

## Оценки многолетней изменчивости снежного и ледового покрова по спутниковым данным

Е. А. МУРКИНА, Л. Ф. БАДАШОВА, А. В. ХОХЛОВА  
*Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации —  
Мировой центр данных, Обнинск, Россия*  
e-mail: r620@meteo.ru

Based on a long-term satellite data set, this work addresses variability of snow cover and sea ice in the Northern Hemisphere. Investigation was conducted for the case of four Western Siberian regions and thirteen arctic seas. Five different methods were used for trend analysis of the multi-year time series. Snow cover and sea ice thickness are decreased in the examined regions during that period. Regions with maximal decrease of snow and sea ice cover were detected. The employed methods were compared with each other.

### Введение

Снежный и ледовый покров имеет важное значение в процессах климатообразования. В частности, отражающая и поглощающая способность подстилающей поверхности, тепловой баланс, уровень воды рек и океанов в значительной степени определяются такими составляющими климатической системы, как снежный покров и морской лед. Изменение состояния снега и льда оказывает влияние практически на все стороны человеческой деятельности, животный и растительный мир.

В течение последних нескольких десятилетий произошло существенное сокращение общего объема и площади снега и льда, особенно в Северном полушарии [1, 2]. Группы исследователей отмечают, что потепление в арктическом регионе, сопровождающееся сокращением площади и толщины морского льда, происходит в два раза быстрее, чем в остальной части мира [2]. В этой связи рассматриваются различные параметры снега и льда, в том числе продолжительность залегания снежного покрова [3], общая динамика снежного покрова [4], кроме того, выполняются оценки альбедо на акватории арктического бассейна [5] и анализ прогностических моделей ледовитости [6].

Целью настоящей работы является получение по спутниковым данным оценок многолетних изменений площади морского льда на акваториях арктического бассейна, а также площади снежного покрова на территории Западной Сибири [7]. Использование спутниковой информации дает возможность учитывать одновременно и пространственные, и временные характеристики, т. е. определять не только начало установления и окончания снежного сезона в отдельных пунктах наблюдения, но и общую площадь, занятую снежным покровом в различные времена сезона, а также общую продолжительность снежного сезона. Используемый массив спутниковых данных [7] широко из-

вестен, однако в России климатологических исследований снежного и ледового покрова на его основе проводилось не много [8, 9].

## 1. Исходные данные

Для анализа был взят массив спутниковых еженедельных данных по снежному покрову и морскому льду, полученных в Национальном центре данных по снегу и льду (NSIDC, США) в рамках программы DMSP (Программы метеорологических оборонных спутников). Данные в файлах отражают наличие или отсутствие снежного покрова и морского льда на сетке равных площадей EASE-Grid  $25 \times 25$  км в Северном полушарии в течение 1966–2005 гг.

Работа выполнена на основе исследования временных рядов для четырех квадратов  $5 \times 5^\circ$  на территории Западной Сибири ( $70-75^\circ\text{E}$ ,  $50-55^\circ\text{N}$ ;  $80-85^\circ\text{E}$ ,  $50-55^\circ\text{N}$ ;  $85-90^\circ\text{E}$ ,  $50-55^\circ\text{N}$ ;  $85-90^\circ\text{E}$ ,  $55-60^\circ\text{N}$ ) по снежному покрову и для различных арктических морей (Балтийское море, Баренцево море, море Баффина, Белое море, Берингово море, море Бофорта, Восточно-Сибирское море, Гренландское море, Карское море, море Лаптевых, Норвежское море, Охотское море, Чукотское море) по морскому льду, построенных из данных с различной степенью временного и пространственного осреднения.

## 2. Используемые методы

Для оценки многолетних линейных трендов временных рядов использовалось пять методов: метод наименьших квадратов (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 с теоретической, так и с практической точек зрения. Хотя эта методика неустойчива по отношению к регрессорам, она все же интенсивно используется при анализе данных, для которых допустимо наличие выбросов в  $y$ -области.

**LTS-оценка** (или оценка метода усеченных наименьших квадратов) — это методика, использующая оценку высокого критического значения. Под критическим значением понимается предельный размер доли выборки, значения которой равны бесконечности, при котором метод оценивания все еще сохраняет свою устойчивость.

**S-оценка** использует высокое критическое значение. Однако при одинаковом критическом значении эта методика более статистически эффективна, 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 [10, 11].

## 3. Анализ временных рядов

**Построение временных рядов.** С помощью специально разработанного программного комплекса временные ряды за 1966–2005 гг. по снежному покрову и за 1978–2005 гг.

по морскому льду с еженедельным разрешением могут быть построены для любого региона Северного полушария. С использованием единой методики построены временные ряды для соответствующих квадратов по снежному покрову и соответствующих морей по морскому льду, нормированные на общее количество пикселей с суши (водой) в каждом квадрате (море):

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

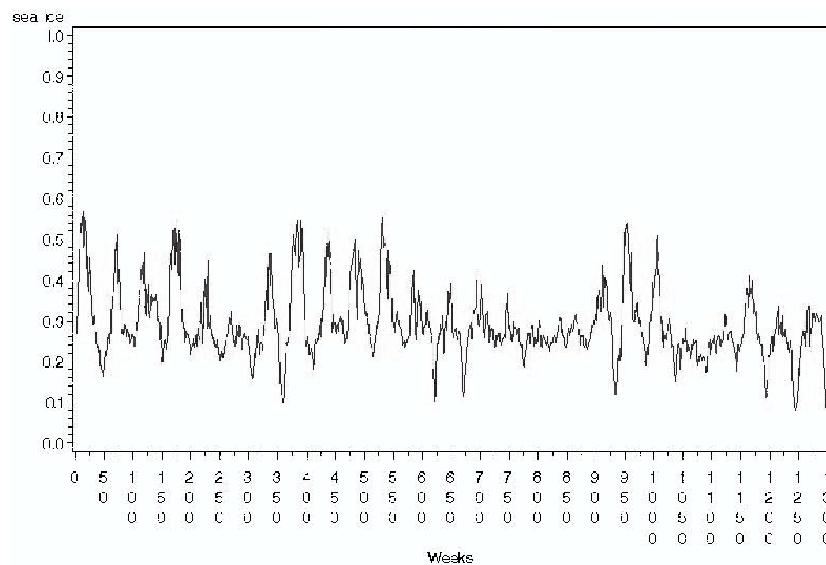


Рис. 1. Временной ход морского льда в Гренландском море: по осям — сквозной номер недели и суммарное количество пикселей со льдом, нормированное на количество пикселей с водой в данном регионе

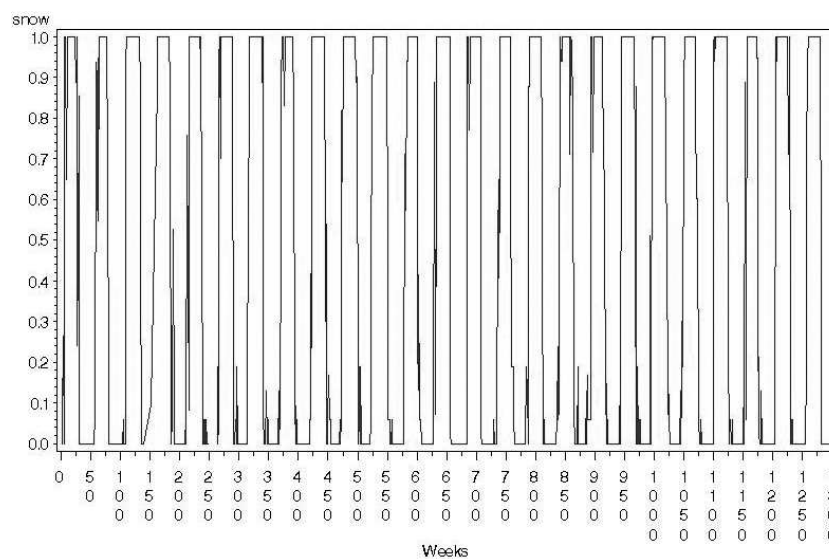


Рис. 2. Временной ход снежного покрова в квадрате 80 – 85°E, 50 – 55°N: по осям — сквозной номер недели и суммарное количество пикселей со снегом, нормированное на количество пикселей с суши в данном квадрате

Здесь  $j$  — номер квадрата (моря);  $s_n$  обозначает наличие или отсутствие снежного покрова (морского льда) в пикселе  $n$  внутри региона,  $Ns_j$  — количество пикселей, приходящихся на сушу в квадрате (воду в море),  $S_j$  — результирующий ряд.

Полученные ряды характеризуют временной ход с недельным разрешением суммарного покрытия снежным покровом для соответствующего квадрата или льдом для соответствующего моря. Значение 1 означает, что весь квадрат покрыт снегом или вся водная поверхность покрыта льдом. Промежуточные величины показывают, какая часть суммарной поверхности суши занята снегом или водной поверхности занята льдом. На рис. 1 приведен временной ход морского льда для Гренландского моря, а на рис. 2 — временной ход снежного покрова для одного из квадратов.

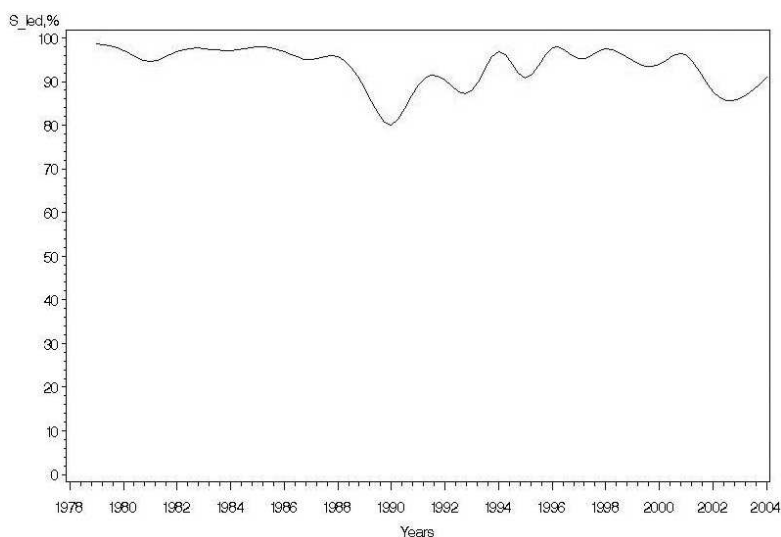


Рис. 3. Временной ход процента среднегодового значения площади, занятой морским льдом, для Восточно-Сибирского моря: по осям — год и процент среднегодовой площади морского льда для данного моря

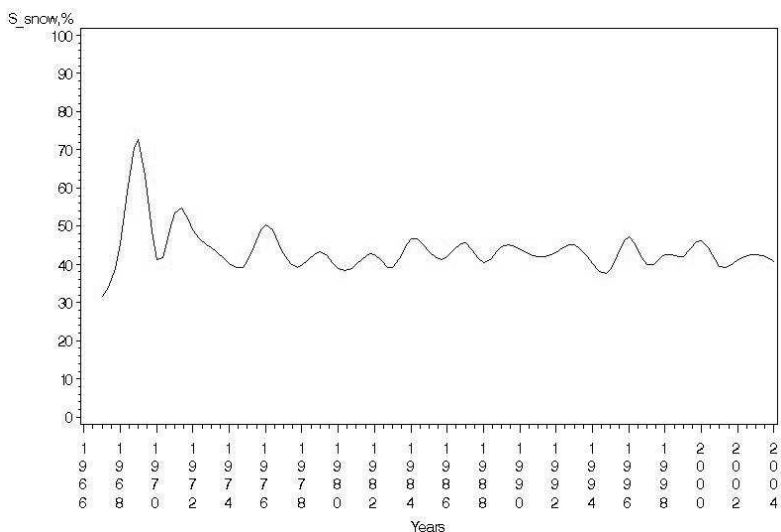


Рис. 4. Временной ход процента среднегодового значения площади, занятой снегом, для квадрата  $70 - 75^\circ\text{E}$ ,  $50 - 55^\circ\text{N}$ . По осям — год и процент среднегодовой площади снежного покрова для соответствующего квадрата

Проведено временное осреднение рядов. Таким образом, зависимая переменная ряда представляет собой среднюю календарную за год долю площади квадрата, покрытую снегом (площади моря, покрытого льдом), т.е. за 100% принимается ситуация, когда вся возможная площадь квадрата в течение круглого года занята снегом (площадь воды региона занята льдом). На рис. 3 приведен временной ход таких среднегодовых значений для Восточно-Сибирского моря, а рис. 4 — временной ход среднегодовых значений для одного из квадратов.

### Полученные результаты.

В ходе проделанной работы получены оценки трендов для четырех квадратов (по снегу) и для различных морей (по льду). Тренды и стандартные ошибки, посчитанные различными методами, представлены в табл. 1 и 2 для льда и снега соответственно. Здесь использовались обозначения: trend\_reg, StdErr\_reg — метод наименьших квадратов, trend\_m, StdErr\_m — М-оценка, trend\_lts — LTS-оценка, trend\_mm, StdErr\_mm — ММ-оценка, trend\_s, StdErr\_s — S-оценка.

На рис. 5 приведена диаграмма распределения трендов по морям, а на рис. 6 — диаграмма распределения трендов по квадратам. Тренды представлены преимущественно

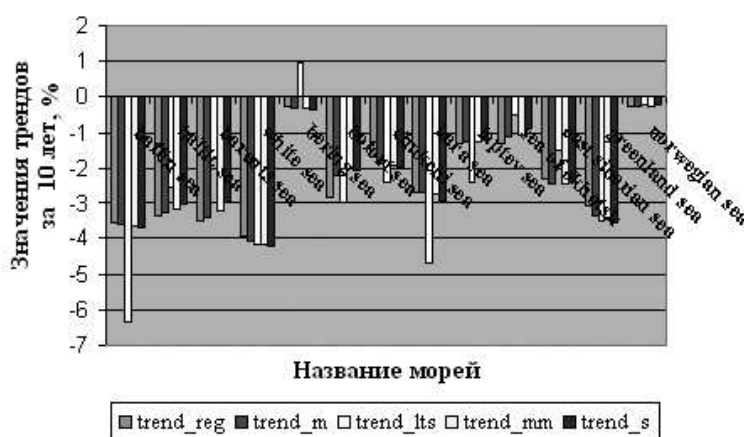


Рис. 5. Распределение трендов по морям, вычисленных различными методами, обозначения методов такие же, что и в табл. 2

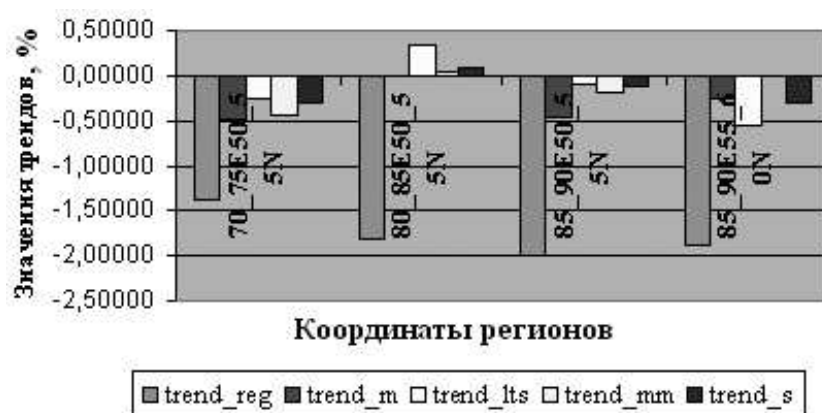


Рис. 6. Распределение трендов по квадратам, вычисленных различными методами, обозначения методов такие же, что и в табл. 2

Т а б л и ц а 1. Значения трендов (trend) по льду, вычисленные разными методами, и стандартных ошибок (StrErr) за 10 лет\*, %

Море	trend_red	StdErr_red	trend_m	StdErr_m	trend_lts	trend_mm	StdErr_mm	trend_s	StdErr_s
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

Т а б л и ц а 2. Значения трендов (trend) по снегу, вычисленные разными методами, и стандартных ошибок (StrErr) за 10 лет\*, %

Регион	trend_red	StdErr_red	trend_m	StdErr_m	trend_lts	trend_mm	StdErr_mm	trend_s	StdErr_s
70_75E50_55N	-1.4	0.9	-0.5	0.5	-0.3	-0.4	0.5	-0.3	0.5
80_85E50_55N	-1.8	0.9	-0.0	0.4	0.3	0.0	0.5	0.1	0.5
85_90E50_55N	-0.2	0.9	-0.4	0.5	-0.1	-0.2	0.5	-0.1	0.6
85_90E60_55N	-1.9	1.0	-0.3	0.5	-0.5	-0.3	0.5	-0.3	0.6

отрицательными значениями, что указывает на сокращение площади снежного и ледового покрова. 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, а максимальное сокращение площади снежного покрова — в квадрате  $70-75^{\circ}\text{E}$ ,  $50-55^{\circ}\text{N}$ .

Наиболее сильно от других отличаются тренды по льду, вычисленные методом LTS-оценки. Между другими методами наблюдается большая согласованность, и различия между оценками в основном не превышают значений стандартной ошибки. Наиболее сильно от других отличаются тренды по снегу, вычисленные методом наименьших квадратов, что может быть связано с наличием выбросов во временных рядах. Между робастными методами наблюдается согласованность.

Значения стандартных ошибок достаточно велики, а для моря Лаптевых, так же как и для некоторых квадратов, даже превышают абсолютные значения трендов.

## Заключение

С помощью специально разработанных методик и программных средств построены и проанализированы многолетние временные ряды по снежному покрову в квадратах  $5 \times 5^{\circ}$  на территории Западной Сибири и по морскому льду для акваторий арктических морей. Различными методами получены количественные оценки изменений площади и продолжительности снежного покрова и 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, т.е. метод наименьших квадратов, для проведения анализа трендов временных рядов по снегу (учитывая возможное наличие выбросов в рядах) наиболее подходит метод ММ-оценки.

В ходе работы выделены регионы с различными тенденциями многолетних изменений параметров снежного покрова. Показано, что за исследуемый период имело место общее уменьшение площади, занятой морским льдом. Максимальное сокращение площади морского льда наблюдается в море Баффина, Белом и Гренландском морях. Максимальное сокращение площади снежного покрова наблюдается в квадрате  $70-75^{\circ}\text{E}$ ,  $50-55^{\circ}\text{N}$ .

## Список литературы

- [1] SERREZE M.C., WALSH J.E.1., CHAPIN F.S. Observational evidence of recent change in the Northern High-Latitude environment // *Clim. Change*. 2000. Vol. 4. P. 159–207.
- [2] GLOBAL Outlook for Ice and Snow / UNEP, 2007.
- [3] КИТАЕВ Л.М., РАДИОНОВ В.Ф., ФОРЛАНД Э. и др. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова на севере Евразии в условиях современных изменений климата // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 11. С. 65–73.
- [4] ЛОКОЩЕНКО М.А. Снежный покров и его современные изменения в Москве // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 6. С. 71–83.
- [5] LAINE V. Arctic sea ice regional albedo variability and trends, 1982–1998 // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109.

- [6] STROEVE J., HOLLAND M., MEIER W. ET AL. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34.
- [7] 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, CO, 2005.
- [8] 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 // Тр. ВНИИГМИ-МЦД /ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск, 2007. Вып. 172.
- [9] BADASHOVA L.F., MURKINA E.A., TIMOFEEV A.A., KHOKHLOVA A.V. Long-term trends for variations in snow cover and sea ice determined over the Russian territory from satellite data // Inten. Conf. on Environmental Observations. Tomsk, 2006.
- [10] HUBER P.J. Robust Statistics. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [11] YOHAI V.J. High breakdown point and high efficiency robust estimates for regression // Annals of Statistics. 1987. Vol. 15. P 642–656.

*Поступила в редакцию 21 февраля 2008 г.*