

А. С. Лубков, Е. Н. Воскресенская, О. В. Марчукова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ЮЖНОГО КОЛЕБАНИЯ*

Институт природно-технических систем
Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

Работа посвящена анализу возможности прогнозирования индекса Южного колебания (ИЮК) при помощи метода искусственных нейронных сетей. В качестве входных параметров модели использован набор глобальных климатических индексов Северного и Южного полушарий за 1950–2010 гг. Верификация модели проводилась на основе контрольной выборки за 2007–2015 гг. Показана возможность удовлетворительного прогноза ИЮК с заблаговременностью от 1 до 5 месяцев для осени, зимы и весны. С учётом наличия двух ранее выделенных типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья показана особая значимость прогноза ИЮК на апрель и май для событий восточного типа. Библиогр. 42 назв. Ил. 4. Табл. 2.

Ключевые слова: Южное колебание, Эль-Ниньо, Ла-Нинья, ЭНЮК, система океан — атмосфера, прогнозирование, нейронные сети.

A. S. Lubkov, E. N. Voskresenskaya, O. V. Marchukova

FORECASTING OF THE SOUTHERN OSCILLATION INDEX

Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Natural and Technical Systems”
Russia, Sevastopol, 28 Lenin St.

The possibility of the Southern Oscillation Index (SOI) forecast on the basis of the artificial neural networks model is studied in the paper. The ensemble of global climatic indices from 1950 to 2010 were used as the inputs. The model verification was done by the control period of 2007–2015. The possibility of successful SOI forecasting in 1–5 months advance for the late autumn-early winter and for early spring was demonstrated. Taking into account that two types of El-Nino and La-Nina exist, the primary concern of April and May SOI forecast for the eastern type events has been shown. Refs 42. Figs 4. Tables 2.

Keywords: Southern Oscillation, El Niño, La Niña, ocean-atmosphere system, forecasting, neural networks model.

1. Введение

Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) — основной климатический сигнал, обуславливающий межгодовую изменчивость глобальной системы океан — атмосфера (Enfield, Mestas-Nunez, 1999). ЭНЮК имеет два крайних эпизода существования: тёплый — Эль-Ниньо и холодный — Ла-Нинья.

Эль-Ниньо формируется в результате угасания пассатных ветров и формирования аномалии западного ветра. Это приводит к переносу теплых экваториальных водных масс из западной акватории тропической зоны Тихого океана на восток и последующему выравниванию термоклина до берегов Южной Америки. Как следствие, смещаются центры действия атмосферы, ослабевает экваториальная циркуляционная ячейка Уокера в атмосфере и усиливается меридиональная ячейка Хэдди, выполняющая роль обратной связи между экватором и полюсами. Первые описания этого явления были сделаны в работах (Rasmusson, Wallace, 1983; Larkin, Harrison, 2005).

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 16-05-00231-А).

Для Ла-Нинья характерны противоположные условия: усиление пассатного ветра, приводящее к апвеллингу, подъему термоклина и понижению температуры поверхности океана (ТПО) у берегов Южной Америки, а также к углублению термоклина в западной экваториальной части Тихого океана. Как следствие, в ячейке Уокера циркуляция интенсифицируется, а в ячейке Хэдли — ослабевает (Philander, 1990; Glantz, 2002).

В качестве характеристики ЭНЮК традиционно используют индекс Южного колебания (ИЮК), представляющий нормированную разность приземного давления между о. Таити и портом Дарвин (Австралия). Впервые ИЮК был введен Г. Уокером в 1924 г. (Walker, 1924). Он характеризует количественное изменение давления между устойчивыми областями повышенного и пониженного давления в экваториальной части Тихого океана.

Начиная с 1985 г., с запуском проекта TOGA, целью которого являлось расширение сети наблюдений за ТПО в Тихом океане, индекс, характеризующий теплые и холодные эпизоды ЭНЮК, стали рассчитывать как аномалию ТПО в определенных тропических районах Тихого океана. Известно при этом, например, (Rasmusson, Carpenter, 1982), что существует тесная взаимосвязь между изменениями ИЮК и аномалиями температуры поверхности в экваториальной зоне Тихого океана. Учитывая исторически сложившееся наличие долговременных регулярных данных об ИЮК, следует полагать, что он будет статистически более надежно отображать специфику эволюции явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, что представляет особый научный интерес для современных исследователей этих событий.

Со временем было обнаружено, что проявления теплой и холодной фаз ЭНЮК отмечаются в аномалиях погоды и климата (вплоть до экстремальных) не только над тропической зоной Тихого океана, но и во внетропических широтах посредством дальнедействующих связей системы океан — атмосфера (Philander, 1990; McPhaden et al., 2006). Нередко последствия этих событий приводят к серьезным человеческим жертвам и экономическим потерям (Ashok et al., 2007; Yuan et al., 2012; Yuan, Yang, 2012; Lin, Yu, 1993). В этой связи мировое научное сообщество, а также представители правящих кругов стран региона заинтересованы в возможности прогнозировать явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В последние десятилетия были разработаны различные крупномасштабные климатические модели (Glantz, 2015), целью которых стали мониторинг и прогнозирование квазипериодического феномена ЭНЮК. Однако, несмотря на усовершенствование подходов моделирования и технологий мониторинга характеристик Эль-Ниньо и Ла-Нинья из космоса и в океане, прогнозирование этого события остается несовершенным. Дело в том, что, несмотря на достаточно длительное исследование этих событий (Rasmusson, Carpenter, 1982; Lin, Yu, 1993; Philander, 1990, 2002; McPhaden et al., 2006; Ashok et al., 2007; Yuan et al., 2012) и имеющиеся примеры успешного моделирования Эль-Ниньо (Barnston, He, 1999; Hendon, 2009), механизм формирования и Эль-Ниньо, и Ла-Нинья остается одной из важнейших современных научных задач, которая не решена до сих пор.

В настоящее время в ходе поисков этого механизма высказывается ряд гипотез о процессах, провоцирующих теплый и холодный эпизоды ЭНЮК. Условно эти процессы можно разделить на две группы.

В рамках *первой группы гипотез* нерегулярность событий ЭНЮК с периодичностью 2–7 лет интерпретируется как следствие крупномасштабных низкочастотных процессов, протекающих в системе океан — атмосфера (таких как изменение характеристик теплосодержания океана, термохалинная циркуляция, постепенное изменение структуры общей циркуляции атмосферы). При этом вариативность ансамбля этих характеристик на десятилетних масштабах может быть причиной изменения состояния системы океан — атмосфера, что может привести к благоприятным условиям для возникновения явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья (см. напр., (Гущина и др., 2010)). Тем не менее на основе только десятилетних и междесятилетних колебаний перечисленных выше характеристик не всегда можно объяснить формирование условий, благоприятных для развития Эль-Ниньо.

Подобное ограничение компенсируется появлением *второй группы гипотез*, которые базируются на предположении, что изменчивость ЭНЮК обусловлена более высокочастотной, так называемой внутрисезонной, изменчивостью в системе океан — атмосфера в экваториальной зоне. Подобный подход является одним из частных случаев теории стохастического воздействия на крупномасштабные процессы (Демченко, Кислов, 2010; Wheeler, Kiladis, 1999).

Отметим при этом отличительную черту обеих групп: во всех гипотезах при поиске механизма рассматривается взаимодействие системы океан — атмосфера, что представляется совершенно логичным для использования в качестве подхода при моделировании и прогнозе ИЮК.

С учётом отмеченной мысли в качестве одного из подходов к моделированию в настоящей работе предложено использовать метод на основе искусственных нейронных сетей. Ранее в работе (Лубков и др., 2016) он был применён для восстановления среднемесячных гидрологических параметров. Тогда в качестве входных данных успешно использовались индексы глобальных дальнедействующих климатических сигналов.

Такой подход будет использован для поиска нелинейных зависимостей в системе океан — атмосфера, а также для прогнозирования ИЮК с заблаговременностью от одного до нескольких месяцев. Далее, проведя на следующем этапе анализ выбранных моделью предикторов, можно попытаться ответить на вопрос, какой вклад вносят глобальные процессы в системе океан — атмосфера в формирование событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Таким образом, в настоящей статье будет изучена возможность применения модели на основе искусственных нейронных сетей для прогнозирования индекса Южного колебания и проведен анализ ансамбля климатических индексов глобальной системы океан — атмосфера, подбираемых моделью в качестве предикторов событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

2. Данные

В статье для анализа привлекались среднемесячные ряды индексов дальнедействующих сигналов в системе океан — атмосфера за 1950–2015 гг. для Северного полушария Земли:

- НАО — индекс Северо-Атлантического колебания,
- АО — индекс Арктического колебания,

- EA — индекс Восточно-Атлантического колебания,
- SCAND — индекс скандинавского (известного как «Евразийское-1») колебания,
- POL — индекс Полярного (или Северо-Азиатского) колебания,
- WP — индекс Западно-Тихоокеанского колебания,
- EA/WR — индекс колебания между восточной Атлантикой и западной Евразией (известного как «Евразийское-2»),
- PNA — индекс колебания между Тихим океаном и Северной Америкой,
- EP—NP — индекс колебания между восточной и северной частями Тихого океана.

Описание этих индексов подробно приведено в работах (Wallace, Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987; Zhou, et al, 2001.)

Индекс Северо-Атлантического колебания (NAO) рассчитывается как разность геопотенциала между Азорским максимумом и Исландским минимумом на изобарической поверхности 500 гПа (Wallace, Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987). Из работ (Полонский и др., 2003; Воскресенская, Полонский, 1992; Нестеров, 2000; Мохов, Смирнов, 2006) известно о взаимосвязи Эль-Ниньо — Южного колебания с Северо-Атлантическим колебанием.

Индекс Арктического колебания (АО) вычисляется как ежедневная аномалия на изобарическом уровне 1000 гПа над северными широтами с 20° по 90° (Zhou, 2001). В работе (Мохов, Смирнов, 2006) приведены механизмы взаимодействия АО с ЭНЮК.

Индекс Восточно-Атлантического колебания (EA) рассчитывается в трёх центрах действия атмосферы на уровне 500 гПа (Wallace, Gutzler, 1981):

- 1) над Канарскими островами,
- 2) над Великобританией,
- 3) над Черноморским регионом.

В публикации (Нестеров, 2000) описывается взаимодействие Эль-Ниньо и Ла-Нинья с Восточно-Атлантическим колебанием.

Индекс Скандинавского колебания (SCAND) (Barnston, Livezey, 1987) комплексно рассчитывается над Скандинавией, Монголией и Восточной Россией на уровне 500 гПа.

Индекс Полярного колебания (POL) вычисляется как разность поля геопотенциала на уровне 500 гПа между полярным регионом Северного полушария и Центральной Азией.

Западнотихоокеанское колебание (WP) — устойчивое колебание, наблюдающееся на протяжении всего года. Его индекс рассчитывается как разность геопотенциала между Камчаткой и западными субтропиками Тихого океана (Wallace, Gutzler, 1981; Barnston, Livezey, 1987).

Индекс колебания между восточной Атлантикой и западной Евразией (EA/WR) (Barnston, Livezey, 1987) рассчитывается в четырех центрах действия атмосферы:

- 1) над Европой,
- 2) над Каспийским морем,
- 3) над центром Северной Америки,
- 4) над севером Китая.

Индекс PNA вычисляется как разность геопотенциала на барическом уровне 500 гПа над северо-восточным районом Тихого океана между положительной аномалией геопотенциала (район о. Гавайи — межгорье Северной Америки) и отрицательной аномалией геопотенциала (между Алеутскими островами и юго-восточными штатами США) (Barnston, Livezey, 1987). Индекс EP — NP рассчитывается в трех центрах действия атмосферы (Climate Prediction Center, 2016):

- 1) над Аляской,
- 2) над северными умеренными широтами Тихого океана,
- 3) над восточной частью Северной Америки.

Значения рассчитанных индексов для Северного полушария в открытом доступе предоставлены Центром климатических прогнозов США (Climate Prediction Center, 2016).

Индексы дальнедействующих сигналов для Южного полушария рассчитывались в настоящей статье на основе среднемесячных данных реанализа за XX век (20th Century Reanalysis v2c, или 20CR) о поле геопотенциала на изобарическом уровне 500 гПа с пространственной узловой сеткой $2 \times 2^\circ$ за 1950–2015 гг. Барические структуры, описанные в работе (Mo, White, 1985), были пересчитаны по координатам, предложенным авторами настоящей статьи:

Австралийское колебание:

$$P_1 = (Z(26^\circ \text{ ю. ш.}, 140^\circ \text{ в. д.}) - Z(54^\circ \text{ ю. ш.}, 145^\circ \text{ в. д.}))/2;$$

колебание Южная Атлантика — Южная Африка:

$$P_2 = (Z(22^\circ \text{ ю. ш.}, 25^\circ \text{ в. д.}) - Z(54^\circ \text{ ю. ш.}, 10^\circ \text{ в. д.}))/2;$$

колебание Южная Америка — Антарктика:

$$P_3 = (Z(18^\circ \text{ ю. ш.}, 50^\circ \text{ з. д.}) - Z(58^\circ \text{ ю. ш.}, 140^\circ \text{ в. д.}))/2;$$

Колебание умеренного пояса Южного полушария — Антарктика:

$$P_4 = (Z(54^\circ \text{ ю. ш.}, 145^\circ \text{ в. д.}) + Z(58^\circ \text{ ю. ш.}, 10^\circ \text{ в. д.}) + Z(62^\circ \text{ ю. ш.}, 100^\circ \text{ з. д.}))/3,$$

где Z — аномалия геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа, рассчитанная на основе климатического периода 1961–1990 гг.

Дополнительно были рассчитаны и другие индексы в Южном полушарии:

колебание между Южно-Тихоокеанским максимумом
и Землей Грейма (Антарктида):

$$P_5 = (Z(46^\circ \text{ ю. ш.}, 90^\circ \text{ з. д.}) - Z(76^\circ \text{ ю. ш.}, 90^\circ \text{ з. д.}))/2;$$

южнотихоокеанское колебание:

$$P_6 = (Z(18^\circ \text{ ю. ш.}, 130^\circ \text{ з. д.}) - Z(58^\circ \text{ ю. ш.}, 140^\circ \text{ в. д.}))/2.$$

Также использовался индекс Тихоокеанской декадной осцилляции (PDO), который рассчитывается для северной части Тихого океана и представляет собой детрендрованную аномалию температуры поверхности воды. Значения индекса предоставлены в открытом доступе Институтом атмосферы и океана Университета Вашингтона (JISAO, 2016).

Индекс Южного колебания (SOI, или ИЮК) взят за 1950–2015 гг. (Trenberth, Caron, 2000).

Таким образом была сформирована база данных за 1950–2015 гг., необходимая для прогнозирования ИЮК на основе искусственных нейронных сетей с заблаговременностью более 1 месяца.

3. Методика

Для моделирования индекса Южного колебания были использованы *искусственные нейронные сети* (НС) — математические модели, позволяющие реализовать искусственный интеллект. Принцип работы искусственных НС подобен принципу обработки сигналов в нейронах живых существ.

Идея создания искусственной НС сформировалась ещё в середине XIX столетия: одной из первых моделей нейрона стала предложенная в 1943 г. бинарная модель Мак-Каллока — Питса (Осовский, 2002). До 1970-х гг. было представлено множество моделей нейронных сетей, имеющих линейные и рекуррентные связи между нейронами и использующих методику обучения с учителем или без него. В конце 1970-х гг. НС получили дальнейшее развитие, связанное с разработкой нового алгоритма обучения с учителем — метода обратного распространения ошибки, который и в настоящее время считается одним из наиболее эффективных алгоритмов обучения многослойной НС.

Известно, что преимущество НС в сравнении с регрессионными моделями заключается в нелинейности НС, которая достигается за счет наличия скрытых слоев (Осовский, 2002). Поэтому для моделирования использовалась однонаправленная гетероассоциативная однослойная (с одним скрытым слоем) НС с учителем. Нейроны входного, скрытого и выходного слоёв представлены сигмоидальной биполярной функцией (Осовский, 2002; Haykin, 1994; Rosenblatt, 1962):

$$F(x) = \tanh(\beta x).$$

Ее производная — деактивационная функция — используется для формирования целевой функции и отображения результата. В качестве входных параметров был использован набор индексов дальнедействующих сигналов в системе океан — атмосфера. Обучение модели проводилось на основе алгоритма обратного распространения ошибки. Схема модели приведена на рис. 1.

Ряд значений моделируемого параметра был разделен на обучающую, тестирующую (тестовую) и контрольную выборки. На обучающей выборке проводилось обучение модели, на тестовой — проверка результата моделирования. Выбор временных промежутков для обучения и тестирования модели основывается на определении понятия климата. Утверждённый ЮНЕСКО термин «климат» определяется как статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой (атмосфера плюс деятельный подстилающий слой) за периоды времени порядка десятилетий (по международным соглашениям 1957 и 1996 гг., этот период принят равным 30 годам) (Монин, 1999). Поэтому для обучения выбран 30-летний период с 1951 по 1980 г., для теста — 26-летний за 1981–2006 гг. Контрольная выборка не использовалась в моделировании и нужна была для того, чтобы независимо оценить воспроизводимость сложных явлений моделью. В качестве контрольной выборки рассматривался период 2007–2015 гг., включающий в себя три события Ла-Нинья (в 2007–2008, 2010–2011, 2011–2012 гг.) и два события Эль-Ниньо (в 2009–2010 и 2015–2016 гг.).

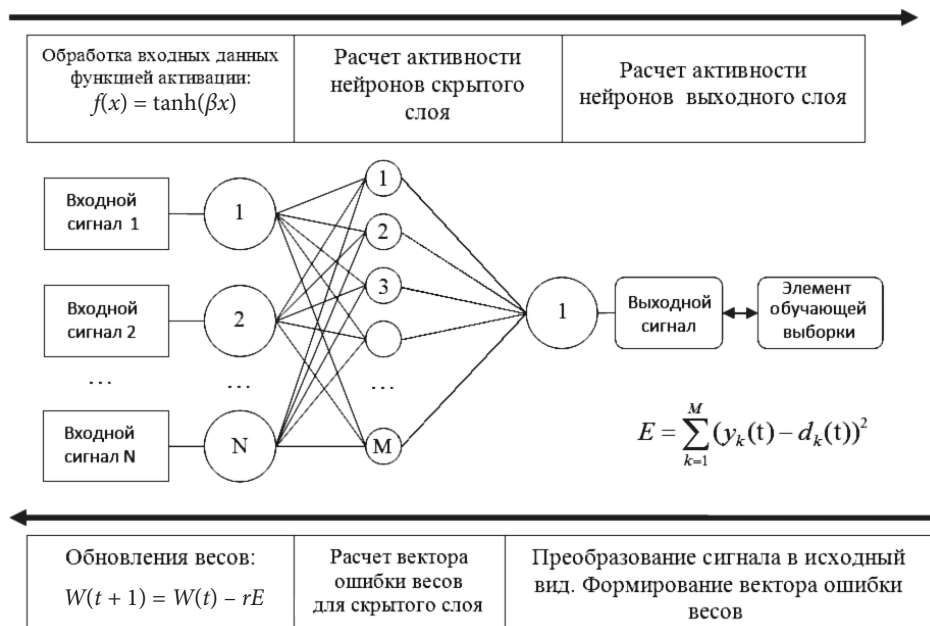


Рис. 1. Краткая схема обучения нейронной сети:

W — веса активности нейронов, t — временной шаг, r — коэффициент скорости обучения, E — целевая функция, y — множество выходных сигналов, d — множество элементов обучающей выборки, N и M — соответственно общее число нейронов во входном и скрытом слоях, k — номер нейрона скрытого слоя.

Подробное описание тонкостей ядра модели и его тестирования можно найти в работе (Лубков и др., 2016).

Адаптация модели проходила в три стадии:

- 1) предварительная обработка данных,
- 2) моделирование,
- 3) заключительная обработка результатов.

Предварительная обработка данных. На данном этапе выполнялся поиск связей между ИЮК и индексами климатических дальнедействующих сигналов. Для этого рассчитывалась корреляция ИЮК с индексами климатических сигналов, наблюдаемых в предшествующие месяцы текущего и предыдущего года. В среднем для моделирования отбирались 12–17 индексов. Далее значения исследуемого параметра и индексов нормировались, а после формировались три временные выборки данных:

- 1) обучающая,
- 2) тестовая,
- 3) контрольная.

Моделирование. Ранее в работе (Лубков и др., 2016) было показано, что поведение НС не всегда предсказуемо. На основе всех отобранных на предварительном этапе индексов модель иногда показывала неудовлетворительный результат. Это можно связать с использованием индексов, не имеющих действительной связи с моделируемым параметром. Поэтому моделирование проводилось с исполь-

зованием на входе всех возможных комбинаций индексов, выбранных на предварительном этапе. Однако, используя один и тот же набор входных сигналов и изменяя число нейронов скрытого слоя или стартовые веса связи между нейронами, можно получить существенное различие в результатах моделирования. Поэтому в ходе работы были перебраны все возможные комбинации входных сигналов с различным числом нейронов скрытого слоя. В настоящей статье НС, имеющая определенный набор входных сигналов и определенное число нейронов скрытого слоя, называется *конструкцией модели*. Для упрощения все стартовые веса были приняты постоянными и равными 0,6, как предложено в работе (Лубков и др., 2013). Для каждой конструкции находились точки максимума обучения. В таких точках вычислялись корреляции между моделируемыми тестовой и обучающей выборками и фактическими значениями этих рядов данных. Результат текущего этапа представлялся в виде лог-файла, где для каждой конструкции записывались следующие параметры (Лубков и др., 2016):

- индексы, используемые во входном слое;
- число нейронов скрытого слоя;
- итерация, на которой фиксировался максимум;
- рассчитанные в момент максимума обучения корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными значениями на обучающей и тестовой выборке.

На *заключительном* этапе экспертным путем отбиралась наилучшая из нескольких конструкций НС, выбранных программой на основе условия максимума обучения, описанного в работе (Лубков и др., 2016). Поскольку в основе выбора наилучшей конструкции НС лежит оценка корреляционной связи, есть вероятность, что, несмотря на согласованность динамики рядов, в экстремумах функции эвклидово расстояние между фактическими и рассчитанными значениями может быть велико (к примеру, превышать 2–3 сигмы). По этой причине эксперт в первую очередь обращает внимание на уровень амплитуды моделируемого параметра в экстремальных точках, а также на число нейронов в скрытом слое, которое теоретически будет оптимально при $M = 2i + 1$ (где i и M — соответственно число нейронов во входном и скрытом слоях) в соответствии с адаптированной к НС теоремой А. Н. Колмогорова (Колмогоров, 1957) о представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозицией непрерывных функций одной переменной (Накин, 1994). Отметим, что все конструкции НС, составленные на основе тесно связанных между собой индексов, а также индексов, не имеющих связи с исследуемым параметром, отсеиваются из-за низких значений коэффициентов корреляции, что обусловлено свойствами линейных НС (Осовский, 2002). Это позволяет отфильтровать ошибку, связанную с использованием неортогональных входных сигналов, которая может возникнуть на этапе предварительной обработки.

4. Результаты и обсуждение

Расчеты, а затем анализ полученных результатов проводились для каждого месяца (табл. 1). При этом использовалась контрольная выборка для периода с 2007 по 2015 г. включительно, состоящая из девяти значений для каждого месяца.

Таблица 1. Наборы индексов, включенных в конструкцию модели НС для каждого месяца и возможная заблаговременность прогноза

Месяц	Заблаговременность, мес.	Выбранные моделью индексы
Январь	1	NAO 11*, EA 7*, EA 11*, EA—WR 6*, EA—WR 11*, EP—NP 11*, POL 4*, PNA 3*, WP 12*, PDO 10*, P ₃ 12*, P ₄ 11*, P ₇ 12*
Февраль	2	OA 6*, EA 12*, EP—NP 5*, EP—NP 7*, EP—NP 10*, WP 5*, P ₁ 11*, P ₂ 7*, P ₃ 9*, P ₄ 11*, P ₄ 12*, P ₆ 5*, P ₆ 11*, P ₆ 12*
Март	1	NAO 11*, EA 2, POL 4*, PNA 3*, PNA 1, PNA 2, PDO 10*, P ₃ 11*, P ₂ 3*, P ₆ 5*
Апрель	3	NAO 4*, NAO 11*, AO 3*, EA—WR 5*, EP—NP 1, EP—NP 10*, POL 5*, WP 12*, PDO 10*, P ₂ 2*, P ₆ 11*, P ₂ 9*, P ₆ 5*
Май	4	AO 9*, EA 9*, EA—WR 1, EP—NP 11*, EA—WR 5*, SCAND 12*, POL 5*, WP 4*, WP 12*, P ₃ 4*, P ₄ 11*
Июнь	1	NAO 11, NAO 4, OA 9*, AO 3, EA—WR 2, EP—NP 4, SCAND 6*, POL 5*, WP 12*, WP5
Июль	1	NAO 4, EA—WR 6, EP—NP 2, WP 5, WP 6, POL 5*, P ₃ 8*, P ₄ 11*, P ₆ 5*
Август	1	NAO 2, NAO 3, AO 4, EP—NP 11*, EP—NP 2, SCAND 6*, POL 5*, PDO 7, P ₂ 12*, P ₄ 11*, P ₅ 9*, P ₆ 5*
Сентябрь	1	NAO 4, AO 7, EA 9*, EA—WR 8, EP—NP 1, POL 5*, WP 5, P ₄ 11*, P ₇ 7*
Октябрь	3	NAO 4, EP—NP 11*, EP—NP 2, EP—NP 5, EP—NP 7, POL 5*, PNA 6*
Ноябрь	2	EA—WR 6, EA—WR 8, EP—NP 1, EP—NP 7, POL 5*, PNA 3, WP 5, PDO 9, P ₁ 9*, P ₁ 12*, P ₄ 8*, P ₄ 11*
Декабрь	1	NAO 8*, EA 9, EA 11, EA—WR 8, EP—NP 10, PNA 3, P ₄ 8*, P ₄ 11*

Примечание. Здесь и в табл. 2 приняты следующие обозначения: 1) справа от наименования индекса указан его месяц, 2) звездочкой (*) отмечен предшествующий год.

Несмотря на короткие ряды этой выборки, для каждого моделируемого месяца были проанализированы коэффициент корреляции и среднеквадратическое отклонение (СКО) моделируемых значений относительно наблюдаемых. Последнее было нормировано на СКО непосредственно самого ряда наблюдаемого индекса, как показано в формуле

$$E = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{201_3}^{200_7} (x_i - y_i)^2}{n_{2007-201_3}}}}{\sqrt{\frac{\sum_{200_6}^{195_1} (x_i - y_i)^2}{n_{1951-200_6}}}}, \quad (1)$$

где x и y — соответственно наблюдаемое и рассчитанное значения ИЮК.

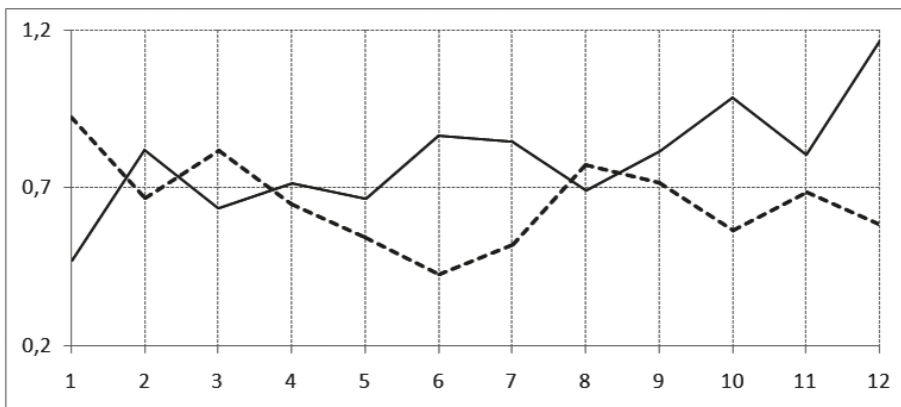


Рис. 2. Оценка качества моделирования на контрольной выборке с 2007 по 2015 г. включительно для каждого месяца.

Штриховая линия — корреляция наблюдаемого и модельного рядов. Сплошная линия — SKO модельных значений относительно наблюдаемых, рассчитанное с 2007 по 2015 г. и нормированное на SKO наблюдаемого индекса относительно среднего, рассчитанное с 1951 по 2006 г. (формула (1))

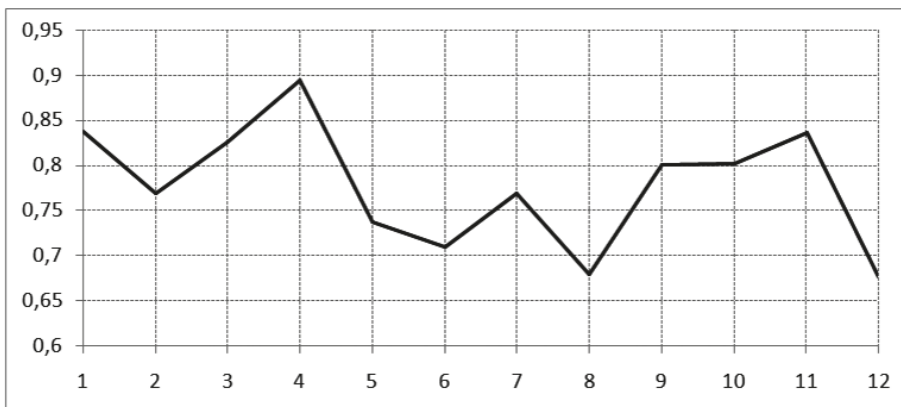


Рис. 3. Коэффициент корреляции, рассчитанный для каждого месяца периода с 1951 по 2006 г. между наблюдаемым и модельным рядами ИЮК

Если значение E выходило за пределы единицы, то оно отбраковывалось.

Результаты оценки качества моделирования на контрольной выборке приведены на рис. 2, а корреляционная связь между моделируемыми и фактическими значениями, рассчитанная для каждого месяца в период 1951–2006 гг. — на рис. 3. Из их анализа видно, что наилучшим образом модельные значения согласуются с реальными расчетами для января. Для февраля, весенних месяцев, августа, сентября и ноября такое согласование немного хуже. Моделирование для июня, июля и октября показывает более низкий уровень соответствия, но в пределах допустимых значений E . И лишь для декабря модель показала неудовлетворительное качество, и этот результат не может быть принят для использования.

Дело в том, что в летние месяцы уменьшаются температурные контрасты между экватором и внетропическими широтами Северного полушария, соответственно ослабевают и обратные связи в системе океан — атмосфера. Модель же для

этих месяцев отобрала преимущественно климатические индексы Северного полушария, которые в летние месяцы слабо выражены. Для декабря большинство выбранных на этапе предварительной обработки связей оказались отбракованными на следующем этапе работы модели. Поэтому ни одна конструкция НС не смогла показать удовлетворительный результат. В дальнейшем следует усовершенствовать блок предварительной обработки данных.

Переходя к анализу результатов моделирования эволюции событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья отметим, что он сделан с учётом ранее проведённой авторами настоящей статьи классификации этих событий (Воскресенская и др., 2015; Воскресенская, Марчукова, 2015, 2017; Лубков и др., 2017; Марчукова и др., 2016-а, 2016-б).

При этом показано, что события Эль-Ниньо восточного типа (ЭН—ВТ) начинаются преимущественно в апреле, мае и июле, центрального (ЭН—ЦТ) — в сентябре и октябре.

События Ла-Нинья начинаются в большинстве случаев в период с мая по ноябрь. При этом начало Ла-Нинья центрального типа (ЛН—ЦТ) приурочено преимущественно к летним месяцам, а восточного (ЛН—ВТ) — к маю, июню и октябрю.

Таким образом, можно полагать, что большинство явлений Эль-Ниньо восточного типа и некоторые события Ла-Нинья восточного типа можно предсказать уже зимой и заблаговременность составит 3–4 месяца (см. табл. 1). В то же время некоторые события Эль-Ниньо центрального типа, начало которых наблюдается в сентябре, можно спрогнозировать только в августе. Следует также отметить наличие некоторого запаздывания между началом явлений восточных типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья и ИЮК, которое тесно связано с характером зарождения аномалии ТПО. Дело в том, что она формируется в экваториальной зоне у берегов Южной Америки, а ИЮК рассчитывается между центральной и западной частью экваториальной зоны Тихого океана. Аномалия ТПО распространяется в западном направлении в течение примерно одного месяца.

Далее сопоставим результаты смоделированных ИЮК для каждого месяца с наблюдаемыми на контрольной выборке. В 2007–2015 гг. отмечалось пять фаз ЭНЮК, описанных выше при характеристике выбранного контрольного периода (рис. 4). Напомним в этой связи следующие моменты по каждому из событий. С сентября 2007 по апрель 2008 отмечалось событие Ла-Нинья восточного типа, а с июня 2010 по апрель 2011 г. и с августа 2011 по февраль 2012 г. — два события Ла-Нинья центрального типа (Марчукова и др., 2016-б; Воскресенская, Марчукова, 2017). В июле 2009 — марте 2010 г. наблюдалось Эль-Ниньо центрального типа, а в апреле 2015 — мае 2016 г. — Эль-Ниньо восточного типа (Воскресенская и др., 2015; Лубков и др., 2017; Марчукова и др., 2016-а). Рассмотрим подробно эти события после скользящего 3-месячного осреднения.

Ла-Нинья восточного типа 2007 г. началось в сентябре. Для наблюдаемого ИЮК рост разницы давления отмечается в октябре, для рассчитанного — в ноябре. При модельном расчете интенсивность явления в максимальную фазу его развития несколько занижена. Также можно отметить ещё один пик ИЮК с августа 2008 по март 2009 г., несмотря на то что аномалия ТПО была не так велика, чтобы причислить ее к Ла-Нинья, однако рассчитанный индекс показал высокое сходство с наблюдаемым явлением.

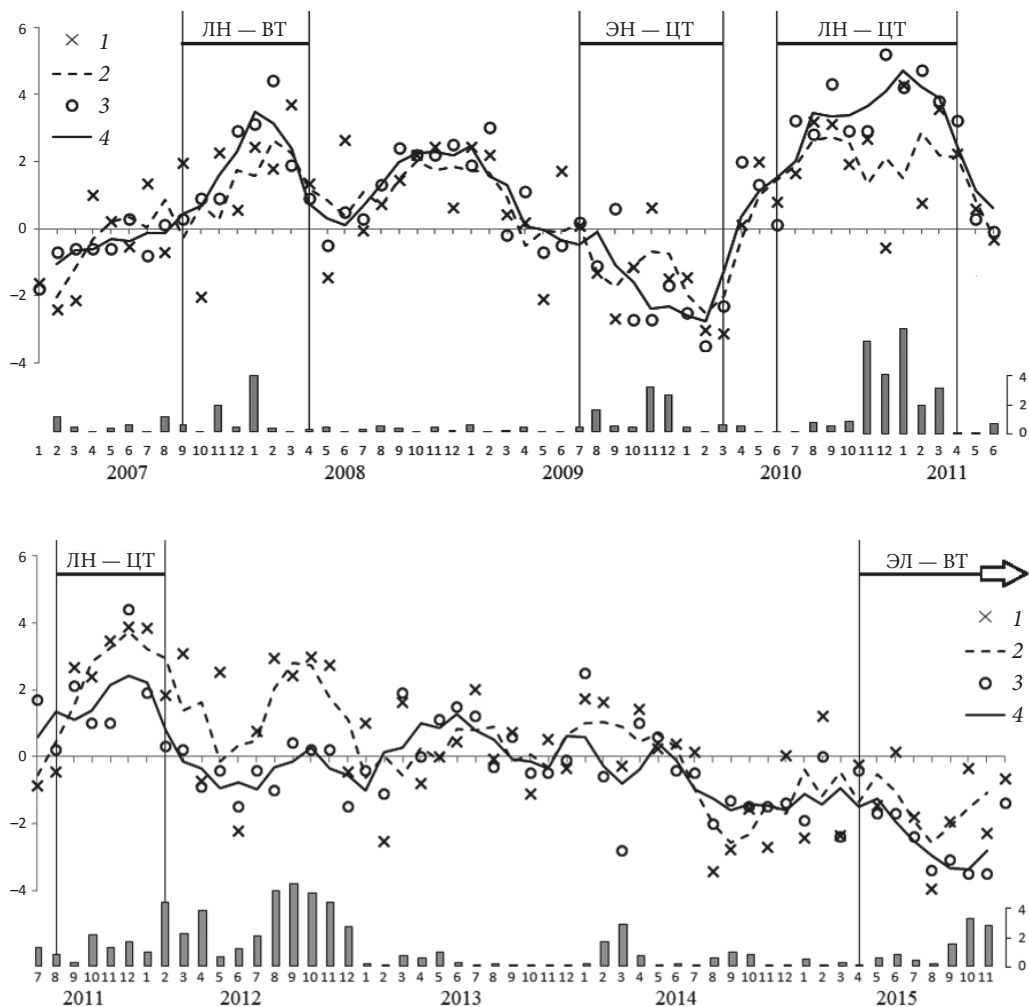


Рис. 4. Результаты верификации модельных расчетов для контрольной выборки ИЮК (графики со шкалой слева):

1 — рассчитанный ИЮК, 2 — его 3-месячное скользящее среднее, 3 — реальный ИЮК, 4 — его 3-месячное скользящее среднее. Квадрат разности значений после 3-месячного скользящего осреднения на диаграмме со шкалой справа приведен под графиком

Эль-Ниньо центрального типа 2009 г. началось раньше считающейся нормой даты — в июле (Лубков, 2017). Понижение наблюдаемого ИЮК началось только в сентябре, а модельно рассчитанного — в августе. Рассчитанный индекс плохо отображает наблюдаемые значения: можно сделать ложный вывод о затухании явления гораздо раньше действительного окончания события.

Ла-Нинья 2010 г. центрального типа по температурным аномалиям началось в июне. Начало явления в аномалиях ГПО совпало с интенсификацией рассчитанного и наблюдаемого ИЮК. Интенсивность максимальной фазы в модельном расчете несколько занижена: в декабре и феврале были существенные выбросы, которые повлияли на 3-месячное скользящее среднее.

Ещё одно явление *Ла-Нинья центрального типа* имело место в 2011–2012 гг., а начало его в аномалиях ТПО наблюдалось в августе. Высокий наблюдаемый ИЮК соответствует месяцу начала явления в океане. В рассчитанном индексе рост разницы давления (начало явления) наблюдалось в сентябре. При модельном расчете индекса несколько завышался наблюдаемый ИЮК, а окончание *Ла-Нинья* определялось на два месяца позже действительного — в апреле 2012 г. Следом за *Ла-Нинья* модель показала наличие ещё одного пика явления с августа по декабрь, который в наблюдаемых значениях отсутствовал.

Для августа—октября 2014 г. моделируемые расчетные индексы были незначительно занижены. Могло сложиться впечатление о начинающемся Эль-Ниньо. В то же время по результатам моделирования, полученным для сентября 2014 г. при помощи моделей международных климатических центров (12 динамических и 5 статистических), как и в нашем случае, прогнозировалось наступление Эль-Ниньо в октябре 2014 г. (Glantz, 2015). Однако в реальности это событие задержалось до апреля 2015 г. По пространственно-временной классификации (Лубков и др., 2017), это событие отнесено к *восточному типу* (Воскресенская и др., 2015). Рост ИЮК наблюдался уже в июне, а рассчитанный в настоящей работе индекс начал расти только в июле. Поэтому в фазу максимальной интенсивности явления модельный расчет дал заниженные результаты.

Следует отметить, что статистический прогноз, выполненный авторами этой работы ранее (Марчукова и др., 2016-а) с использованием индекса ТПО, который рассчитывался для района $Ni\tilde{no}3.4 + Ni\tilde{no}3$ (5° с. ш. — 5° ю. ш. и 170° з. д. — 90° з. д.) с января по октябрь 2015 г., показал хорошее сходство наблюдаемых и рассчитанных значений индекса ТПО в период с октября 2015 г. по март 2016 г. Средняя ошибка отклонения спрогнозированного ряда индекса $Ni\tilde{no}3.4 + Ni\tilde{no}3$ от наблюдаемых значений составила всего 6,7 % или $0,12^\circ\text{C}$. Высокое сходство связано с тем, что для статистического прогноза был взят не предыдущий год, как это следует делать в классическом построении прогностических статистических моделей, а 1997-й — год последнего Эль-Ниньо восточного типа, начало которого тоже наблюдалось весной. Таким образом, при прогнозировании достаточно развитого Эль-Ниньо предпочтительней использовать статистические методы.

Далее проанализируем наборы индексов, которые были включены в конструкции моделей НС для каждого месяца (см. табл. 1). Наиболее часто повторяющиеся индексы приведены в табл. 2. Первый из них — Полярное колебание (POL), известное как Северо-Азиатское. Анализ повторяемости индекса POL в прогностических конструкциях НС показал, что его аномалия в мае играет важную роль в прогнозе ИЮК на апрель—ноябрь следующего года. Рассчитанный в настоящей работе индекс P_5 может служить пространственным аналогом Северо-Азиатского колебания. Как и в случае индекса POL, его майские значения в конструкциях НС выйдут в качестве предикторов аномалий ИЮК в феврале—апреле, июле и августе последующего года.

Следующим в порядке убывания значимости влияния является индекс P_4 , который может характеризовать колебание атмосферного давления между субтропиками южного полушария и Антарктикой. Индекс P_4 встречается в прогнозе ИЮК на январь, февраль, май, ноябрь, декабрь и июль—сентябрь с тем же опережением, что и предыдущие индексы, — на 1 год.

Таблица 2. Наиболее часто встречающиеся индексы дальнедействующих связей в конструкциях НС для каждого месяца

Индекс	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
POL 5*				+	+	+	+	+	+	+	+	
P ₄ 11*	+	+			+		+	+	+		+	+
NAO 4						+	+	+	+	+		
P ₅ 5*		+	+	+			+	+				
WP 5						+	+		+		+	
EP—NP 11*	+			+	+			+		+		
EP—NP 1 и/или 2				+			+	+	+	+	+	

Индекс Северо-Атлантического колебания (NAO) апреля вошел в конструкции НС прогноза ИЮК с июня по октябрь.

Наряду с САК майский индекс Западно-Тихоокеанского колебания (WP) вошел в конструкции НС при прогнозе на июнь, июль и сентябрь. Индекс колебания между восточной и северной частями Тихого океана (EP—NP) в ноябре в конструкциях НС важен для прогноза ИЮК в январе, апреле, мае, августе и ноябре следующего года. Также индекс EP—NP в январе и феврале использован для прогноза ИЮК в апреле и с июля по ноябрь.

Поскольку климатические индексы в наборах конструкций НС имеют определенную повторяемость, можно считать, что механизм формирования и Эль-Ниньо, и Ла-Нинья следует искать на основе характеристик изменчивости в системе океан—атмосфера (последняя наблюдается весной или осенью в умеренных и субполярных широтах Южного или Северного полушария).

5. Заключение

В результате модельных расчетов среднемесячного индекса Южного колебания на основе метода искусственных нейронных сетей и использования в качестве входных элементов модели — индексов дальнедействующих связей системы океан — атмосфера Южного и Северного полушария за период 1950–2006 гг. получены следующие результаты.

Модельные расчеты ИЮК удовлетворительны для весенних месяцев, августа—ноября и января, что показало их сопоставление с реально наблюдавшимися значениями изучаемого параметра.

С учётом типичных месяцев начала двух типов событий Эль-Ниньо и событий Ла-Нинья показана особая важность прогноза ИЮК на апрель и май для восточных типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья, поскольку начало последних приходится преимущественно на эти месяцы. Прогнозировать их при помощи предложенного метода можно зимой.

Установленная повторяемость сочетаний индексов атмосферной циркуляции для прогноза ИЮК указывает на важную роль определенных дальнедействующих процессов в системе океан — атмосфера в умеренных и субполярных широтах Южного и Северного полушария весной или осенью в формировании как Эль-Ниньо, так и Ла-Нинья.

Верификация модели по контрольной выборке за период с 2007 по 2015 г. показала возможность удовлетворительного прогноза начала большей части событий Ла-Нинья и Эль-Ниньо за исключением событий, имевших место в 2009–2010 гг.

Литература

- Воскресенская, Е. Н., Лубков, А. С., Марчукова, О. В., 2015. Пространственная классификация Эль-Ниньо и условия формирования события 2015 года. Системы контроля окружающей среды 2 (22), 80–90.
- Воскресенская, Е. Н., Марчукова, О. В., 2015. Качественная классификация событий Ла-Нинья. Морской гидрофизический журнал 3, 15–26. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2015-3-14-24>
- Воскресенская, Е. Н., Марчукова, О. В., 2017. Пространственная классификация Ла-Нинья. Известия РАН. Физика атмосферы и океана 53 (1), 125–134. <https://doi.org/10.7868/S0002351517010138>.
- Воскресенская, Е. Н., Полонский, А. Б., 1992. Северо-Атлантические колебания и их связь с Эль-Ниньо — южными осцилляциями. Морской гидрофизический журнал 4, 23–30.
- Гущина, Д. Ю., Девитт, Б., Коркмазова, С. А., 2010. Внутрисезонная изменчивость тропической тропосферы и ее воспроизведение в атмосферной модели промежуточной степени сложности. Метеорология и гидрология 11, 11–35.
- Демченко, П. Ф., Кислов, А. В., 2010. Стохастическая динамика природных объектов. Броуновское движение и геофизические примеры, ГЕОС, Москва, 190 с.
- Колмогоров, А. Н., 1957. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения. Доклады Академии Наук СССР 114, 953–956.
- Лубков, А. С., Воскресенская, Е. Н., Кукушкин, А. С., 2013. Восстановление климатических данных гидрооптических характеристик на основе моделирования. Системы контроля окружающей среды 19, 162–165.
- Лубков, А. С., Воскресенская, Е. Н., Кукушкин, А. С., 2016. Метод восстановления среднемесячных значений прозрачности воды на примере северо-западной части Черного моря. Оптика атмосферы и океана 04 (29), 343–350.
- Лубков, А. С., Воскресенская, Е. Н., Марчукова, О. В., 2017. Объективная классификация явлений Эль-Ниньо. Использование и охрана природных ресурсов в России 1 (149), 41–44.
- Марчукова, О. В., Воскресенская, Е. Н., Лубков, А. С., 2016-а. Статистический прогноз Эль-Ниньо 2015–2016 годов и его верификация. Системы контроля окружающей среды 4 (24), 80–90.
- Марчукова, О. В., Маслова, В. Н., Воскресенская, Е. Н., Лубков, А. С., 2016-б. Ла-Нинья 2016 года в рамках пространственной классификации событий. Системы контроля окружающей среды 6 (26), 84–92.
- Монин, А. С., 1999. Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр. Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, 524 с.
- Мохов, И. И., Смирнов, Д. А., 2006. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо — Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний. Известия РАН. Физика атмосферы и океана 42 (5), 650–667.
- Нестеров, Е. С., 2000. Изменчивость характеристик атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе в годы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Метеорология и гидрология 8, 74–83.
- Осовский С., 2002. Нейронные сети для обработки информации, Финансы и статистика, Москва, 344 с.
- Полонский, А. Б., Воскресенская, Е. Н., Башарин, Д. В., Михайлова, Н. В., 2003. Глобальные и региональные проявления Эль-Ниньо в полях приземного давления и температуры в весенний период. Морской гидрофизический журнал 3, 50–62.
- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., Yumagata, T., 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. J. Geophys Res. 112, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>

- Barnston, A. G., He, Y., 1999. Predictive Skill of Statistical and Dynamical Climate Models in SST Forecasts during the 1997—98 El Niño Episode and the 1998 La Niña Onset. *American Met. Society*. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2).
- Barnston, G., Livezey, R. E., 1987. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review* 115 (June), 1083–1126. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2).
- Climate Prediction Center, 2016. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> (дара обращения: 20.02.2018).
- Enfield, D., Mestas-Nunez, A. M., 1999. Multiscale variability in global SST and their relationships with tropospheric climate patterns. *J.Climate* 12 (9), 2719–2733. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2719:MVIGSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2719:MVIGSS>2.0.CO;2).
- Glantz, M. H., 2002. La Niña and its impacts: facts and speculations, Publ. The United Nations University, New York, 271 p.
- Glantz, M. H., 2015. Shades of Chaos: Lessons Learned About Lessons Learned About Forecasting El Niño and Its Impacts. *Int. J. Disaster Risk Sci.* 6, 94–103. <https://doi.org/10.1007/s13753-015-0045-6> (дара обращения: 20.02.2018).
- Haykin, S., 1994. Neural networks, a comprehensive foundation. Macmillan College Publishing Company, N. Y., 823 p.
- Hendon, H. H., Lim, E., Wang, G., Alves, O., Hudson, D., 2009. Prospects for predicting two flavors of El Niño. *Geophysical research letters* 36 (19). <https://doi.org/10.1029/2009GL040100>
- JISAO — Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean. 2016. Pacific Decadal Oscillation (PDO), URL: <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> (дара обращения: 20.02. 2018).
- Larkin, N. K., Harrison, D. E., 2005. On the definition of El Niño and associated seasonal average U. S. weather anomalies. *Geophys. Res. Lett.* 32. L13705. <https://doi.org/10.1029/2005GL022738>
- Lin, X. C., Yu S. Q. 1993. El Niño and rainfall during the flood season (June—August) in China. *Acta Meteorol. Sin.* 51, 434–441. (In Chinese)
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., Glantz, M. H., 2006. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science* 314 (5806), 1740–1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Mo, K. C., White, G. H., 1985. Teleconnections in the Southern Hemisphere. *Monthly weather review* 113, 22–37.
- Philander, S. G., 1990. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, CA, 293 p.
- Rasmusson, E. M., Carpenter, T. H., 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with Southern Oscillation (El Niño). *Monthly Weather Review* 110, 354–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0354:VITSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2)
- Rasmusson, E. M., Wallace, J. M., 1983. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science* 222, 1195–1202.
- Rosenblatt, F., 1962. Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms. Spartan, N. Y., 626 p.
- Trenberth, K. E., Caron, J. M., 2000. The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation. *J.Climate*, 13, 4358–4365. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2).
- Walker, G. T., 1924. Correlation in seasonal variations of weather. *Mem. India Meteorol. Dept.* 24, 275–332.
- Wallace, J. M., Gutzler, D. S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.* 109, 784–812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2).
- Wheeler, M. C., Kiladis, G. N., 1999. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain. *J. Atmos. Sci.* 56, 374–39.
- Yuan, Y., Yang, H., Li, C. Y., 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China (in Chinese). *Acta Meteorol. Sin.* 70, 467–478.
- Yuan, Y., Yang, S., 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO Cycles. *J. Clim.* 25, 7702–7722. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00576.1>.
- Zhou, S., Miller, A. J., Wang, J., Angell, J. K., 2001. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes. *Geophys. Res. Lett.* 28, 4107–4110. <https://doi.org/10.1029/2001GL013660>.

Для цитирования: Лубков А. С., Воскресенская Е. Н., Марчукова О. В. Прогнозирование индекса Южного колебания // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62. Вып. 4. С. 370–388. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2017.404>

References

- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., Yamagata, T., 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.* 112, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Barnston, A. G., He, Y., 1999. Predictive Skill of Statistical and Dynamical Climate Models in SST Forecasts during the 1997–98 El Niño Episode and the 1998 La Niña Onset. *American Met. Society.* [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2).
- Barnston, G., Livezey, R. E., 1987. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review* 115 (June), 1083–1126. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2).
- Climate Prediction Center, 2016. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> (accessed: 20.02.2018).
- Demchenko, P.F., Kislov A. V., 2010. Stokhasticheskaia dinamika prirodnykh ob'ektov. Brounovskoe dvizhenie i geofizicheskie primery [Stochastic dynamics of natural objects]. Brownian motion and geophysical examples, GEOS, Moscow. (In Russian)
- Enfield D., Mestas-Nunez A.M., 1999. Multiscale variability in global SST and their relationships with tropospheric climate patterns. *J. Climate* 12(9), 2719–2733. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2719:MVISS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2719:MVISS>2.0.CO;2)
- Glantz, M. H., 2002. La Niña and its impacts: facts and speculations. Publ. The United Nations University, New York.
- Glantz, M. H., 2015. Shades of Chaos: Lessons Learned About Forecasting El Niño and Its Impacts. *Int. J. Disaster Risk Sci.* 6, 94–103. <https://doi.org/10.1007/s13753-015-0045-6>
- Gushchina, D.Y., Korkmazova, S.A., Dewitte, B., 2010. Vnutrisezonnaia izmenchivost' tropicheskoi troposfery i ee vosproizvedenie v atmosfernoii modeli promezhutochnoi stepeni slozhnosti [Intraseasonal tropical variability in an intermediate complexity atmospheric model]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]* 35(4), 237–252.
- Haykin, S., 1994. Neural networks, a comprehensive foundation. Macmillan College Publishing Company, N. Y.
- Hendon, H. H., Lim, E., Wang, G., Alves, O., Hudson, D., 2009. Prospects for predicting two flavors of El Niño. *Geophysical research letters* 36 (19). <https://doi.org/10.1029/2009GL040100>
- JISAO — Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, 2016. Pacific Decadal Oscillation (PDO), URL: <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.
- Kingtse C. Mo, Glenn H. White, 1985. Teleconnections in the Southern Hemisphere. *Monthly weather review* 113, 22–37.
- Kolmogorov, A. N., 1957. O predstavlenii nepreryvnykh funktsii neskol'kikh peremennykh v vide superpozitsii nepreryvnykh funktsii odnogo i drugogo [Representation of continuous functions of several variables as the superposition of continuous functions of one variable and addition]. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]* 114 (5), 953–956.
- Larkin, N. K., Harrison, D. E., 2005. On the definition of El Niño and associated seasonal average U. S. weather anomalies. *Geophys. Res. Lett.* 32. L13705. <https://doi.org/10.1029/2005GL022738>
- Lin, X. C., Yu S. Q., 1993. El Niño and rainfall during the flood season (June–August) in China. *Acta Meteorol. Sin.* 51, 434–441. (In Chinese)
- Lubkov, A. S., Voskresenskaya, E. N., Kukushkin, A. S., 2013. Vosstanovlenie klimaticheskikh dannykh gidroopticheskikh kharakteristik na osnove modelirovaniia [The reconstruction of hydrooptical parameters data sets based on the modeling]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy [Environmental monitoring systems]* 19, 162–165. (In Russian)
- Lubkov, A. S., Voskresenskaya, E. N., Kukushkin, A. S., 2016. Metod vosstanovleniia srednemesiachnykh znachenii prozrachnosti vody na primere severo-zapadnoi chasti Chernogo moria [Method for reconstructing the monthly mean water transparencies for the Northwestern part of the Black Sea as an example]. *Optika atmosfery i okeana [Atmos. Ocean Opt.]* 29, 457–464. <https://doi.org/10.1134/S1024856016050092>.
- Lubkov, A. S., Voskresenskaya, E. N., Marchukova, O. V., 2017. Ob'yektivnaia klassifikatsiia iavlenii El'-Niño [Objective classification of El Niño]. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii [Use and protection of natural resources of Russia]* 1 (149), 41–44. (In Russian)
- Marchukova O. V., Voskresenskaya E. N., Lubkov A. S., 2016-a. 2015–2016 Statisticheskii prognoz El'-niño 2015–2016 godov i ego verifikatsiia [El Niño statistical forecast and its verification]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy [Environmental control systems]* 4 (24), 80–90. (In Russian)

- Marchukova, O. V., Voskresenskaya, E. N., Maslova, V. N., Lubkov, A. S., 2016-b. La-Niña 2016 goda v ramkakh prostranstvennoy klassifikatsii sobytii [La Niña 2016 within the spatial events classification]. *Sistemy kontrolia okruzhayushchei sredy* [Environmental control systems] 6 (26), 84–92. (In Russian)
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., Glantz, M. H., 2006. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science* 314 (5806), 1740–1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Mokhov, I. I., Smirnov, D. A., 2006. Issledovanie vzaimnogo vliianiia protsessov El'-Nin'o — Iuzhnoe kolebanie i Severo-Atlanticheskogo i Arkticheskogo kolebanii [Study of the mutual influence of the El Niño–Southern Oscillation processes and the North Atlantic and Arctic Oscillations]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Proceedings of the RAS. Atmospheric and Oceanic Physics] 42 (5), 598–614. <https://doi.org/10.1134/S0001433806050069>
- Monin, A. S., 1999. *Gidrodinamika atmosfery, okeana i zemnykh nedr* [Hydrodynamics of the atmosphere, the ocean and the earth's interior], Gidrometeoizdat, Saint Petersburg. (In Russian)
- Nesterov, E. S., 2000. *Izmenchivost' kharakteristik atmosfery i okeana v Atlantiko-Evropeiskom regione v gody sobytii El'-Nin'o i La-Nin'ia* [Variability of atmospheric and oceanic characteristics in the European-Atlantic region in the El-Niño and La-Niña years]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology] 8, 43–50.
- Osovskii, S., 2002. *Neironnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural Networks for Data Processing], Finansy i statistika, Moscow. (In Russian)
- Philander, S. G., 1990. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA.
- Polonskii, A. B., Voskresenskaya, E. N., Basharin, D. V., Mikhailova, N. V., 2003. *Global'nye i regional'nye proyavleniia El'-Nin'o v polyakh prizemnogo davleniia i temperatury v vesennii period* [Global and regional El Niño manifestations in the fields of surface pressure and temperature in spring]. *Physical Oceanography* 3, 50–62. (In Russian)
- Rasmusson, E. M., Carpenter, T. H., 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with Southern Oscillation (El Niño). *Monthly Weather Review* 110, 354–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0354:VITSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2)
- Rasmusson, E. M., Wallace, J. M., 1983. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science* 222, 1195–1202.
- Rosenblatt, F., 1962. *Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms*. Spartan, N. Y.
- Trenberth, K. E., Caron, J. M., 2000. The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation. *J. Climate*, 13, 4358–4365. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4358:TSORSL>2.0.CO;2)
- Voskresenskaya, E. N., Lubkov, A. S., Marchukova, O. V., 2015. *Prostranstvennaia klassifikatsiia El'-Nin'o i usloviia formirovaniia sobytii 2015 goda* [El-Niño spatial classification and conditions of 2015 even generation]. *Sistemy kontrolia okruzhayushchei sredy* [Environmental monitoring systems] 2 (22), 80–90. (In Russian)
- Voskresenskaya, E. N., Marchukova, O. V., 2015. *Kachestvennaia klassifikatsiia sobytii La-Nin'ya* [Qualitative classification of the La Niña events]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Physical Oceanography] 3, 14–24. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2015-3-14-24>
- Voskresenskaya, E. N., Marchukova, O. V., 2017. *Prostranstvennaia klassifikatsiia La-Nin'ia* [Spatial classification of La-Niña events]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmosphere and Ocean Physics].
- Voskresenskaya, E. N., Polonskii, A. B., 1992. *Severoatlanticheskie kolebaniia i ikh svyaz' s El'-Nin'o — Iuzhnyimi ostsiiliatsiiami* [North Atlantic oscillation and their relation to El Niño — Southern Oscillation]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Physical Oceanography] 4, 23–30. (In Russian)
- Walker, G. T., 1924. Correlation in seasonal variations of weather. *Mem. India Meteorol. Dept.* 24, 275–332.
- Wallace, J. M., Gutzler, D. S., 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.* 109, 784–812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
- Wheeler, M. C., Kiladis, G. N., 1999. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain. *J. Atmos. Sci.* 56, 374–39.
- Yuan, Y., Yang, H., Li, C. Y., 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China (in Chinese). *Acta Meteorol. Sin.* 70, 467–478.
- Yuan, Y., Yang, S., 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO Cycles. *J. Clim.* 25, 7702–7722. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00576.1>
- Zhou, S., Miller, A. J., Wang, J., Angell, J. K., 2001. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes. *Geophys. Res. Lett.* 28, 4107–4110. <https://doi.org/10.1029/2001GL013660>

For citation: Lubkov A. S., Voskresenskaya E. N., Marchukova O. V. Forecasting of the Southern Oscillation Index. Vestnik SPbSU. Earth Sciences, 2017, vol. 62, issue 4, pp. 370–388. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2017.404>

Статья поступила в редакцию 24 марта 2017
Статья рекомендована в печать 12 декабря 2017

Контактная информация:

Лубков Андрей Сергеевич — andrey-ls2015@yandex.ru

Воскресенская Елена Николаевна — доктор географических наук, профессор; olesjath@mail.ru

Марчукова Олеся Владимировна — elena_voskr@mail.ru

Lubkov Andrey S. — andrey-ls2015@yandex.ru

Voskresenskaya Elena N. — Deputy Director, PhD, Professor; olesjath@mail.ru

Marchukova Olesya V. — elena_voskr@mail.ru