

УДК 551.467.3(265.54)

В.В. ПЛОТНИКОВ

Пространственно-временная изменчивость ледяного покрова залива Петра Великого

На основе анализа всей доступной информации за период с 1917 г. по настоящее время проведена оценка пространственно-временной структуры ледяного покрова зал. Петра Великого. Анализ пространственных составляющих (собственных векторов поля сплоченности льда) показывает наличие очагов, определяющих особенности пространственно-временной структуры ледяного покрова в заливе. Это Уссурийский залив, прибрежная зона на западе зал. Петра Великого и зал. Восток. В результате изучения многолетней изменчивости состояния ледяного покрова выявлена тенденция к росту ледовитости, особенно в период активного развития ледяного покрова, выделены квазипериодические составляющие с периодами 2–3 года, 7–8, 11 и около 50 лет. При этом вклад высокочастотных флуктуаций, включающих чисто случайную компоненту и квазипериодические составляющие с периодами до 3 лет, оценивается в 30–35 %.

Ключевые слова: залив Петра Великого, ледяной покров, база данных, сплоченность льда, пространственно-временная изменчивость.

The spatial-temporal variability of the ice cover of Peter the Great Bay. V.V. PLOTNIKOV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Far East Federal University, Vladivostok).

Assessment of spatial-temporal variability of an ice cover in Peter the Great Bay using all available data was carried out from 1917 to the present day. Analysis of spatial components (eigenvectors of ice concentration field) shows the presence of sites which determine peculiarities of spatial-temporal structure of the ice cover in the Bay. They are the Ussuri Bay, the coastal area to the west of Peter the Great Bay and the Vostok Bay. In the result of study of long-time variability of the ice cover condition it has been detected a tendency of ice coverage growth, especially during the active ice growth stage, as well as quasi-periodic components with the periods of 2–3 years, 7–8 years, 11 years and about 50 years. At this, high-frequency fluctuations including purely random component and quasi-periodic components with periods up to 3 years account for 30–35 %.

Key words: Peter the Great Bay, ice cover, database, ice concentration, spatial-temporary variability.

Залив Петра Великого, расположенный в северо-западной части Японского моря, является самой богатой по видовому и таксономическому разнообразию акваторией Российской Федерации. Реализация планов развития Приморского края, в том числе создание на юге края нефтегазового комплекса, во много раз увеличит антропогенную нагрузку на экологию залива. Для сохранения и рационального использования уникальных биологических и водных ресурсов залива в условиях интенсивной хозяйственной деятельности необходимо располагать всесторонними и надежными сведениями о важнейших абиотических факторах, определяющих состояние и функционирование прибрежных экосистем. Речь идет в первую очередь о сезонном ледяном покрове и связанных с ним особенностях гидрометеорологических условий, которые необходимо учитывать при обустройстве территории.

К настоящему времени собран обширный материал, касающийся ледяного покрова дальневосточных морей, и в частности Японского моря. Достаточно подробно дано общее описание ледового режима [1, 3–7, 9–12]. При этом характер пространственно-временной

ПЛОТНИКОВ Владимир Викторович – доктор географических наук, заведующий лабораторией (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток). E-mail: vlad_plot@poi.dvo.ru

Работа поддержана грантами ДВО РАН № 12-III-A-07-036 и 12-III-A-07-032.

изменчивости ледяного покрова практически не исследовался. Лишь в последнее время были предприняты попытки оценить многолетнюю изменчивость ледяного покрова залива [4, 7, 9]. Однако при наличии многочисленных пропусков в исходных данных в более ранних исследованиях получены только ориентировочные оценки, не позволяющие сделать заключение о характере многолетней тенденции в эволюции ледовых условий в заливе.

Сбор, обработка и анализ всей доступной информации о ледовых условиях в зал. Петра Великого за период с 1917 г. и по настоящее время открывают возможности для восстановления климатических состояний ледяного покрова, формирования полных архивов данных, выявления пространственно-временных масштабов изменчивости ледовых процессов и формулировки модельных представлений о характере этой изменчивости. Данное исследование стало возможным благодаря использованию разноплановой информации о ледяном покрове и комплексе определяющих его эволюцию факторов, скорректированной и сформированной в единую базу данных.

Цель работы – оценить состояние ледяного покрова за почти столетний период (1917–2012 гг.), выявить и изучить разномасштабную пространственно-временную изменчивость ледовых условий зал. Петра Великого. Учитывая, что наиболее ранние и полные сведения о состоянии ледяного покрова на акваториях морей северо-западной части Тихого океана имеются только по зал. Петра Великого, эти данные можно использовать как реперные оценки при изучении ледовых условий всего дальневосточного бассейна.

Материалы и методы

Наблюдения за льдом в зал. Петра Великого ведутся с конца XIX в., однако пригодные для последующего обобщения и анализа сведения о состоянии ледяного покрова залива начали поступать только с 1917 г.

Исходной информацией при создании базы данных за 1917–2012 гг. послужили:

карты ледовых разведок, а начиная с 50-х годов XX в. ледовых авиаразведок акваторий дальневосточных морей;

спутниковые изображения ледяного покрова морей, получаемые с метеорологических ИСЗ серий «NOAA», «Метеор», «Космос» и т.п., начиная с 1990 г.;

гидрометеорологические ежемесячники (ежегодники) по Дальневосточному региону, содержащие данные прибрежных гидрометеорологических станций и постов за период с 1917 г. по настоящее время.

Вся информация о состоянии ледяного покрова, получаемая в течение определенной декады, картировалась и подвергалась предварительному анализу. В выборку исходных данных о ледовом состоянии залива до 1956 г. включались данные гидрометеостанций и постов, ледовых разведок, а также попутные судовые наблюдения; с 1956 г. и до 1990 г. – данные ледовых авиаразведок, а после 1990 г. – наблюдения из космоса. Соответственно, архив ледовой информации содержит данные с дискретностью от одной декады и более и пространственным разрешением менее 10 км.

По средним декадным картам ледовых условий определялись значения ледовитостей (площади моря, покрытой льдом), фиксировалось положение кромки льда, выделялись области с заданными ледовыми условиями и при необходимости подсчитывались их площади, снимались значения различных ледовых характеристик (сплоченность, возраст, формы льда, торосистость, заснеженность и т.д.). Для численного представления полей ледовых характеристик акватория залива разбивалась на ряд сравнительно однородных районов (244 района) максимальной площадью 63,24 км². Схема разбиения акватории залива на элементарные однородные районы представлена в работе [4]. Отношение площади каждого элементарного района к площади максимального определялось как «вес» данного района. Вблизи берегов районы формировались в зависимости от конфигурации

береговой линии и практической целесообразности. В местах резкой смены ледовых характеристик площади элементарных районов уменьшались.

Вся терминология и понятия о ледовых явлениях, используемые в данной работе, соответствуют международной символике для морских ледовых карт и номенклатуре морских льдов [2]. Соответственно, ледовитость оценивалась в процентах от площади залива, а сплоченность льда – в баллах (от 0 до 10).

Учитывая высокую степень точности определения местоположения самолета при выполнении авиаразведок, а также достаточно высокую точность привязки и дешифровки спутниковых данных, можно полагать, что возможные ошибки в определении положения кромки льда, а следовательно, и вычисляемых значений ледовитости намного меньше среднеквадратического отклонения этих величин.

Сравнение ледовитостей акваторий, рассчитанных по различным источникам информации (спутниковые данные и данные ледовых авиаразведок), показали высокую точность сведений о состоянии льда в заливе. Коэффициенты корреляции между разноплановыми (по источникам информации) данными, как правило, превышали 0,8 [8]. Поэтому можно предположить, что суммарная ошибка оценок ледовитости составляет не более 10–15 %, а ошибки фиксирования ледовых характеристик не превышают 1 балла.

Восстановление полных баз данных. Накопленная к настоящему времени исходная информация о состоянии ледяного покрова зал. Петра Великого отличается неполнотой как в пространстве, так и во времени. Это связано с погодными условиями при визуальном фиксировании состояния ледяного покрова, нерегулярностью разведок, трудностью определения отдельных ледовых элементов и т.д. Приходится констатировать, что практически нет ни одного периода с полным набором всех элементов, всесторонне характеризующих состояние ледяного покрова. Сложившаяся ситуация с дефицитом исходных натуральных данных существенно затрудняет любые исследования, осуществляемые с учетом ледовых условий и их пространственно-временной изменчивости на акватории зал. Петра Великого. Поэтому была поставлена задача восстановить полный архив ледовой информации на основе существующих представлений о пространственно-временной структуре ледовых характеристик. Для реализации этой задачи использовался комплекс методов многомерной статистики [6, 9]. При этом решение задачи разбивалось на два этапа.

На первом этапе восстановлению подвергались ряды средних декадных значений ледовитостей. В исходном информационном массиве преимущественно фиксировались отдельные или групповые пропуски наблюдений в течение ледового периода. В некоторых случаях отмечалось полное отсутствие сведений о состоянии ледяного покрова залива в течение всего года. Однако подобные ситуации оказались редки – только в 7 случаях из 96. Это 1919, 1921, 1923, 1924 и 1942–1944 гг.

Отдельные пропуски в течение ледового сезона восстанавливались методами аналогов и корреляционно-регрессионного анализа [6, 9]. Отбирались года-аналоги, оценивались связи и строились уравнения регрессии между декадными значениями ледовитостей внутри ледового периода. Кроме того, для оценки состояния ледяного покрова использовался архив температур воздуха по 4 станциям, расположенным на побережье залива (Владивосток, Находка, Гамов и Посьет), за период с 1918 по 2004 г. Данные о температуре воздуха были извлечены из климатического архива ДВНИГМИ.

Если пропуски распространялись на весь ледовый сезон, то использовался метод восстановления, основанный на разложении в ряд Фурье, с заранее рассчитанными гармониками [6]. При корректировке восстановленных величин ледовитостей учитывался также термический фон года.

Комплексность подхода к задаче восстановления пропущенных значений и тщательность расчетов позволяют предполагать, что возможные ошибки диагноза ледовитостей залива ненамного превышают ошибки представления исходных данных (10–15 %).

На втором этапе восстанавливались среднедекадные поля сплоченности льда по 244 элементарным районам. Кроме описанных выше методов, на этом этапе при наличии пропусков данных восстановление многомерных распределений (полей) ледовых характеристик проводилось методами оптимизации. При этом для восстановления характеристик можно использовать эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) разложения полей сплоченности льда (в дальнейшем также возраста и форм льда). Вычленение отдельных составляющих изменчивости и оценка их весов базируются на учете статистической структуры самих исходных полей, т.е. анализируются взаимосвязи всех точек поля (разложение проводится по корреляционной или ковариационной матрице). Однако имеющиеся пропуски данных в архивах ледовой информации делают невозможным эффективную реализацию данного метода. В связи с этим возникает проблема, как провести разложение исходных полей по ЭОФ с одновременным восстановлением пропущенных значений без искажения или с минимальным искажением истинной статистической структуры анализируемых полей. В подобных случаях для решения поставленных задач, по-видимому, наиболее рационально использовать методы оптимизации, основанные на итерационных схемах расчета. Достоинством этих схем являются универсальность относительно широкого класса задач, простота вычислительного процесса, малое количество промежуточных данных, устойчивость к ошибкам округления и т.д. При восстановлении многомерных полей ледовых характеристик нами использовался именно такой подход [6].

Тем не менее множественность пропусков данных делает невозможным прямую реализацию указанных методов полного восстановления многомерных полей. Поэтому для адекватной оценки пространственной структуры сплоченности льда восстанавливались только поля, имеющие ограниченное количество пропусков.

Последовательно выполненный комплекс статистических процедур по восстановлению пропущенных данных позволил в первом приближении сформировать:

непрерывный (полный) архив информации об общем состоянии ледяного покрова (ледовитости) в зал. Петра Великого за период с 1917 по 2012 г.;

архив полей сплоченности льда за 30 наиболее обеспеченных данными лет. В годы с недостатком информации (нет данных более чем для половины площади залива) или ее отсутствием полностью восстановить распределение сплоченности льда пока не удалось. Однако даже частично восстановленный архив сплоченности льда позволил получить статистически достоверные оценки и провести анализ пространственной структуры изменчивости ледяного покрова в заливе. Естественно, по мере накопления дополнительной информации и совершенствования вычислительных технологий восстановленные данные будут уточняться и расширяться.

Результаты и обсуждение

По многолетним данным, средняя продолжительность периода со льдом в зал. Петра Великого составляет около 120 дн. В среднем льдом покрывается около 42 % его площади. При экстремальных условиях ледяной покров формируется практически на всей акватории залива. Раннее очищение залива ото льда наступает во второй декаде апреля, позднее – в середине мая–начале июня.

Временная изменчивость. В процессе статистического анализа многолетних распределений ледовитости оценивалось существование направленной тенденции в развитии ледовых условий, а также выявлялись мелкомасштабные квазипериодические ее составляющие.

На рис. 1 представлены многолетние распределения средних декадных ледовитостей зал. Петра Великого для центральных декад каждого месяца ледового периода. По ним проверялась гипотеза о наличии трендовой составляющей.

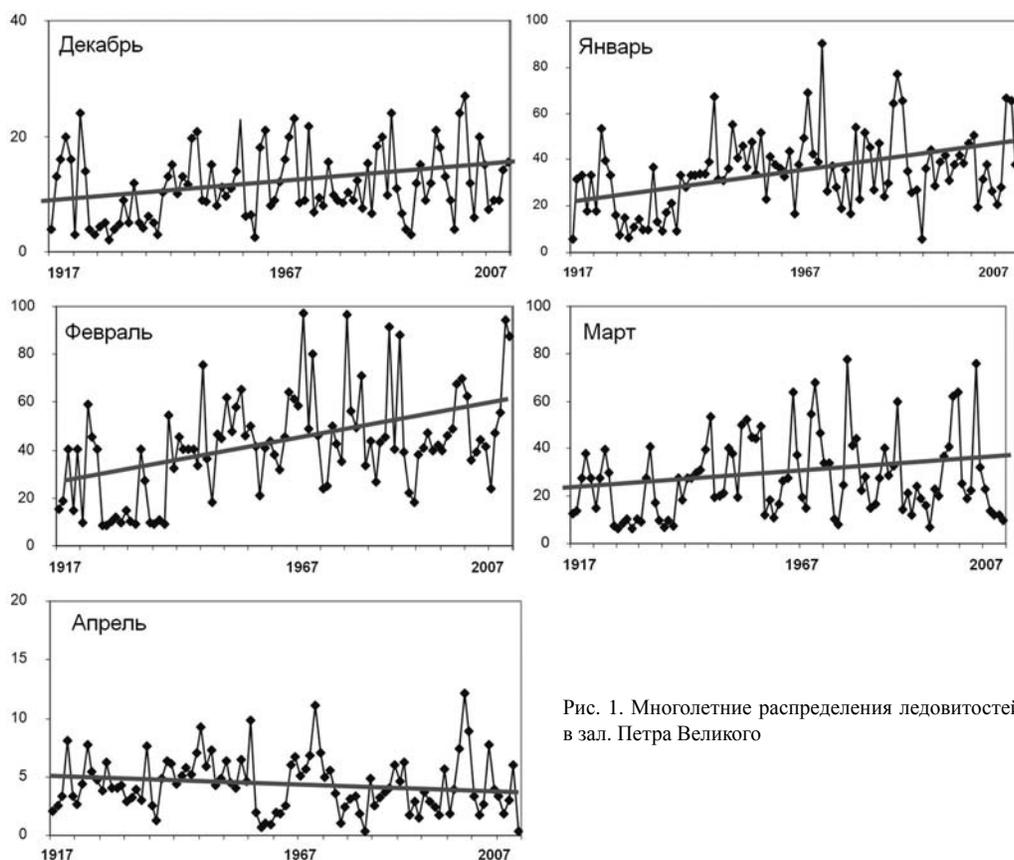


Рис. 1. Многолетние распределения ледовитостей в зал. Петра Великого

Статистический анализ рядов ледовитости показал наличие устойчивых (статистически значимых) линейных трендов, особенно в период активного развития ледяного покрова. Наиболее высокая вероятность (более 99%) существования линейного тренда в многолетних распределениях ледовитостей зафиксирована в январе–феврале, т.е. в период максимального льдонакопления. В целом в многолетней изменчивости ледовых условий отмечается тенденция роста ледовитости в заливе. Вместе с тем можно отметить некоторые изменения характера внутрисезонных процессов: активизацию процессов льдообразования в декабре–марте (положительный угол наклона трендовой составляющей) и ускорение процессов разрушения льда в апреле (отрицательный угол наклона трендовой составляющей) на протяжении всего XX столетия.

Полученные ранее разнонаправленные тренды ледовитости на различных временных интервалах [4] свидетельствуют лишь о наличии соответствующих периодических составляющих, формирующих многолетнюю изменчивость ледовых условий в заливе.

Спектральный анализ данных позволил в первом приближении оценить основные энергонесущие частоты (цикличность) и их порядок. Выделены периоды 2–3 года, 7–8, 11 и около 50 лет. При этом вклад высокочастотных флуктуаций, включающих чисто случайную компоненту и квазипериодические составляющие с периодами до 3 лет, оценивается в 30–35 % [7].

Пространственная изменчивость. Пространственные особенности распределения ледяного покрова, в частности сплоченности льда, хорошо отражены в распределениях их среднеквадратических отклонений и эмпирических (пространственных) ортогональных функций, формирующих эти отклонения и являющихся собственными векторами корреляционной матрицы аномалий поля сплоченности льда.

Временные составляющие при разложении ансамбля полей сплоченности льда по ЭОФ не анализировались, так как весь архив полей сплоченности еще не восстановлен и в нем есть пропуски.

Пространственная изменчивость сплоченности льда рассматривалась для периода максимального распространения льда (конец января–февраль [4, 7, 9]). Этот период, как правило, определяет дальнейший характер эволюции льда, и именно в этот период наиболее ярко проявляются основные особенности пространственной изменчивости полей ледовых характеристик.

Пространственная структура изменчивости сплоченности льда характеризуется наличием областей максимальных значений вдоль западного побережья зал. Петра Великого и в Уссурийском заливе (рис. 2, 3). Максимальные значения сплоченности в это время наблюдались в Амурском заливе. Повышенная изменчивость сплоченности льда обычно приурочена к зонам 4–6-балльной сплоченности, что, по-видимому, во многом связано с динамическими особенностями акватории [1].

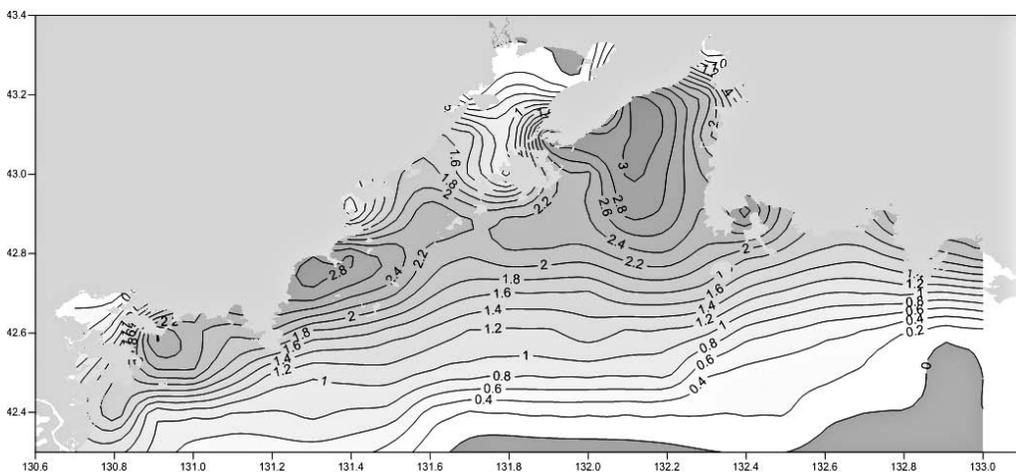


Рис. 2. Пространственное распределение изменчивости (среднеквадратических отклонений) сплоченности льда (в баллах) в период максимального развития ледяного покрова в зал. Петра Великого

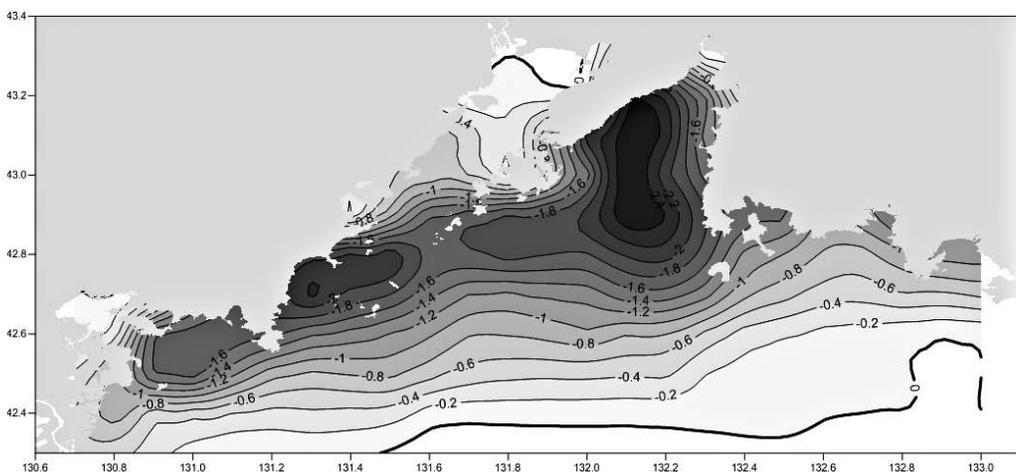


Рис. 3. Пространственное распределение изменчивости сплоченности льда (в баллах), определяемое первой ЭОФ (около 47%), в зал. Петра Великого

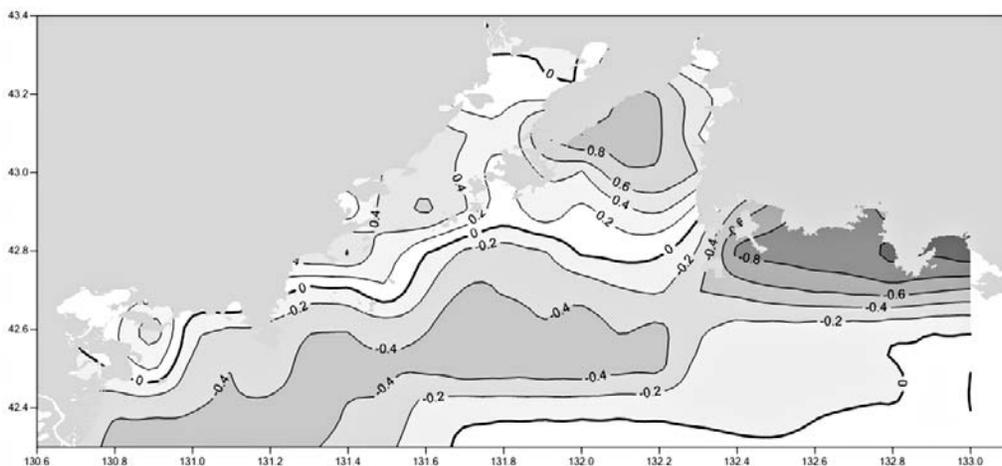


Рис. 4. Пространственное распределение изменчивости сплоченности льда (в баллах), определяемое второй ЭОФ (около 11%), в зал. Петра Великого

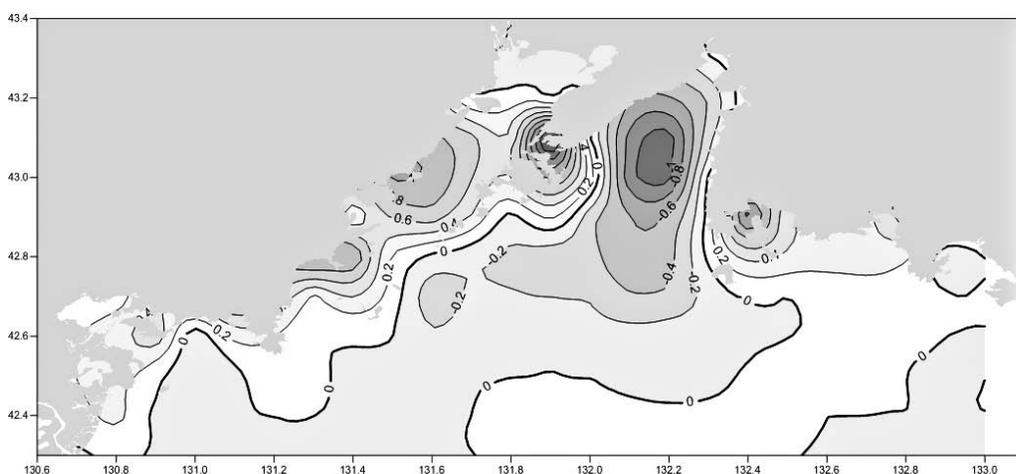


Рис. 5. Пространственное распределение изменчивости сплоченности льда (в баллах), определяемое третьей ЭОФ (около 6,6%), в зал. Петра Великого

Кроме того, определенный вклад в формирование пространственной структуры поля сплоченности льда (около 18%) вносят более мелкомасштабные разнонаправленные составляющие процесса изменчивости, которые наиболее активны в некоторых локальных зонах: в Уссурийском заливе, прибрежной зоне на западе зал. Петра Великого и зал. Восток (рис. 4, 5).

Заключение

Для акватории зал. Петра Великого сформирован архив ледовой и сопутствующей гидрометеорологической информации за почти вековой период (1917–2012 гг.). Архив включает сведения об основных параметрах ледового режима: ледовитости, положении кромки льда, полях сплоченности, возрасте и формах льда. Для восстановления недостающих значений параметров использовались методы многомерной статистики, что позволило получить непрерывные ряды ледовитостей за весь указанный период и набор

полей сплоченности льда за 30 лет, достаточный для статистического анализа пространственной изменчивости сплоченности льда в заливе.

Выявлена положительная тенденция роста ледовитости в заливе. На фоне этого наблюдаются внутрисезонные изменения характера процессов: активизация процессов льдообразования в декабре–марте и ускорение процессов разрушения льда в апреле.

Анализ пространственных составляющих (собственных векторов поля сплоченности льда) показывает наличие очагов, определяющих особенности пространственно-временной структуры ледяного покрова в зал. Петра Великого, – Уссурийский залив, прибрежная зона на западе зал. Петра Великого и зал. Восток.

Результаты проведенного исследования направлены на повышение эффективности гидрометеорологического (ледового) обеспечения морских отраслей народного хозяйства, а также на совершенствование моделей прогноза климата и погоды за счет более полного учета изменчивости ледовых условий на акватории зал. Петра Великого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидрология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 397 с.
2. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 56 с.
3. Петров А.Г., Стасюк Е.И. Характер льдообразования в экстремальные и близкие к ним зимние периоды на акватории залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2012. Вып. 154. С. 122–144.
4. Петров А.Г., Стасюк Е.И., Кислова С.И. Характеристика суровости зим в ледовом отношении и некоторые особенности ледового покрова залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. Владивосток: Дальнаука, 2012. Вып. 154. С. 101–121.
5. Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей // Дальневосточные моря России. Кн. 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 154–183.
6. Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 172 с.
7. Плотников В.В., Дубина В.А. Особенности ледяного покрова залива Петра Великого (по историческим и спутниковым данным) // Тр. Первой региональной конф. «Океанографические условия залива Петра Великого», Владивосток, 2–3 апр. 2012 г. Владивосток: ДВНИГМИ, 2012. С. 109–114.
8. Плотников В.В. Синтез разноплановой информации при формировании исторических архивов о ледовых условиях на ДВ морях // Современные информационные технологии для научных исследований: материалы Всерос. конф., Магадан, 20–24 апр. 2008 г. Магадан, 2008. С. 66–68.
9. Четырбоцкий А.Н., Плотников В.В. Ледяной покров Японского моря: анализ данных и моделирование. Владивосток: Дальнаука, 2005. 146 с.
10. Якунин Л.П. Атлас границ распространения и крупных форм льда дальневосточных морей СССР / под ред. А.С. Сергиенко. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1995. 58 с.
11. Якунин Л.П. Атлас ледовитости дальневосточных морей СССР. Владивосток: ПУГКС, 1987. 80 с.
12. Якунин Л.П. Ледовые исследования на дальневосточных морях // Тр. ДВНИГМИ. 1979. Вып. 77. С. 102–107.