

Регрессионная модель изменения ледовитости Белого моря

В.Н. Баклагин

Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск

Аннотация: В работе описана регрессионная модель изменения ледовитости Белого моря, полученная на основе спутниковых данных NSIDC. Изменения ледовитости Белого моря математически описано полиномом 6-ой степени, качество которого характеризуется коэффициентом детерминации 0.78. На основе полученной математической модели установлены сроки и длительности фаз ледового режима Белого моря, а также дан анализ скорости формирования и разрушения ледовых образований.

Ключевые слова: ледовитость, ледовые явления, регрессионная модель, Белое море, спутниковые данные NSIDC.

Введение

Лед является индикатором изменения глобального и регионального климата, поэтому исследования ледового режима различных водоемов, в том числе, морей, является важной экологической задачей [1 – 5].

Исследование протекания ледового режима водоемов в большинстве случаев сводится к анализу изменений площадных характеристик льда во времени, либо ледовитости (части акватории, покрытой льдом). Поэтому знания об изменениях ледовитости во время фаз замерзания и вскрытия важны для оценки характера протекания ледового режима в целом.

В связи с этим очень важно иметь информацию о ледовых явлениях на всей акватории водоема, а не только с отдельного поста наблюдения, расположенного на берегу. Ледовая ситуация на водоеме во время замерзания и вскрытия может менять очень быстро (например, изменения ледовитости Белого моря могут составлять 0.1-0.3/день). Поэтому для анализа протекания ледового режима водоемов необходимо иметь данные на каждый день.

Современные методы получения информации о различных характеристиках поверхности Земли, в том числе о состоянии ледяного

покрова водоемов, предполагает использование спутниковых данных [6 – 10]. Датчики спутников (MODIS, VIIRS, AIRS, MISR и многие другие) ежедневно выполняют многозональную съемку местности в различных диапазонах электромагнитной волны (видимом, инфракрасном, микроволновом) в течение нескольких последних лет (10-25 лет).

С высокой точностью можно рассчитать ледовитость озер визуально-экспертной оценкой, исходя из спутниковых снимков датчика MODIS [11], выполненных в видимом диапазоне (синтезированные RGB-изображения), обладающих высоким пространственным разрешением (до 250 метров в открытом доступе: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data>). Однако в большинстве случаев выполнить расчет ледовитости озер по спутниковым снимкам видимого диапазона невозможно из-за наличия облачности.

В настоящее время существуют многосенсорные СВЧ-радиометры, которые могут выполнять многозональную съемку в микроволновом диапазоне (ASMU-A, ATMS, AVHRR, MODIS, VIIRS и другие). Это позволяет ежедневно фиксировать сцену вне зависимости от облачности. Результатом автоматического картирования многозональных снимков этих систем являются данные о снежном и ледяном покрове планеты. Несмотря на сравнительно невысокое пространственное разрешение (4-6 км), данные применимы для расчета ледовитости крупных озер (Онежское, Ладожское озера и многие другие) и морей (например, Белого моря).

Материалы и методы

Спутниковые данные, используемые в данном исследовании, представлены Национальным центром США по снегу и льду NSIDC (<ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02156/>). Этот набор данных обеспечивает карты снежного покрова и ледяного покрова для Северного полушария с февраля 1997 года по настоящее время в интерактивной мультисенсорной системе отображения снежного и ледового центра (IMS)

Национального ледового центра. Он получен из множества продуктов данных, включая спутниковые снимки и данные на месте. Данные представлены в форматах ASCII и GeoTIFF в трех разных разрешениях: 1 км, 4 км и 24 км.

В настоящем исследовании для построения регрессионной модели ледовитости Белого моря применялись данные NSIDC о пространственном распределении льда за период 2004-2017 гг. с пространственным разрешением 4 км и временным шагом – 1 день.

Расчет ледовитости Белого моря осуществлялся для каждого момента времени, на который имелись спутниковые данные путем расчета сумм площадей всех однородных участков (льда и воды), соответствующих географическим координатам акватории Белого моря. Для более точного соответствия идентификация акватории Белого моря по географическим координатам производилась по сетке с пространственным разрешением 1 км.

Полученный ряд значений ледовитости (рис. 1) подвергался регрессионному анализу, где в качестве независимой переменной выступал порядковый номер дня в году t , начиная с первого сентября.

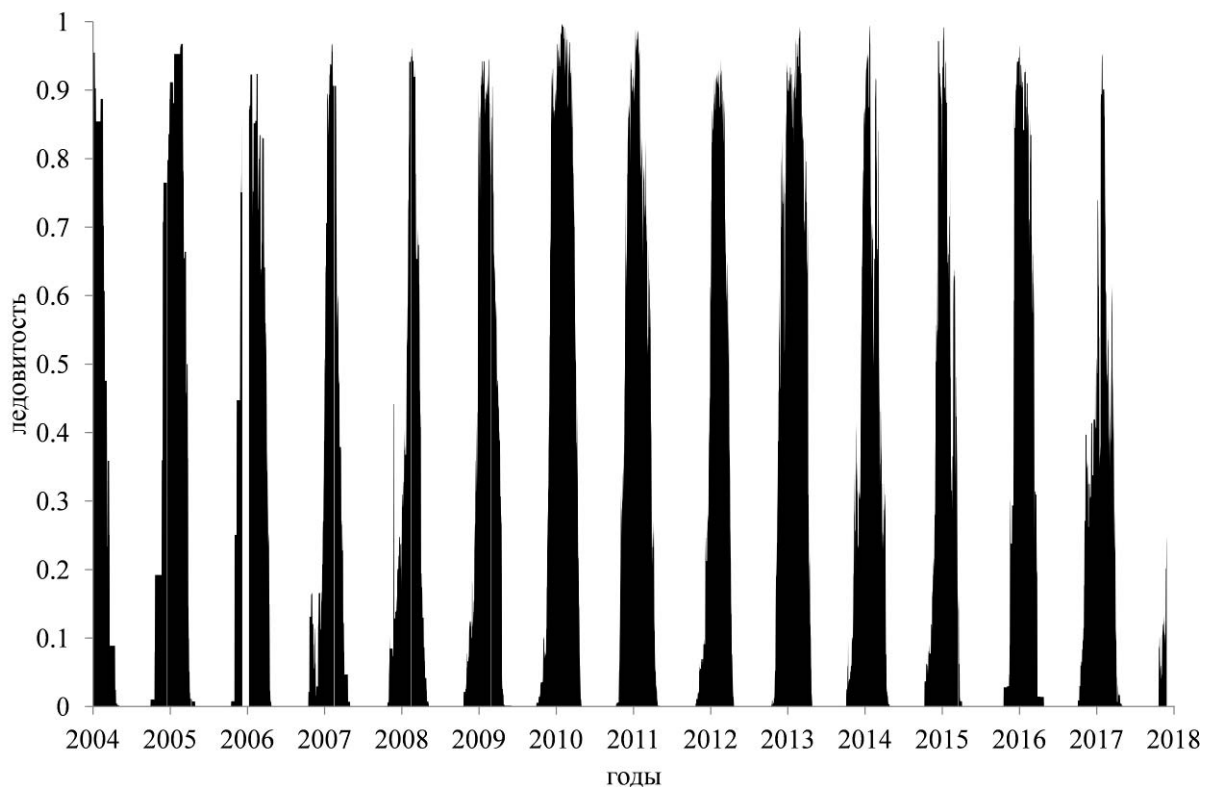


Рис. 1. – Изменение ледовитости Белого моря за период 2004-2017 гг. по спутниковым данным NSIDC

Для анализа использовались только превышающие 0 значения ледовитости, чтобы исключить влияние нулевых значений на ход аппроксимирующей функции.

При этом аппроксимация полиномом группированных данных осуществлялась в интервале времени, где значения аппроксимируемой функции превышали либо равны 0 ($f(t) \geq 0$).

Результаты и обсуждения

На основании регрессионного анализа сгруппированных данных спутниковых наблюдений за ледяным покровом Белого моря (рис. 2) установлены параметры полинома 6-ой степени наиболее точно описывающего изменения ледовитости Белого моря в период протекания ледовых явлений.

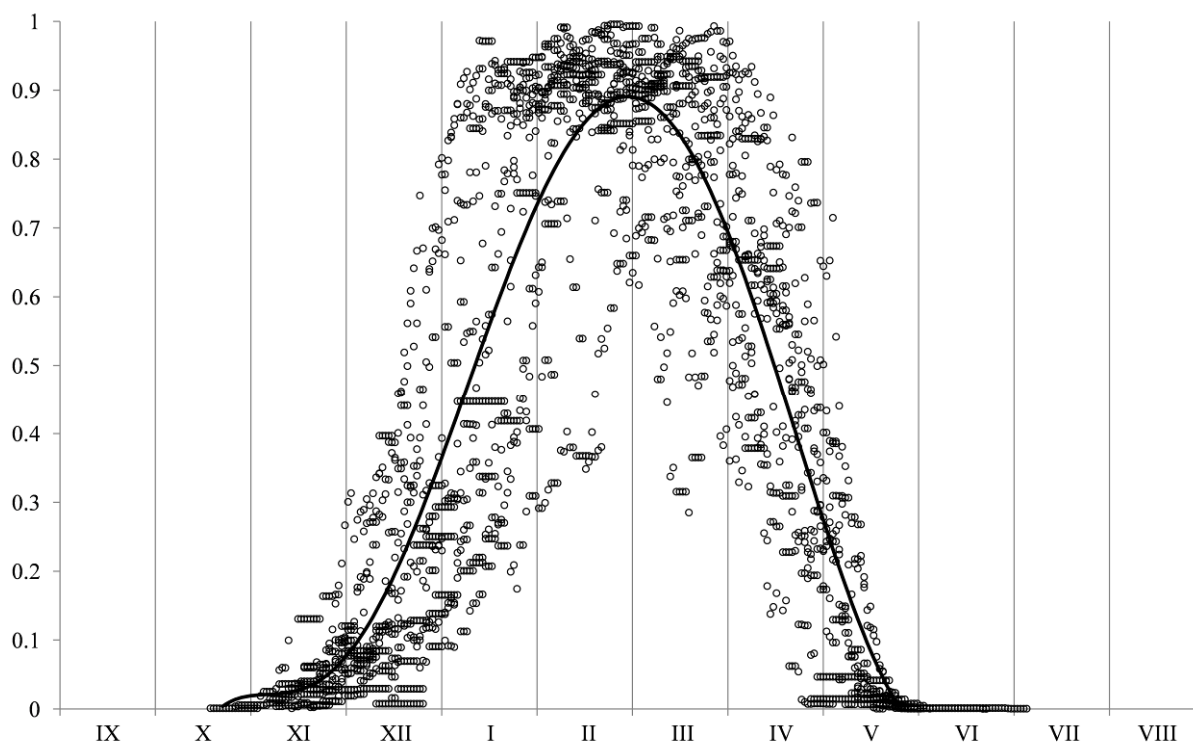


Рис. 2. – Значения ледовитости Белого моря за период 2006-2017 гг. по спутниковым данным NSIDC и график аппроксимирующей функции.

В ходе первичного анализа данных были отброшены данные за интервал времени 2004-2005 гг. в связи с тем, что в этот период по спутниковым данным NSIDC на акватории Белого моря имели место ледовые явления в летнее время. Данный факт не соответствует действительности, поскольку акватория Белого моря в летнее время полностью освобождает ото льда. Данный факт объясняется погрешностью в автоматическом дешифрировании используемых в настоящем исследовании спутниковых данных. Несмотря на то, что площадь ледовых образований в летнее время незначительная, данные были исключены ввиду ошибочного влияния на расчеты параметров полинома аппроксимирующей функции.

Уравнение полинома аппроксимирующей функции имеет вид:

$$f(t) = -3.1242 \cdot 10^{-13} \cdot t^6 + 3.5100 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 - 1.4980 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 \\ + 3.0335 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 3.0117 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 1.4266 \cdot 10^{-1} \cdot t \\ - 2.5685$$

Коэффициент детерминации полученной модели составляет 0.78. Стандартная ошибка для оценки $f(t)$ составляет 16.8%.

Анализ полученной модели изменения ледовитости Белого моря показал, что длительность периода ледовых явлений на Белом море составляет 216 дней, из которых 130 дней площади ледовых образований увеличиваются (замерзания акватории), и 86 дней происходит уменьшение площадей ледовых образований (вскрытие акватории). При этом начало ледовых явлений на Белом море согласно модели приходится на 22-ое октября, а конец – на 26-ое мая. Максимальное значение ледовитости достигается 1-го марта.

Таким образом, скорость вскрытия примерно в 1.5 раза выше скорости замерзания акватории озера. Данный факт согласуется с результатами, полученными для Онежского и Ладожского озер (находящихся в близких географических широтах с Белым морем) [1, 3], несмотря на то, что на протекание ледового режима Белого моря значительное влияние оказывают приливные и отливные явления. При этом скорость формирования ледовых образований в течение замерзания неоднородно. Согласно полученной модели первые 10% акватории Белого моря покрываются льдом в течение 44 дней с момента начала замерзания, еще через 37 дней покрывается 50% акватории Белого моря. Еще через 49 дней площадь ледовых образований достигает своего максимума.

Выводы

Получена математическая модель изменения ледовитости Белого моря высокого качества (коэффициент детерминации 0.78) на основании анализа и

группировки спутниковых данных NSIDC. На основе разработанной модели, установлено, что скорость формирования ледовых образований на акватории Белого моря значительно меньше (в 1.5 раза), чем скорость их разрушения. Данный факт согласуется с результатами, полученных для крупных озер (Онежского и Ладожского озер), находящихся в близких географических широтах.

Благодарность за финансовую поддержку работы

Исследование выполнено в рамках госзадания ФАНО России, тема № 86 «Закономерности изменений экосистем Белого моря при интенсификации освоения Арктической зоны региона и под влиянием изменений климата», № государственной регистрации (0223-2015-0008) **2018-2019-2020** гг.

Литература

1. Baklagin V.N. Selection of Parameters and Architecture of Multilayer Perceptrons for Predicting Ice Coverage of Lakes // *Ekológia (Bratislava)* – 2017. - Vol.36 - № 3 - pp. 226–234.
 2. Clark P.U., Alley R.B., Pollard D. Northern Hemisphere Ice-Sheet Influences on Global Climate Change // *Science* – 1999. - Vol.286 - № 5442 - pp. 1104–1111.
 3. Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover // *Hydrobiologia* - 2008. - Vol.599. - № 1. - pp. 41–48.
 4. Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability // *Tellus* – 2004. - Vol.56 - № 4 - pp. 328–341.
 5. Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // *Estonian Journal of Earth Sciences* – 2013. - Vol.62 - № 1 - pp. 33–41.
-

6. Comiso J.C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite Multispectral Microwave Observations // Journal of Geophysical Reseach. - 1986. - Vol.91. - №C1. - pp. 975–994.
7. Latifovic R., Pouliot D. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record // Remote Sensing of Environment – 2007. - Vol.106. - № 4. - pp. 492–507.
8. Баклагин В.Н. Результаты анализа спутниковых данных о температуре поверхности воды Белого моря // Инженерный вестник Дона. 2017. №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4075.
9. Баклагин В.Н. Методы исследования ледовых характеристик водоемов // Инженерный вестник Дона. 2018. №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4727.
10. Гермак О.В. Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга опустынивания // Инженерный вестник Дона. 2013. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167.
11. Баклагин В.Н. Совершенствование метода дешифрирования космических снимков больших озер на классы «вода»-«лед» // Современные проблемы науки и образования. 2015. №2 URL: science-education.ru/ru/article/view?id=23900.

References

1. Baklagin V.N. Ekológia (Bratislava). 2017. Vol. 36. № 3. pp. 226–234.
2. Clark P.U., Alley R.B., Pollard D. Science. 1999. Vol.286. № 5442. pp. 1104–1111.
3. Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Hydrobiologia. 2008. Vol.599. № 1. pp. 41–48.



4. Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P. *Tellus*. 2004. Vol.56. № 4. pp. 328–341.
5. Efremova T., Palshin N., Zdrovennov R. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. Vol.62. № 1. pp. 33–41.
6. Comiso J.C. *Journal of Geophysical Research*. 1986. Vol.91. №C1. pp. 975–994.
7. Latifovic R., Pouliot D. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol.106. № 4. pp 492–507.
8. Baklagin V.N. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1750.
9. Baklagin V.N. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4727.
10. Germak O.V. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167.
11. Baklagin V.N. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2015. №2. URL: science-education.ru/ru/article/view?id=23900.