

УДК 551.509

БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД К ВЕРОЯТНОСТНОМУ ПРОГНОЗУ ЗИМНЕЙ ФАЗЫ АРКТИЧЕСКОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ

В.Н. Крыжов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва
kryjov@metcom.ru*

В статье рассматривается метод сезонного прогноза зимней фазы Арктической осцилляции (АО). Прогноз формулируется в терминах вероятности попадания среднего зимнего (декабрь-февраль) индекса АО в одну из трех вероятных категорий: ниже нормы, около нормы, выше нормы. В качестве предиктора используется аномалия октябрьской циркуляции H_{500} над Таймыром. Алгоритм расчета строится на основе теоремы Байеса. Оценка прогноза проводится на кросс-валидированных рядах с использованием показателя мастерства вероятностных прогнозов осуществления событий в ранжированных категориях. Проведенный анализ показал успешность метода. Превышение мастерства методического прогноза над климатическим прогнозом значимо на 0,5% уровне в одностороннем тесте.

Ключевые слова: Арктическая осцилляция, вероятностный сезонный прогноз, теорема Байеса.

Введение

Арктическая осцилляция (АО) – это доминантная мода изменчивости зимней циркуляции над внетропическими широтами северного полушария [26, 27]. Положительная фаза АО ассоциируется с преобладанием зональной циркуляции в средних широтах, отрицательная – меридиональной. Во многих работах показано синхронное влияние зимней фазы АО на температуру Северной Евразии, причем для температуры Европейской части и Восточной Сибири корреляции превышают 0,6–0,7 [5]. Влияние зимней фазы АО на температуру Северной Евразии не ограничивается синхронными связями, в северных районах оно прослеживается до окончания таяния снега и льда [17]. Статистически значимо здесь и влияние зимней фазы АО на среднюю годовую температуру [3, 18]. Причем на фоне положительной корреляции зимнего индекса АО и средней годовой температуры на севере Европы корреляция между зимним индексом АО и ноябрьской температурой Восточной Европы отрицательна [4]. Это определяется передачей сигнала через ноябрьское всплытие зимней аномалии температуры воды в Северной Атлантике и соответствующую ноябрьскую аномалию циркуляции [10].

Оперативные модельные прогнозы зимней фазы АО с месячной заблаговременностью пока недостаточно надежны. По опубликованным оценкам, для тридцатилетних рядов только модель GloSea5 (УКМО) и модель Пусанского государственного университета (Южная Корея) прогнозируют зимний индекс АО с корреляцией, превышающей 0,5 [8, 16, 21, 24, 25]. В СЕАКЦ эти прогнозы не поступают.

Статистический прогноз зимней фазы АО на основе октябрьской аномалии снежного покрова в Восточной Сибири был предложен в [11, 12] и внедрен в оперативную практику. Со временем связи ослабели и в [13] был предложен новый предиктор – скорость роста октябрьской аномалии снежного покрова. Однако, как показано в работе [23], связи зимнего индекса АО и обоих предикторов оказались нестабильны.

В [19] были установлены связи зимнего индекса АО и аномалии высоты геопотенциала в средней тропосфере над полуостровом Таймыр и морем Лаптевых – Таймырской циркуляционной аномалией (ТЦА), причем аномалия скорости роста октябрьской аномалии снежного покрова – это одно из следствий аномалии ТЦА [9]. В [20] связь зимней фазы АО с октябрьской полярностью ТЦА была подтверждена в режиме детерминистского прогноза, имитирующего прогнозы в реальном времени. Так как целью настоящей статьи является представление метода вероятностного прогноза, а не выбор предиктора, достаточно обоснованный в опубликованных уже статьях [19, 20], представленный прогноз строится на этом же предикторе – аномалии высоты H_{500} над областью, ограниченной $70\text{--}80^\circ$ с. ш. и $100\text{--}120^\circ$ в. д. Конечно, представленный прогноз, несмотря на изменение стратегии верификации, не может считаться полностью независимым, так как предиктор был выбран по результатам предыдущих исследований.

Данные и метод прогноза и верификации

В работе использовался индекс АО, публикуемый на сайте Центра прогноза климата (Climate Prediction Center). Поля H_{500} взяты из Реанализа I NCEP/NCAR [15]. Период анализа – 1979–2012 гг. (34 года).

Расчетный метод вероятностного прогноза зимнего индекса АО строился на теореме Байеса. Формулировку и варианты применения теоремы можно найти практически в любом учебнике по теории вероятностей, например в [7]:

$$P(y_i | x) = \frac{P(y_i)P(x | y_i)}{\sum_{i=1}^M P(y_i)P(x | y_i)}, \quad (1)$$

где $P(y_i | x)$ – апостериорная вероятность события y_i при условии события x ; $P(y_i)$ – априорная вероятность события y_i ; $P(x | y_i)$ – функция правдоподобия; в знаменателе – полная вероятность события x . В нашей модели событие y_i – реализация зимнего индекса АО в одной из M ($M = 3$)

равновероятных категорий – выше нормы, около нормы, ниже нормы; событие x – наблюдаемая октябрьская ТЦА в терминах таких же трех равновероятных категорий; $P(x|y_i)$ – повторяемость наблюдаемой категории октябрьской ТЦА при том или ином событии y_i , т. е. при попадании зимнего индекса АО в одну из трех перечисленных выше категорий.

С учетом нормального распределения и индекса АО и ТЦА, границы их категорий определялись как $\pm 0,43$ стандартного отклонения индекса АО и величины ТЦА соответственно.

Верификационные оценки рассчитывались на рядах кросс-валидированных прогнозов с пропуском трех лет – года прогноза и двух последующих лет. Этот пропуск устраняет влияние последующих за годом прогноза лет на расчет функции правдоподобия, так как радиус корреляции для обоих индексов на превышает двух лет.

Для оценки прогнозов применялся наиболее часто используемый в научной литературе показатель мастерства вероятностных прогнозов осуществления событий в ранжированных категориях (Rank Probability Skill Score – *RPSS*). Следуя [1], далее будем применять более краткое название – показатель мастерства вероятностных прогнозов ранжированных категорий.

RPSS характеризует мастерство оцениваемых прогнозов по сравнению с референтными прогнозами, в данном случае климатическими. При оценке успешности прогнозов по их множеству используется агрегированное значение *RPSS*, рассчитываемое как

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS}_{cl}}, \quad (2)$$

где *RPS* – оценка вероятностных прогнозов ранжированных категорий. Черта сверху означает осреднение по всем прогнозам. *RPS* определяется как [6, 14, 22]

$$RPS = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \left[\left(\sum_{k=1}^m p_k \right) - \left(\sum_{k=1}^m o_k \right) \right]^2, \quad (3)$$

где $M = 3$ – число категорий; p – прогнозируемая вероятность; $o = 1$, если событие произошло, и $o = 0$ в противном случае. Для \overline{RPS}_{cl} климатического прогноза для трех равновероятных категорий $p = 1/3$. Черта сверху означает осреднение по времени и, для обобщенных значений, по пространству. *RPS* характеризует ошибку прогноза, поэтому для идеальных прогнозов $RPS = 0$, а с возрастанием ошибки значения *RPS* увеличиваются, при этом наихудшее возможное значение равно $M - 1$. Стоит также отметить, что хорошо известный и также часто используемый показатель Брайера можно рассматривать как частный случай *RPS*, когда число категорий равно двум.

RPSS изменяется в диапазоне от минус бесконечности до единицы. *RPSS* идеальных прогнозов равен единице. Положительные значения *RPSS*

говорят о превосходстве тестируемого метода, отрицательные – о превосходстве климатического прогноза.

Для оценки статистической значимости полученных оценок применялся метод Монте – Карло в версии, предложенной в [2]. Случайным образом генерировались 32-летние последовательности вероятностей, дающих единицу в сумме по трем градациям. По этим последовательностям рассчитывались случайные значения *RPSS*. Было генерировано 1000 последовательностей и было получено, соответственно, 1000 случайных значений *RPSS*. Уровень значимости (односторонний) определялся как доля случайно полученных значений *RPSS*, превышающих или равных значению *RPSS*, полученному на оригинальных прогнозах. Например, одностороннему уровню значимости 2,5 % соответствует 25 превышений в 1000 тестов.

Результаты

Значение *RPSS* вероятностного прогноза зимнего индекса АО по октябрьскому циркуляционному индексу, агрегированное по 34 прогнозам, равно 0,15. Это значение статистически значимо на уровне 0,5 % в одностороннем тесте с использованием метода Монте – Карло.

На рисунке представлена дихотомная интерпретация этого вероятностного прогноза на основе прогнозируемых наиболее вероятных категорий зимнего значения АО. Такая интерпретация предполагает, что прогнозируется фаза зимнего индекса АО, соответствующая категории наибольшей прогностической вероятности. Прогноз считается оправдавшимся, если зимой наблюдается эта же фаза АО. Если наблюдается любая другая фаза, даже соответствующая соседней категории, прогноз считается неоправдавшимся. При дихотомном подходе к оценке прогноза, случайный прогноз оказался бы успешным в 1/3 случаев из 34, то есть в 11,33 случаях, при округлении сверху – в 12 случаях. В нашем тесте правильный прогноз был в 19 случаях из 34 (в оценке по биномиальному распределению отличие 19 от 12 значимо на 5 %).

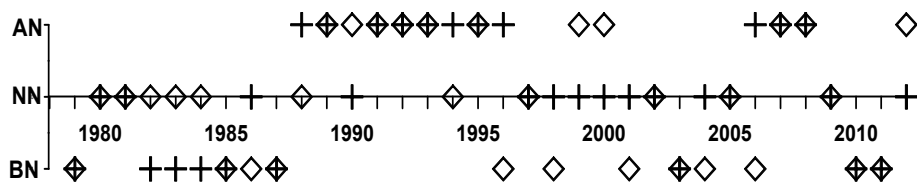


Рис. Наблюдаемые категории зимнего индекса АО (ромб) и прогнозируемые с использованием теоремы Байеса наиболее вероятные категории зимнего индекса АО (крест). Годы отмечены по январю.

Заключение

Представленный в статье метод вероятностного прогноза, основанный на теореме Байеса, показал свою эффективность. Вероятностный прогноз зимней фазы АО по октябрьскому индексу ТСА весьма успешен: $RPSS = 0,15$, это значение статистически значимо на 0,5%-ном уровне. В отличие от обычных методов долгосрочного прогнозирования на основе теоремы Байеса, в которых используется функция правдоподобия в виде регрессии, в представленном методе применена функция правдоподобия, построенная на частотности соотношений предиктора и предиктанта. Этот подход не подразумевает необходимости линейной их связи, что открывает более широкие возможности применения метода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №14-37-00053П) в Гидрометцентре России.

Поступила в редакцию 25.10.2017 г.

Список использованных источников

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Семенюк Е.А., Бардин М.Ю., Муравьев А.В., Нестерова Г.А., Савелова О.Ф., Хамидулина А.Б. Схема вероятностного адаптивного метеорологического прогноза (групповые аналоги) с оптимизацией состава предикторов // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 306. С. 3-55.
2. Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 27-38.
3. Крыжов В.Н. Связь средней годовой температуры воздуха в Северо-Западной Евразии с арктическим колебанием // Метеорология и гидрология. 2004. № 1. С. 5-14.
4. Крыжов В.Н. Причины ноябрьских похолоданий 1980-х - 1990-х годов на Европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2008. № 1. С. 5-14
5. Крыжов В.Н., Горелиц О.В. Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки Северной Евразии в XX веке // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 5-19.
6. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 5-16.
7. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 320 с.
8. Athanasiadi, P.J., Bellucci, A., Scaife A.A., Hermanson L., Matera S., Sanna A., Borrelli A., MacLachlan C., Gualdi S. A multisystem view of wintertime NAO seasonal predictions // J. Clim. 2017. Vol. 30(4). P. 1461-1475.
9. Bednorz E., Wibig J. Circulation patterns governing October snowfalls in southern Siberia // Theoretical and Applied Climatology. 2017. Vol. 128 (1-2). С. 129-139.
10. Choi Y.-W., Ahn J.-B., Kryjov V.N. November seesaw in northern extratropical sea level pressure and its linkage to the preceding wintertime Arctic Oscillation // Int. J. Clim. 2016. Vol. 36. P. 1375-1386; doi:10.1002/joc.4431.
11. Cohen J, Barlow M, Kushner P, Saito K. Stratosphere-troposphere coupling and links with Eurasian land surface variability // J. Clim. 2007. Vol. 20. P. 5335-5343.
12. Cohen J., Fletcher C. Improved skill of Northern Hemisphere winter surface temperature prediction based on land-atmosphere fall anomalies // J. Clim. 2007. Vol. 20. P. 4118-4132.
13. Cohen J., Jones J. A new index for more accurate winter predictions // Geophys. Res. Lett. 2011. Vol. 38. L21701.

14. *Epstein E.S.* A scoring system for probability forecasts of ranked categories // *J. Appl. Meteorol.* 1969. Vol. 8. P. 985-987.
15. *Kalnay E. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 1996. Vol. 77. P. 437-471.
16. *Kim H.J., Ahn J.B.* Improvement in prediction of the Arctic Oscillation with a realistic ocean initial condition in a CGCM // *J. Clim.* 2015. Vol. 28. P. 8951-8967.
17. *Kryjov V.N.* The influence of the winter Arctic Oscillation on the Northern Russia spring temperature // *Int. J. Clim.* 2002. Vol. 22. P. 779-785.
18. *Kryjov V.N.* Searching for circulation patterns affecting Northern Europe annual temperature // *Atm. Sci. Lett.* 2004. Vol. 5. P. 23-34.
19. *Kryjov V.N.* October circulation precursors of the wintertime Arctic Oscillation // *Int. J. Clim.* 2015. Vol. 35. P. 161-171; doi: 10.1002/joc.3968.
20. *Kryjov V.N., Min Y.-M.* Predictability of the wintertime Arctic Oscillation based on autumn circulation // *Int. J. Clim.* 2016. Vol. 36. P. 4181-4186; doi: 10.1002/joc.4616.
21. *MacLachlan C, Arribas A, Peterson KA, Maidens A, Fereday D, Scaife AA, Gordon M, Vellinga M, Williams A, Comer RE, Camp J, Xavier P, Madec G.* Global seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 141. P. 1072-1084.
22. *Murphy A.H.* A note on the ranked probability score // *J. App. Meteorol.* 1971. Vol. 10. P. 155-156.
23. *Peings Y., Brun E., Mauvais V., Douville H.* How stationary is the relationship between Siberian snow and Arctic Oscillation over the 20th century? // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 183-188.
24. *Scaife A.A. et al.* Skillful longrange prediction of European and North American winters // *Geoph. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 2514-2519; doi:10.1002/2014GL059637.
25. *Sun J., Ahn J.B.* Dynamical seasonal predictability of the Arctic oscillation using a CGCM // *Int. J. Clim.* 2015. Vol. 35. P. 1342-1353; doi:10.1002/joc.4060.
26. *Thompson D.W.J., Wallace J.M.* The Arctic oscillation signature in wintertime geopotential height and temperature fields // *Geoph. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. P. 1297-1300.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M.* Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month to month variability // *J. Climate.* 2000. Vol. 13. P. 1000-1016.

SUMMARIES

Probabilistic Prediction of the Wintertime Arctic Oscillation Phase Based on the Bayes Theorem / Kryjov V.N. // *Proceedings of Hydrometcentre of Russia.* 2017. Vol. 366. P. 51-56.

A method of seasonal prediction of the wintertime Arctic Oscillation (AO) phase is discussed. The forecast is formulated in terms of tercile probabilities of the wintertime (December-February) mean AO index, below norm, near norm, above norm. The October Z500 circulation anomaly over the Taymyr Peninsula is used as a predictor. Computational algorithm is based on the Bayes Theorem. Verification is performed on the cross-validated forecasts using the rank probability skill score. The analysis yields the skill of the method. The analysed method outperforms climatological forecasts, with superiority being significant at the 0.5% level in one-tailed test.

Keywords: Arctic Oscillation, probabilistic seasonal forecast, Bayes Theorem.