

МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВИТОСТИ СЕВЕРНЫХ ПОЛЯРНЫХ МОРЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Л.Ф.БАДАШОВА, Е.А.МУРКИНА, А.В.ХОХЛОВА

ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск

Работа посвящена анализу многолетних тенденций изменения ледовитости акваторий северных полярных морей на основе еженедельных спутниковых данных. В работе использовались пять различных методов анализа трендов в многолетних временных рядах. Для каждого моря получены количественные оценки изменений площади морского льда. Показано, что за исследуемый период имело место общее уменьшение площади, занятой морским льдом. Выделены моря с максимальным изменением площади морского льда. Произведено сравнение методов анализа.

Ледовый покров Арктики занимает одну из ведущих ролей в формировании современного климата. Морской лед определяет тепловой баланс полярной области, отражательную способность постилающей поверхности. Кроме того, морской ледовый покров является важным элементом океанических течений. Жизнедеятельность и культура народов Севера также неразрывно связана с морским льдом. Изменение характеристик морского льда может повлечь за собой серьезные изменения климата, традиционного стиля жизни народов Арктики, дикой природы. В настоящее время исследованию различных параметров морского льда посвящено огромное количество научных работ. Наибольшее опасение вызывают выводы о стремительном сокращении площади морского льда, полученные повсеместно различными учеными [8, 9]. В этой связи решаются такие проблемы, как выявление причин таяния морских льдов [3], определение динамики таяния льда в арктических морях [2], анализ толщины ледового покрова, оценка альбедо на акватории арктического бассейна [7], анализ прогностических моделей ледовитости [8] и другие.

Исследования морского льда проводятся на основе различных данных (радиозондовых, спутниковых и др.). Преимуществом использования спутниковых данных является территориально-временная однородность получаемых оценок. Одним из известных спутниковых массивов по снегу и льду является продукция Национального центра данных по снегу и льду, США [5]. В 2007 г. выпущен глобальный обзор состояния снега и льда, включающий в себя научные исследования на основе этих и других спутниковых данных [9]. Согласно проведенным исследованиям, за последние три десятилетия наблюдается сокращение площади арктического морского льда на 8,9 % за десятилетие в сентябре и на 2,5 % за десятилетие в марте. Наибольшее уменьшение морского льда 10,5 % выявлено в Гренландском море.

Данные [5] известны также и в России, где используются для различных исследований, однако климатологических исследований ледового покрова на их основе проводилось не много [1, 4]. Целью настоящей работы является анализ многолетних изменений площади морского льда на акваториях арктических морей на основе данных [5].

Исходные данные представляют собой спутниковые еженедельные данные по морскому льду, произведенные в Национальном центре данных по снегу и льду (NSIDC, США) в рамках программы DMSP (Программа метеорологических оборонных спутников). Данные в файлах отражают наличие или отсутствие морского льда на сетке равных площадей EASE-Grid 25×25 км в Северном полушарии в течение 1978–2005 гг.

В качестве исследуемого региона выбрано тринадцать Северных морей: Балтийское, Баренцево, Баффина, Белое, Берингово, Бофорта, Восточно-Сибирское, Гренландское, Карское, Лаптевых, Норвежское, Охотское, Чукотское.

Работа выполнена на основе исследования временных рядов для различных арктических морей по морскому льду, построенных из данных с различной степенью временного и пространственного осреднения.

Для оценки многолетних линейных трендов временных рядов использовались пять методов: *МНК*, являющийся основным способом оценки параметров классической модели линейной регрессии, а также четыре метода, применяющиеся в модели робастной регрессии, – *М*-оценка, *ММ*-оценка, *LTS*-оценка и *S*-оценка. Модель робастной регрессии позволяет обнаружить выбросы (ошибки в измерениях) и при наличии выбросов в измерениях обеспечивает более стабильные результаты, нежели классическая модель линейной регрессии. *М*-оценка является одним из простейших подходов к решению проблемы, как теоретически, так и практически. Хотя эта методика неустойчива по отношению к регрессорам, она все же интенсивно используется при анализе данных, для которых допустимо наличие выбросов в *у*-области. *LTS*-оценка (*УНК*-оценка) – это методика, использующая метод высокого критического значения. Под критическим значением понимается предельный размер доли выборок, значения которой равны бесконечности, при котором метод оценивания все еще сохраняет свою устойчивость. *S*-оценка также является методикой, использующей метод высокого критического значения. Однако, при одинаковом критическом значении, эта методика является более статистически эффективной, нежели *LTS*-оценка. *ММ*-оценка является комбинацией двух методов: оценки высокого критического значения и *М*-оценки. У этой методики есть два значительных преимущества перед *S*-оценкой: наличие более хороших свойств относительно критического значения, а также более высокая статистическая эффективность [9, 10].

Построение временных рядов

С помощью специально разработанного программного комплекса временной ряд за 1978–2005 гг. по морскому льду с еженедельным разрешением может быть построен для любого региона Северного полушария.

На основе единой методики были построены временные ряды для соответствующих морей по морскому льду, нормированные на общее количество пикселей с водой в каждом море:

$$S_j = \frac{1}{Ns_j} \sum_{n=1}^{N_j} s_n .$$

Здесь *j* – номер моря, *s_n* – значения, обозначающие наличие или отсутствие морского льда в пикселе *n* внутри региона, *Ns_j* – количество пикселей, приходящихся на воду в море, *S_j* – результирующий ряд.

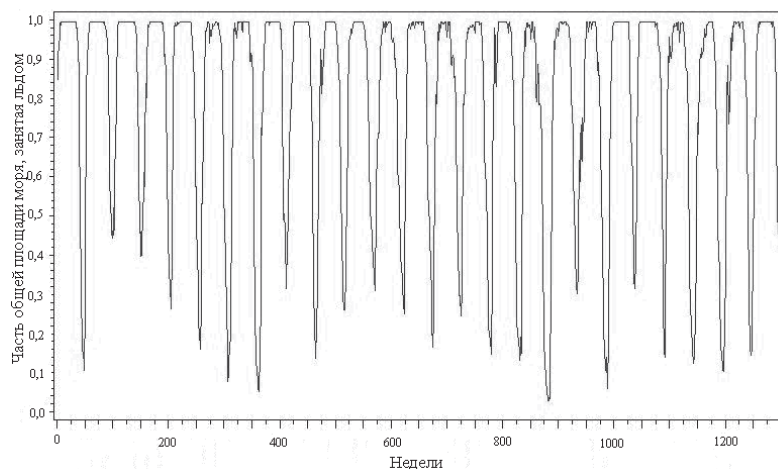


Рис. 1. Временной ход морского льда в Карском море с разрешением 1 неделя

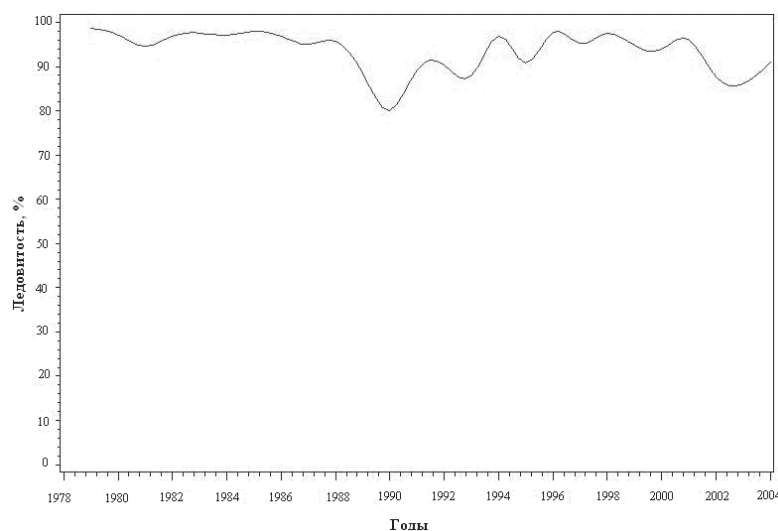


Рис. 2. Временной ход среднегодовой ледовитости (в %) для Восточно-Сибирского моря

Полученные в результате ряды характеризуют временной ход с недельным разрешением суммарного покрытия льдом для соответствующего моря. Значение 1 означает, что вся водная поверхность покрыта льдом. Промежуточные величины показывают, какая часть суммарной водной поверхности занята льдом. На рис. 1 приведен временной ход морского льда для Карского моря.

Также было проведено временное осреднение рядов. Таким образом, зависимая переменная ряда представляет собой средний за год (календарный) процент площади моря, покрытого льдом, то есть за 100 % принимается ситуация, когда вся возможная площадь воды региона в течение круглого года занята льдом. На рис. 2 приведен временной ход таких среднегодовых значений для Восточно-Сибирского моря.

Полученные результаты

В ходе проделанной работы были получены оценки трендов для различных морей. Тренды и стандартные ошибки, посчитанные различными методами, представлены в табл. 1. На рис. 3 представлена диаграмма распределения трендов, посчитанных различными методами, по морям.

Тренды представлены преимущественно отрицательными значениями, что указывает на сокращение площади ледового покрова морей. Максимальное сокращение площади морского льда наблюдается в море Баффина, Белом и Гренландском морях. Значительное сокращение площади морского льда наблюдается также в Балтийском, Баренцевом, Карском и Восточно-Сибирском морях.

Наиболее сильно от других отличаются тренды, вычисленные методом *LTS*-оценки. Между другими методами наблюдается большая согласованность, и различия между оценками в основном не превышают значений стандартной ошибки. Значения стандартных ошибок достаточно велики, а для моря Лаптевых даже превышают абсолютные значения трендов.

Таблица 1

Море	Trend		StrErr		Trend		StrErr		Trend	
	<i>Trend_reg</i>	<i>StdErr_reg</i>	<i>Trend_m</i>	<i>StdErr_m</i>	<i>Trend_lts</i>	<i>Trend_mm</i>	<i>StdErr_mm</i>	<i>Trend_s</i>	<i>StdErr_s</i>	
Баффина	-3,6	1,1	-3,6	1,1	-6,4	-3,6	1,1	-3,7	1,3	
Балтийское	-3,4	1,0	-3,3	1,1	-2,5	-3,2	1,1	-3,0	1,2	
Баренцево	-3,5	1,5	-3,4	1,6	-1,7	-3,2	1,7	-3,0	1,8	
Белое	-3,91	1,1	-4,1	1,1	-4,2	-4,2	1,1	-4,2	1,1	
Берингово	-0,3	0,4	-0,3	0,4	1,0	-0,3	0,4	-0,3	0,5	
Бофорта	-2,9	1,6	-2,2	1,4	-3,0	-2,0	1,4	-2,1	1,5	
Чукотское	-1,7	0,7	-1,9	0,7	-2,4	-2,0	0,6	-2,0	0,7	
Карское	-2,7	1,3	-2,7	1,3	-4,7	-2,8	1,3	-3,0	1,3	
Лаптевых	-1,3	1,1	-1,3	1,1	-2,4	-1,2	1,2	-1,2	1,2	
Охотское	-1,3	0,7	-1,1	0,7	-0,5	-1,1	0,7	-0,9	0,7	
Восточно-Сибирское	-2,3	1,2	-2,4	1,0	-1,5	-2,4	1,0	-2,4	1,1	
Гренландское	-3,1	0,8	-3,4	0,8	-3,5	-3,4	0,8	-3,6	0,9	
Норвежское	-0,2	0,0	-0,2	0,0	-0,2	-0,2	0,0	-0,2	0,0	

* *Trend_reg*, *StdErr_reg* – метод наименьших квадратов, *Trend_m*, *StdErr_m* – *M*-оценка, *Trend_lts* – *LTS*-оценка, *Trend_mm*, *StdErr_mm* – *MM*-оценка, *Trend_s*, *StdErr_s* – *S*-оценка

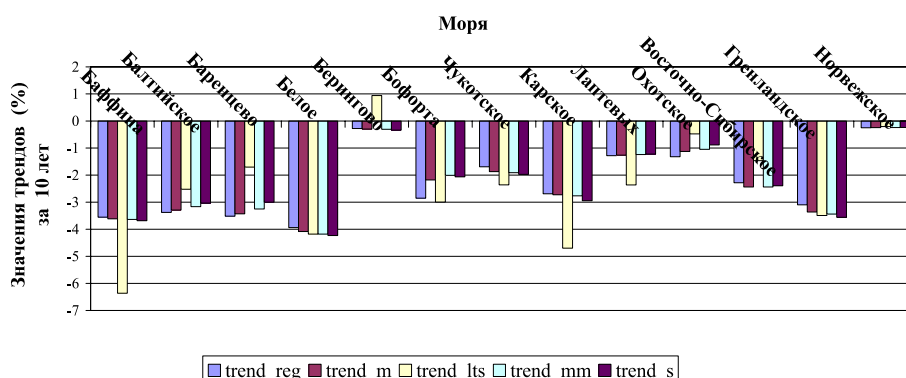


Рис. 3. Распределение трендов, вычисленных различными методами, по морям. Обозначения методов такие же, что и в табл. 1

С помощью специально разработанных методик и программных средств были построены и проанализированы многолетние временные ряды по морскому льду для акваторий арктических морей. Различными методами получены количественные оценки изменений площади морского льда, а также произведено сравнение этих методов. В качестве рекомендованного метода для проведения анализа трендов временных рядов по льду можно выбрать стандартный метод, то есть метод наименьших квадратов.

Показано, что за исследуемый период времени имело место общее уменьшение площади, занятой морским льдом. Максимальное сокращение площади морского льда наблюдается в море Баффина, Белом и Гренландском морях.

1. *Бадашова Л.Ф., Муркина Е.А., Тимофеев А.А., Хохлова А.В.* Обработка массива спутниковых данных по снегу и морскому льду для получения климатических оценок // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2007. Вып. 172. С. 185–200.
2. *Белчанский Г.И., Платонов Н.Г.* Динамика таяния льда в арктических морях: Всемирная конференция по изменению климата. Москва, 29 сентября–3 октября 2003 г. Тезисы докладов. М.: НИЦ «Планета», 2003. С. 377.
3. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е.* Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–15.
4. *Муркина Е.А., Бадашова Л.Ф., Хохлова А.В.* Оценки многолетней изменчивости снежного и ледового покрова по спутниковым данным: Материалы Международной конференции CITES-2007, 14–25 июля 2007 г., Томск // Вычислительные технологии. 2007. Издательский центр Института вычислительных технологий СО РАН (в печати).
5. *Armstrong R.L., Brodzik M.J.* Northern Hemisphere EASE-Grid weekly snow cover and sea ice extent version 3. USA: National Snow and Ice Data Center, Boulder. 2005 (Digital media).
6. *Huber P.J.* Robust statistics. John Wiley and Sons. New York, NY, USA, 1981. (Русский перевод: Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир 1984. 303 с.)
7. *Laine V.* Arctic sea ice regional albedo variability and trends, 1982–1998 // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. № C6. C06027, doi:10.1029/2003JC001818.
8. *Stroeve J., Holland M., Meier W., Scambos T., Serreze M.* Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. № 9, L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
9. UNEP. Global Outlook for Ice and Snow. United Nations Environment Programme Publications, 2007. 235 p.
10. *Yohai V.J.* High breakdown point and high efficiency robust estimates for regression // Annals of Statistics. 1987. P. 642–656.

L.F.BADASHOVA, E.A.MURKINA, A.V.KHOKHLOVA

LONG-TERM TRENDS OF ICE COVER VARIATIONS FOR NORTH POLAR SEAS ON THE SATELLITE DATA

Based on the weekly satellite data set, this work studies analysis of long-term ice cover variations for north polar seas. Five different methods were used for multi-year time series trend analysis. The quantitative estimates of area changes of sea ice were obtained for every sea. The total decrease of sea ice extent took place for the period. Seas with maximal decrease of sea ice cover were detected. Used methods were compared.