.Д. Ростов, Е.В. Дмитриева. – № 2011620558; зарегистрировано 03.08. 2011 г.

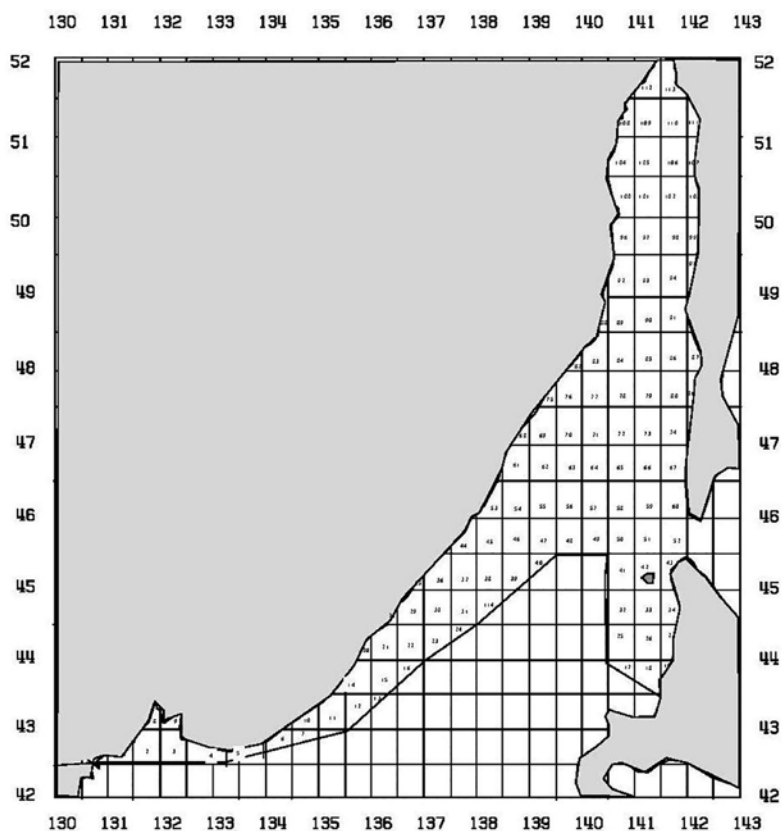


Рис. 1. Расположение и нумерация районов для снятия значений ледовых характеристик в Японском море (непрерывная линия показывает границу предельного распространения льда)

Модель эволюции ледовых условий включает ряд последовательных алгоритмов: выбор ограниченного числа реперных районов, которые в совокупности достаточно адекватно отражают пространственные особенности распределения прогнозируемого элемента;

экстраполяция значений сплоченности льда по каждому реперному району с заблаговременностью год и более;

восстановление всего поля с заданной заблаговременностью.

Данные процедуры в совокупности с архивом ледовой информации позволяют в первом приближении решить проблему долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов состояния льда в Японском море.

Отбор реперных районов. Реперными считаются обособленные районы с различной изменчивостью прогнозируемых характеристик. Обычно отбирается 4–6 районов, которые характеризуют области повышенной изменчивости элемента.

Экстраполяция предполагает использование скрытых в самом прогнозируемом процессе квазипериодичностей. Однако отсутствие четко выраженных периодов в исследуемом процессе не позволяет использовать традиционные методы гармонического анализа. В этом случае более адекватные результаты можно получить методом разложения в ряд с некрратными гармониками [2, 5, 8]. Соответственно в качестве модели может быть использована суперпозиция этих гармоник. При этом в каждом конкретном случае параметры квазипериодических составляющих и их веса в общей изменчивости параметра пересчитываются.

Распределение сплоченности в каждом районе представлялось в виде гармонического ряда с некратными частотами:

$$L_i = A_0 \sum_{m=1}^p A_m \sin \left[\left(\frac{2\pi}{T_m} + (m-1) \right) t_i + Q_m \right],$$

где A_m – амплитуда; T_m – период и Q_m – сдвиг (параметры, определяемые методом наименьших квадратов); $i = 1, 2, \dots, n$; $m = 1, 2, \dots, p$, где n – длина ряда, p – количество используемых гармоник; t – момент времени фиксации параметра (сплоченности) [5].

Восстановление модельного поля. Задача восстановления полного поля сплоченности льда реализуется по некоторым реперным значениям с учетом имеющихся представлений о существующей пространственно-временной структуре этого поля. При решении этой задачи наиболее рациональным подходом, по-видимому, является использование следующих процедур: расчет эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) по имеющейся системе точек и дальнейшее дополнение пропущенных значений в полях ЭОФ методами оптимизации, основанными на итерационных схемах расчета; интерполяция недостающих временных функций разложения с последующим восстановлением истинных значений поля. В настоящее время подобный подход широко применяется при формировании архивов ледовых характеристик на дальневосточных морях [4, 6].

В общем виде алгоритм задачи можно представить в виде блок-схемы (рис. 2).

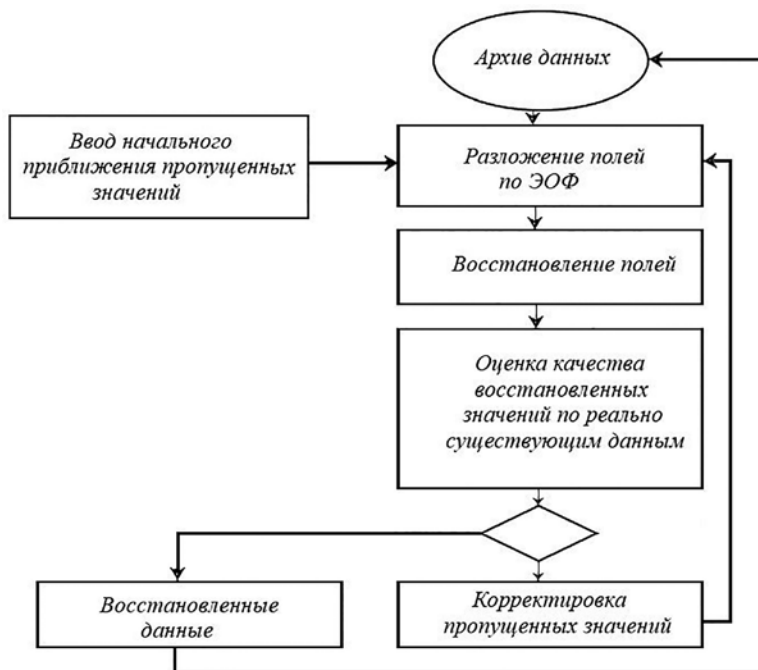


Рис. 2. Блок-схема процедур восстановления пропущенных данных

Блок «Корректировка пропущенных значений» реализует оптимизационную задачу поиска пропущенных значений и представляет собой подбор пропущенных значений, так чтобы минимизировать оценку критерия согласия, отражающего степень точности разложения исходных полей по ЭОФ и последующего их восстановления. В качестве начального приближения пропущенных данных использовались средние значения, а в качестве критерия согласия применялся следующий функционал:

$$\Phi_2(A_0 \dots A_p) = \max |Y_k - F_k|, 1 \leq k \leq N,$$

где Y_k, F_k – фактические и восстановленные значения, N – объем выборки.

Далее реализуется итерационный процесс подбора таких пропущенных значений, которые оптимальным образом отражали бы статистическую структуру анализируемого поля, представленную ОЭФ.

Все решение сводится к определению в многомерном пространстве минимума выбранного критерия согласия.

Функционирование схемы происходит в следующем порядке: исходные данные, имеющие пропуски, извлекаются из ранее созданного архива. Согласно заданным условиям (информация о характере эксперимента: длина выборок, списки пропущенных значений и их начальные приближения, точность представления полей посредством ЭОФ, выбранный критерий согласия и т.д.) отобранные поля подвергаются процедуре разложения по ЭОФ. Пропущенные значения заменяются любой их начальной оценкой (обычно средним многолетним значением). Далее по первым наиболее крупномасштабным собственным функциям проводится восстановление исходных полей, в сумме несущих заданное количество информации об изменчивости анализируемого элемента. Эта процедура позволяет несколько сжать информацию и исключить незначительные, близкие к случайным флуктуации параметров. Сравниваются исходные и восстановленные значения в одних и тех же точках поля, рассчитывается соответствующий функционал (критерий согласия). После этого изменяются начальные приближения пропущенных значений, процедура повторяется до тех пор, пока не будет найден минимум выбранного функционала. Фиксируются оценки пропущенных данных, которые приводят к этому минимуму. Рассчитанные по этим значениям ЭОФ будут представлять оптимальную для поставленной задачи статистическую оценку пространственно-временной структуры анализируемых полей.

Наиболее подходящая аппроксимация пропущенных значений, отражающая даже их возможные экстремальные состояния, была получена при использовании минимаксного критерия согласия, что и послужило основанием для использования именно этого критерия в решении задачи долгосрочного прогнозирования.

Результаты и анализ

Реализуя предложенный алгоритм, мы попытались выполнить адаптивную оценку сплоченности льда в Японском море за период с 1960 по 2019 г. с заблаговременностью один год. В сезонном плане анализировался наиболее суровый в ледовом отношении период – январь–февраль.

На первом этапе сплоченность льда моделировалась лишь в реперных районах. Для выбора реперных районов рассчитывались поля среднемноголетних значений сплоченности льда и их изменчивости – средних квадратических отклонений (рис. 3).

Области наибольшей изменчивости расположены на акваториях с 7–8-балльной сплоченностью льда, где вклад динамического фактора (дрейф льда, взаимодействие между льдинами и т.д.) максимален. В соответствии с этим области максимальной изменчивости, следуя за смещениями зон со сплоченностью льда 7–8 баллов, в первой половине ледового сезона спускаются к югу, а во второй – поднимаются обратно на север. В период относительной устойчивости ледяного покрова (январь–февраль) они вытягиваются с северо-востока на юго-запад акватории.

Для января–февраля было отобрано 5 реперных районов – 54, 69, 76, 86 и 91 (рис. 1).

Для решения задачи определения оптимального ряда гармоник сначала из основного процесса (обучающая последовательность – 1960–1990 гг.) выделялось несколько первых гармоник (рассчитывались амплитуды и частоты), из которых выбиралась одна по критерию минимума среднеквадратической ошибки (σ), полученной на проверочной последовательности (данные за 1991–2019 гг.). Затем значение отобранной первой гармоники вычиталось из анализируемого процесса и формировались первые разности (Δ), из которых по тем же принципам отбиралась вторая гармоника и т.д. Процесс отбора гармоник

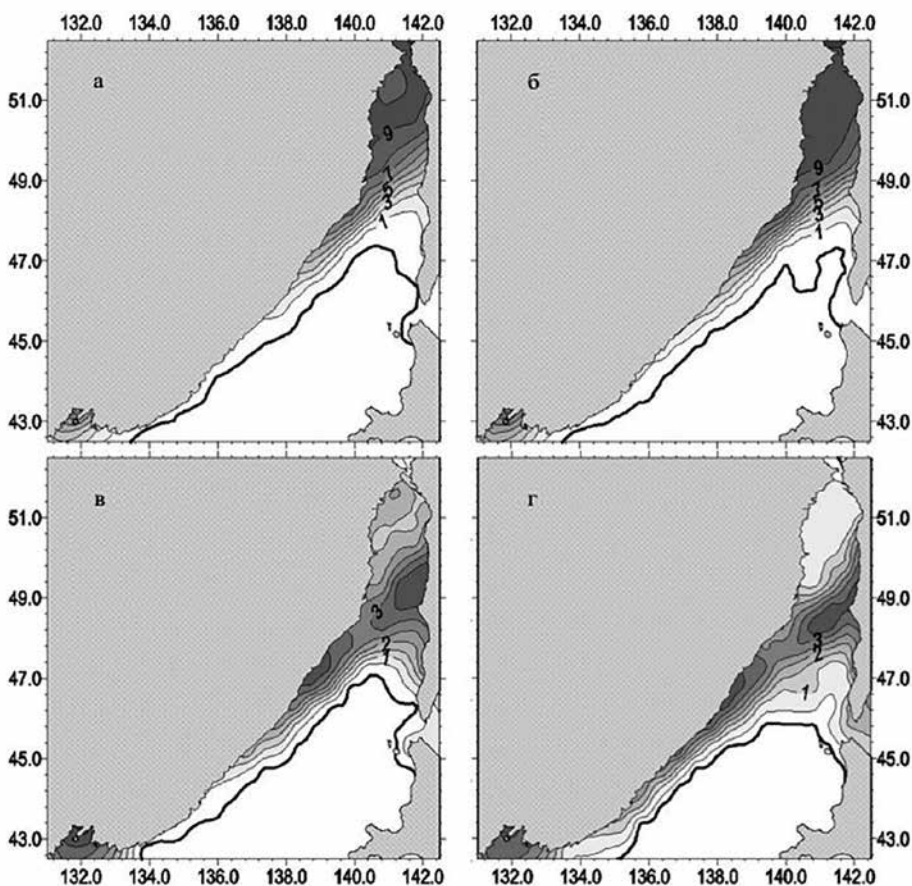


Рис. 3. Распределение средних многолетних значений сплоченности льда (*а* – январь, *б* – февраль) и средних многолетних отклонений сплоченности – σ (*в* – январь, *г* – февраль) в Японском море для центральных декад ледового сезона

продолжался до тех пор, пока ошибка (σ) на проверочной последовательности от итерации к итерации уменьшалась не менее чем на 5 % от первоначальной. В результате определяется наиболее приемлемое представление детерминированной составляющей квазипериодического процесса в виде некоторого квазигармонического тренда, состоящего из суммы нескольких гармоник с некратными частотами.

Использовался адаптивный алгоритм расчета.

В модели экстраполяции учитывалось около 90 % изменчивости исходного процесса. Количество отбираемых гармоник при такой точности прогноза варьировало от 2 до 7. Моделировались средние за центральную декаду месяца значения сплоченности льда в январе–феврале.

В результате, исходя из особенностей алгоритма, была сформирована база данных зависимых (1960–1990 гг.) и независимых (1991–2019 гг.) фактических и модельных оценок распределений декадных значений сплоченности льда в Японском море, полученных с заблаговременностью один год.

Сравнение модельных и фактических значений сплоченности льда с заблаговременностью один год в реперных районах показало весьма обнадеживающие результаты. Обеспеченность оказалась в пределах 75 %, при том что обеспеченность климатологических прогнозов составляет около 59 %, т.е. эффективность модели очевидна. Оправдываемость модельных результатов не намного ниже – 71 %. В качестве предельной модельной погрешности использовалась величина, равная 1 баллу [6, 7].

На следующем этапе восстанавливались все пропущенные значения прогнозируемого поля сплоченности льда (значения сплоченности во всех районах). После этого сравнивались модельные и фактические величины по всему морю (114 районов) и оценивались качество модели и возможности ее применения на практике.

Эффективность метода (средние обеспеченности рассчитывались на зависимой выборке) составила 83 %, а оправдываемость (рассчитывалась на независимой выборке) – 79 %. Весьма высокие результаты модели частично связаны еще с тем, что допустимая ошибка составляет 1 балл, а в ряде районов (рис. 3) изменчивость прогнозируемого параметра меньше этой величины и все прогнозы там автоматически оправдываются.

Заключение

Ледяной покров является главным лимитирующим фактором любой хозяйственной деятельности на море в холодный период года. Поэтому развитие системы мониторинга ледяного покрова в море считается важнейшей научно-практической задачей. Впервые разработан алгоритм и дается оценка возможности долгосрочного (год и более) моделирования состояния ледяного покрова (многомерных распределений сплоченности льда) в Японском море. Подобные задачи ранее не ставились и не решались.

Представленные результаты проверки функционирования модели отражают правильность модельных представлений о характере долговременной (год и более) изменчивости ледовых условий в Японском море.

Увязанные в одну схему этапы обработки информации в совокупности с архивом ледовой информации позволят в первом приближении решить проблему мониторинга и долгосрочного прогнозирования ледовых условий на Японском море. Выявленные особенности их пространственно-временной структуры могут быть использованы при анализе изменений климата в регионе, в задачах моделирования состояния ледяного покрова, а также при решении практических вопросов хозяйственного освоения акватории Японского моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
2. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника, 1975. 312 с.
3. Номенклатура ВМО по морскому льду / WMO/OMM/ВМО. № 259. Изд. 1970–2017. – www.aari.ru/gdsidb/xml/wmo_259.php?lang0=2 (дата обращения: 06.11.2020).
4. Плотников В.В. Аналого-статистическая модель прогноза положения кромки, сплоченности, возраста и форм льда на дальневосточных морях // Метеорология и гидрология. 1997. № 10. С. 59–67.
5. Плотников В.В., Вакульская Н.М., Дубина В.А. Изменчивость ледовых условий Берингова моря и оценка возможности их моделирования // Океанология. 2019. Т. 59, № 6. С. 904–911.
6. Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 172 с.
7. Плотников В.В. Оценка точности спутниковой информации о состоянии льда, реализуемая в схеме физико-статистического прогноза // Геология, геофизика и геохимия океана: тез. докл. на III Съезде сов. океанологов, Ленинград, 14–19 дек. 1987 г. Л., 1987. С. 186.
8. Сахарович Я.И. О закономерностях и возможностях долгосрочного прогнозирования географических процессов // Автоматика. 1972. № 5. С. 20.
9. Фролов И.Е., Петров А.Г. Численная модель осенне-зимних ледовых явлений // Тр. ДВНИГМИ. 1980. Вып. 91. С. 3–12.
10. Четырбоцкий А.Н., Плотников В.В. Ледяной покров Японского моря. Анализ данных и моделирование. Владивосток: Дальнаука, 2005. 208 с.
11. Якунин Л.П. Атлас основных параметров ледяного покрова Японского моря. Владивосток: Изд. дом ДВФУ, 2012. 84 с.
12. Якунин Л.П. Ледовые исследования на дальневосточных морях // Тр. ДВНИГМИ. 1979. Вып. 77. С. 102–107.