

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Амплитудно–частотные особенности явлений Эль–Ниньо разного типа и их изменения в последние десятилетияИ. И. Мохов,^{1,2, а} Н. Н. Медведев¹¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*² *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3*

Поступила в редакцию 05.03.2022, после доработки 17.04.2022, принята к публикации 25.04.2022.

Представлены результаты анализа особенностей квазициклических явлений Эль–Ниньо разного типа и их изменений с использованием многолетних данных (1870–2020 гг.). Для детектирования изменений характерных периодов и амплитуд явлений Эль–Ниньо наряду с вейвлетным анализом использовался метод, основанный на анализе фазовых портретов для квазициклических процессов. Для оценки когерентности явлений Эль–Ниньо разного типа использовался кросс-вейвлетный анализ. Отмечены существенные различия изменений явлений Эль–Ниньо разного типа. При этом выявлены значительные различия для периодов до и после середины 20 века. На фоне больших междесятилетних вариаций вековые тенденции для амплитуды и периода квазициклических явлений Эль–Ниньо статистически незначимы. При этом наибольшие амплитуды явлений Эль–Ниньо отмечены в последние десятилетия.

Ключевые слова: явления Эль–Ниньо разного типа, индексы Niño3 и Niño4, анализ фазовых портретов, вейвлетный и кросс-вейвлетный анализ.

УДК: 551.5. PACS: 92.10.ak, 92.60.-e.

ВВЕДЕНИЕ

С квазициклическими явлениями Эль–Ниньо, характеризующимися аномальным увеличением температуры поверхности океана (ТПО) в экваториальных широтах Тихого океана с интервалами в 2–8 лет (со средней периодичностью около 4–5 лет), связаны сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры. Противоположная фаза этих квазициклических процессов с отрицательными аномалиями ТПО в тихоокеанских экваториальных областях называется Ла–Нинья. Наиболее сильное проявление этих процессов с экстремальными значениями ТПО отмечается обычно в конце года — в начале следующего года. В многочисленных исследованиях процессов, связанных с явлениями Эль–Ниньо, проведен разносторонний анализ их особенностей и механизмов формирования с использованием различных данных и модельных расчетов. Эффекты квазирегулярных процессов Эль–Ниньо значимо проявляются в особенностях атмосферной циркуляции, температурного и гидрологического режимов не только в тропических, но и в средних широтах, и даже в полярных. В том числе выявлено значимое влияние Эль–Ниньо для режимов центров действия атмосферы, блокингов, тропических циклонов, региональных режимов наводнений, летних засух и зимних морозов [1]–[55].

Проявляются разные типы явлений Эль–Ниньо и для их детектирования предложен ряд индексов. Каноническое явление Эль–Ниньо характеризуется достаточно сильными положительными аномалиями температуры поверхности в экваториальных широтах восточной части Тихого океана. Наряду

с этим выделяются проявления процессов Эль–Ниньо с сильными аномалиями температуры поверхности не в восточной, а в центральной части Тихого океана в экваториальных широтах [20, 23].

Анализу особенностей явлений Эль–Ниньо разного типа посвящено много исследований [4, 11, 12, 14, 19–24, 28, 32]. В [53], в частности, представлены оценки изменений в течение последних семи десятилетий (1950–2019 гг.) частот переходов между разными фазами процессов Эль–Ниньо. Выявлены существенные различия тенденций для явлений Эль–Ниньо и Ла–Нинья разного типа, характеризующихся аномалиями температуры поверхности в экваториальных широтах восточной (Niño3) и центральной (Niño4) областей Тихого океана. В том числе, отмечены тенденции увеличения повторяемости фаз Эль–Ниньо с использованием индекса Niño4 и повторяемости нейтральных фаз с использованием индекса Niño3. При этом для обоих типов Эль–Ниньо проявляется тенденция уменьшения повторяемости фаз Ла–Нинья. Существенный вклад в отмеченные тенденции связан с режимами продолжительного, не менее года, проявления соответствующих фаз.

Цель данной работы — анализ амплитудно–частотных особенностей явлений Эль–Ниньо разного типа с оценкой тенденций их изменений с использованием долгосрочных данных.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

При анализе использовались среднемесячные данные для разных индексов явлений Эль–Ниньо, в том числе индексы, определяемые аномалиями ТПО в экваториальных областях Niño3 (5° с.ш.–5° ю.ш., 150° з.д.–90° з.д.) и Niño4 (5° с.ш.–5° ю.ш., 160° в.д.–150° з.д.)

^а E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru

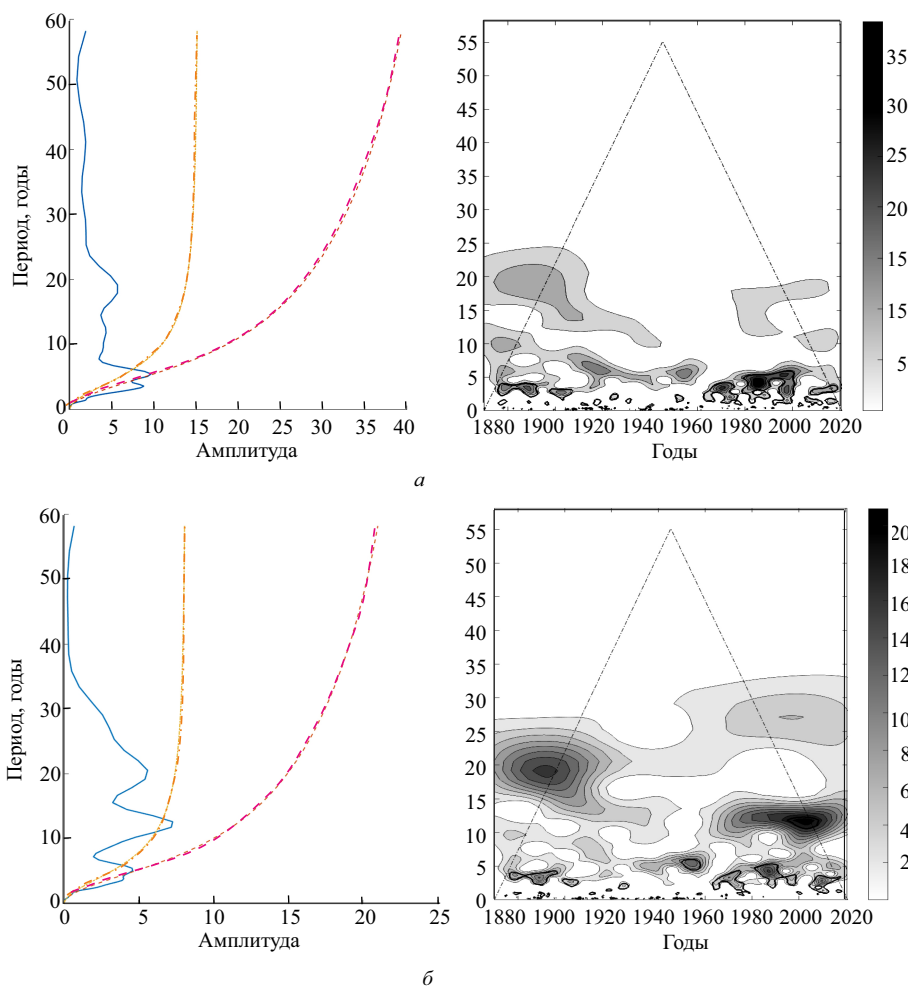


Рис. 1. Интегральные (слева) и локальные (справа) вейвлет-спектры для аномалий индексов Niño3 (а) и Niño4 (б) по данным для периода 1870–2020 гг. На локальных спектрах штрих-пунктирные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области, где мощность сигнала больше, чем ожидается для модели стационарного красного шума на уровне значимости $p = 0.05$. На интегральных спектрах штриховые линии показывают 95%-й квантиль значений мощности для модели стационарного красного шума, а штрих-пунктирные — ее среднее значение

Тихого океана для периода 1870–2020 гг. с решением в виде
(https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/).

2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для определения особенностей изменений явлений Эль-Ниньо, в том числе изменений их характерных периодов и интенсивности, использовался вейвлетный и кросс-вейвлетный анализ [56].

Изменения характерных периодов и амплитуд явлений Эль-Ниньо диагностировались также с использованием метода, предложенного в [57] (см. также [9, 15, 58]). Этот метод основан на анализе фазовых портретов для квазициклических процессов, проявляющихся в виде событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. События Эль-Ниньо и Ла-Нинья характеризовались соответствующими положительными и отрицательными аномалиями ТПО $T(t)$ в экваториальных бассейнах Тихого океана Niño3 и Niño4. При статистически значимой линейной регрессии $d^2T(t)/dt^2$ с отрицательным коэффициентом регрессии $-\omega^2(t)$ процесс можно характеризовать уравнением гармонического осциллятора [55]

$$d^2T/dt^2 + \omega^2T = 0, \quad (1)$$

$$T(t) = A(t) \sin[\omega(t)t + \varphi(t)]. \quad (2)$$

Характерную частоту $\omega(t)$ и соответствующий период $P(t)$ можно определить аналогично [55] с использованием метода наименьших квадратов для разных скользящих временных интервалов длительностью I_0 . Для отфильтровывания высокочастотного шума исходные данные можно сглаживать скользящим осреднением с разными временными окнами I_s . Характерные периоды для явлений Эль-Ниньо изменяются в диапазоне 2–7 лет, для фильтрации более высокочастотных мод температурной изменчивости использовалось скользящее усреднение исходных данных, в частности на интервалах 12 или 24 мес. Подобный метод позволяет анализировать изменения амплитуды и периода конкретной колебательной моды и оценивать их взаимосвязь.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены локальные и интегральные вейвлет-спектры для аномалий индексов Niño3 и Niño4 по данным для периода 1870–2020 гг.

Сравнение особенностей вейвлет-спектров для индексов Niño3 и Niño4 на рис. 1 свидетельствует, что наиболее значимы вариации с периодами около 5 лет. При этом проявляются их значительные различия. В частности, для индекса Niño4 существенно более значимы, чем для индекса Niño3, междесятилетние вариации. Отмечены значительные различия особенностей локальных вейвлет-спектров для временных интервалов до и после середины 20 века.

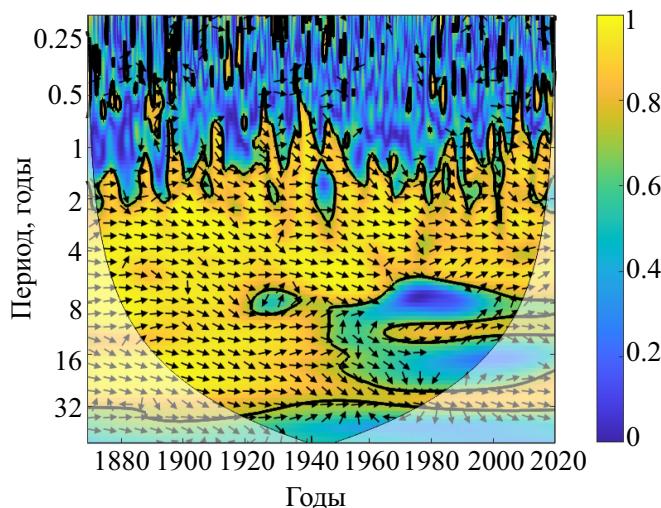


Рис. 2. Вейвлет-когерентность аномалий индексов Niño3 и Niño4 для периода 1870–2020 гг. Сплошные линии отделяют области краевых эффектов, а жирные линии ограничивают области, где вейвлет-когерентность отлична от нуля на уровне значимости $p = 0.05$

Результаты кросс-вейвлетного анализа для аномалий индексов Niño3 и Niño4 на рис. 2 свидетельствуют об их значимой когерентности для всего анализируемого периода 1870–2020 гг. для вариаций с периодами в диапазоне от 2 до 7–8 лет. При этом не выявлено их значимой когерентности для наиболее долгопериодных вариаций с периодами более 3 десятилетий. Выявлено резкое изменение когерентности разных индексов Эль-Ниньо с середины 20 века для вариаций с периодами около 1–2 десятилетий. Это может быть связано не обязательно с реальными изменениями, а с качеством более ранних данных.

В связи с отмеченными особенностями изменений индексов Niño3 и Niño4 и их взаимных изменений для периода 1870–2020 гг. на рис. 3 представлены локальные и интегральные вейвлет-спектры для аномалий индексов Niño3 и Niño4 по данным только с середины 20 века. Согласно интегральным вейвлет-спектрам для индексов Niño3 и Niño4 на рис. 3, как и на рис. 1, наиболее значимы вариации с периодами около 5 лет. Как и для всего периода 1870–2020 гг., междесятилетние вариации для индекса Niño4 для периода 1950–2020 гг. существенно более значимы, чем для индекса Niño3. При этом для периода 1950–2020 гг. отсутствует максимум в интегральном вейвлет-спектре для вариаций индекса Niño4 с периодами около двух десятилетий, отмеченный на рис. 1, б.

Более детально эволюцию явлений Эль-Ниньо можно проанализировать с использованием соответствующих фазовых портретов. На рис. 4 показаны фазовые портреты по данным для индексов Niño3 (а) и Niño4 (б) для периода 1950–2020 гг. (при $I_s = 12$ мес.). Траектории сильнейших явлений Эль-Ниньо в последние десятилетия выделены разными цветами. Различие фазовых портретов на рис. 4 свидетельствует о существенном различии динамики явлений Эль-Ниньо разного типа, характеризующихся температурными аномалиями в восточных и центральных экваториальных областях Тихого океана.

С использованием фазовых портретов проведен также анализ изменений характерных периодов и амплитуд явлений Эль-Ниньо на основе метода, предложенного в [55]. При этом использовались различные скользящие осреднения исходных среднемесячных данных, в том числе с $I_s = 12$ мес. и $I_s = 24$ мес., а также для разных скользящих временных интервалов I_0 , на которых оценивались характерные периоды и амплитуды явлений Эль-Ниньо, в том числе с $I_0 = 84$ мес. и $I_0 = 120$ мес.

На рис. 5 представлены изменения характерных периодов (а, в) и амплитуд (б, г) квазициклических явлений Эль-Ниньо, характеризующихся индексом Niño3, по данным для периода 1870–2020 гг. при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 120$ мес. (а, б) и при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 84$ мес. (в, г). На фоне больших междесятилетних вариаций проявляется слабая вековая тенденция увеличения амплитуды и уменьшения периода для явлений Эль-Ниньо, детектируемых индексом Niño3, для скользящих десятилетних и семилетних интервалов, хотя для семилетних интервалов некоторое общее увеличение амплитуды проявляется только с середины 20 века.

На рис. 6 представлены изменения характерных периодов (а, в) и амплитуд (б, г) квазициклических явлений Эль-Ниньо, характеризующихся индексом Niño4, по данным для периода 1870–2020 гг. при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 120$ мес. (а, б) и при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 84$ мес. (в, г). Для явлений Эль-Ниньо, детектируемых индексом Niño4, для скользящих десятилетних и семилетних интервалов на фоне больших междесятилетних вариаций также проявляется слабая вековая тенденция увеличения амплитуды. При этом для периода заметных тенденций для скользящих десятилетних интервалов не проявляется, а для скользящих семилетних интервалов проявляется вековая тенденция увеличения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена диагностика долговременных изменений периодов и амплитуд для процессов формирования разных типов Эль-Ниньо с анализом фазовых портретов и их эволюции с использованием разных индексов, в том числе индексов Niño3 и Niño4. Выявлены существенные различия изменений периодов и амплитуд для явлений Эль-Ниньо, характеризующихся наибольшими аномалиями температуры поверхности в восточной и центральной областях в экваториальных широтах Тихого океана, детектируемых индексами Niño3 и Niño4, соответственно.

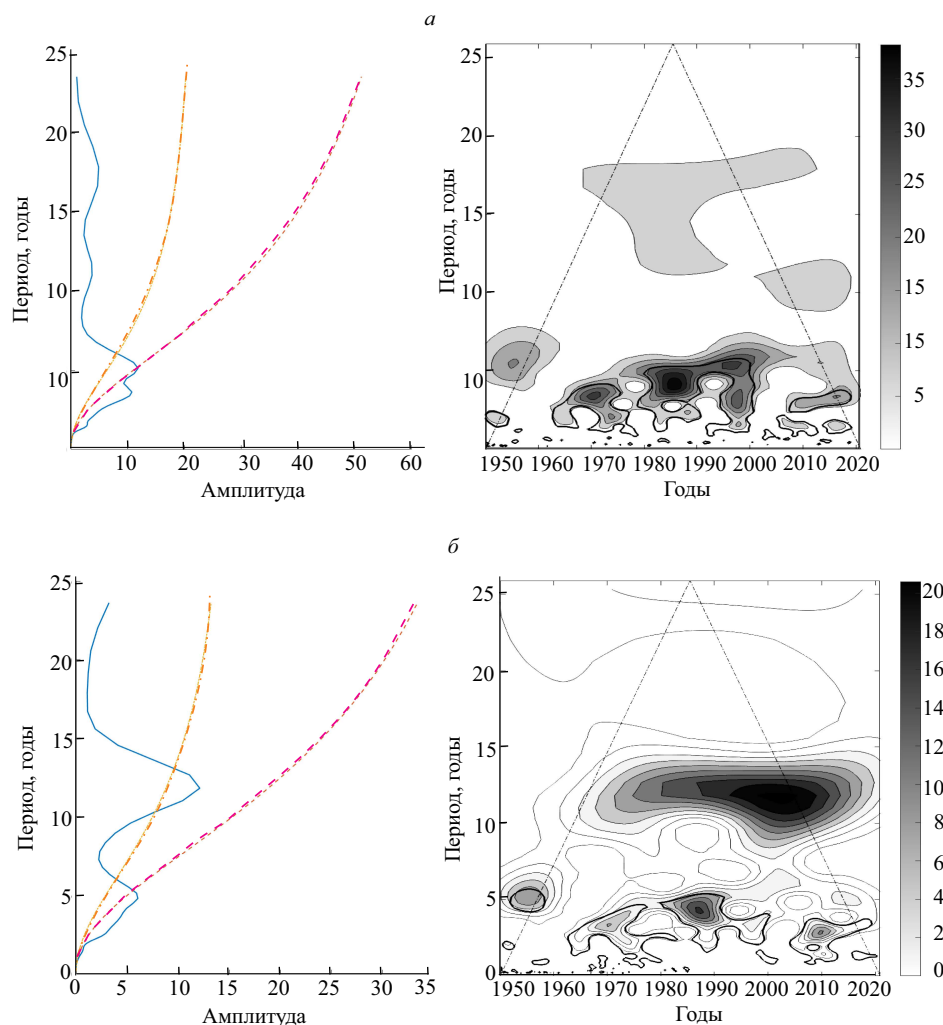


Рис. 3. Интегральные (слева) и локальные (справа) вейвлет-спектры для аномалий индексов Niño3 (а) и Niño4 (б) по данным за период 1950–2020 гг.

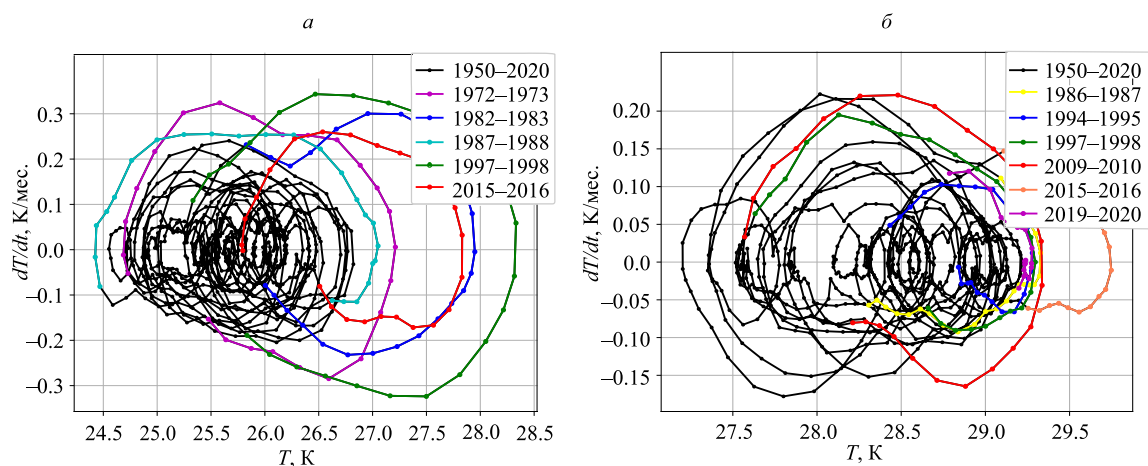


Рис. 4. Фазовые портреты для Эль-Ниньо по данным индексов Niño3 (а) и Niño4 (б) за период 1950–2020 гг. (при $T_s = 12$ мес.)

Отмечены значительные различия для временных интервалов до и после середины 20 века. При этом наибольшие амплитуды явлений Эль-Ниньо отмечены в последние десятилетия. На фоне больших междесятилетних вариаций вековые тенденции для амплитуды и периода квазициклических явлений Эль-Ниньо статистически незначимы. В последние

десятилетия проявляется слабая тенденция увеличения амплитуды явлений Эль-Ниньо, детектируемых разными индексами. Для явлений Эль-Ниньо, детектируемых индексом Niño3, проявляется слабая тенденция уменьшения характерного периода. При этом подобная тенденция не проявляется при использовании индекса Niño4.

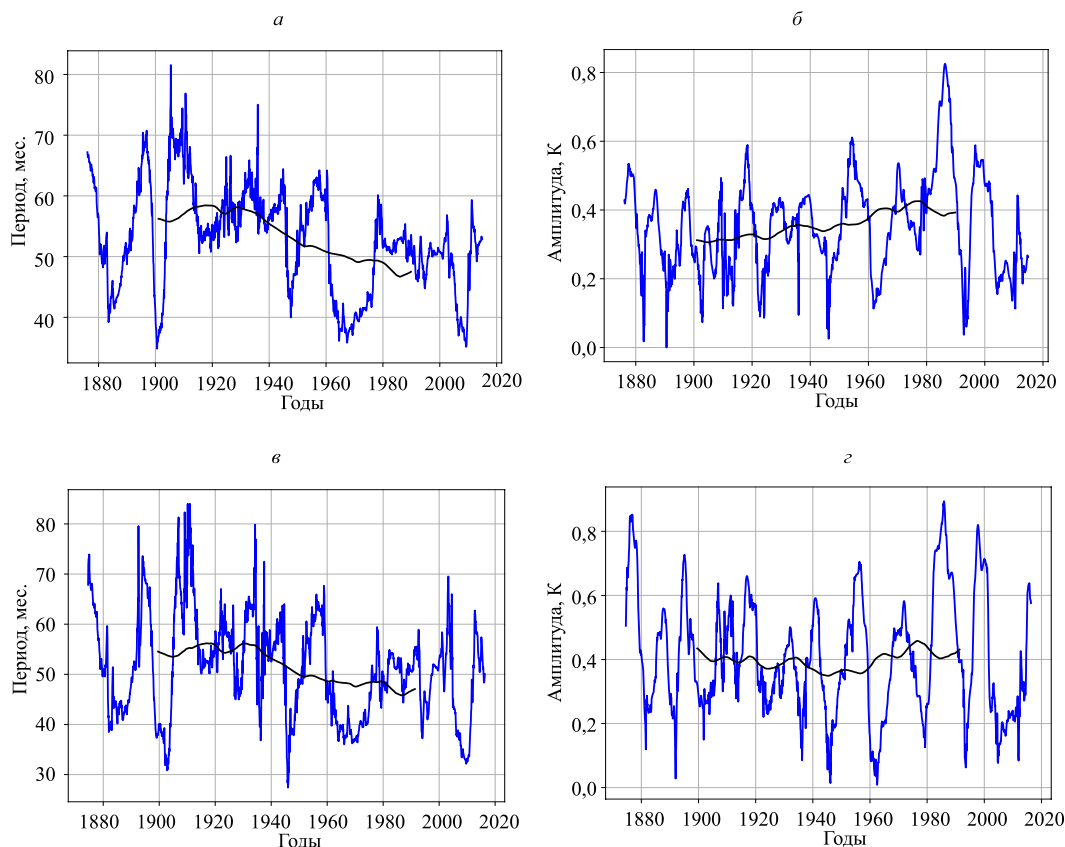


Рис. 5. Изменения характерных периодов (*а, в*) и амплитуд (*б, г*) квазициклических явлений Эль-Ниньо, характеризующих индексом Niño3, по данным для периода 1870–2020 гг. при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 120$ мес. (*а, б*) и при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 84$ мес. (*в, г*). Черные кривые — при 50-летнем скользящем осреднении

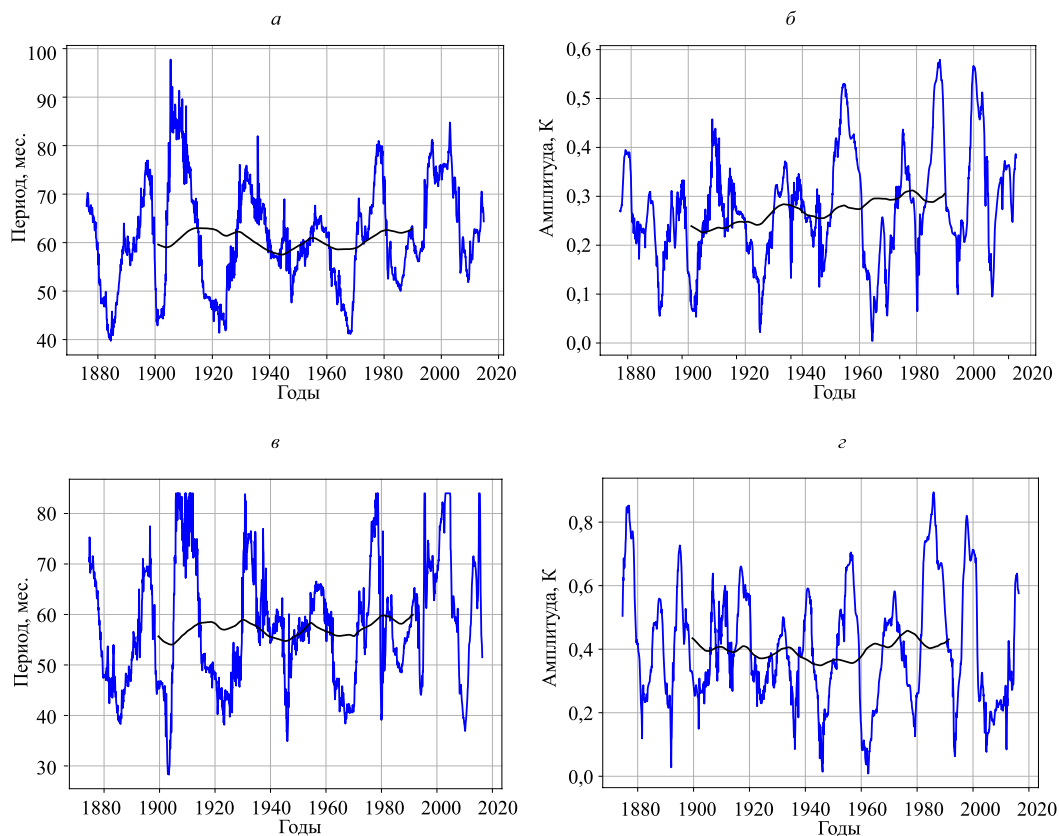


Рис. 6. Изменения характерных периодов (*а, в*) и амплитуд (*б, г*) квазициклических явлений Эль-Ниньо, характеризующих индексом Niño4, по данным для периода 1870–2020 гг. при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 120$ мес. (*а, б*) и при $I_s = 24$ мес. и $I_0 = 84$ мес. (*в, г*). Черные кривые — при 50-летнем скользящем осреднении

Работа выполнена в рамках проекта РНФ (19-17-00240).

Особенности явлений Эль-Ниньо разного типа анализировались в рамках соглашения № 075-15-2021-577 Министерства науки и высшего образования РФ с ИФА имени А. М. Обухова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. V. Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge Univ. Press, 2021.
- Bjerknes J. // *Tellus*. 1966. **18**. P. 820.
- Bjerknes J. // *Mon. Wea. Rev.* 1969. **97**. P. 163.
- Fu C., Diaz H.F., Fletcher J.O. // *Mon. Wea. Rev.*, 1986. **114**. P. 1716.
- Trenberth K.E. // *BAMS*. 1997. **78**. P. 2771.
- Neelin J.D., Battisti D.S., Hirst A.C. et al. // *J. Geophys. Res.* 1998. **103**. P. 14261.
- Арне К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С. и др. // Доклады АН. 1999. **366**, №2. С. 248.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Клещенко Л.К., Аристова Л.Н. // *Метеорология и гидрология*. 1999. № 5. С. 32.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Хворостьянов Д.В. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2000. **36**, № 6. С. 741.
- Latif M., Sperber K., Arblaster J. et al. // *Clim. Dyn.* 2001. **18**. P. 255.
- Trenberth K., Stepaniak D. // *J. Clim.* 2001. **14**. N 3. P. 1697.
- Xu J., Chan J.C.L. // *J. Clim.* 2001. **14**. N 3. P. 418.
- Петросянци М.А., Гущина Д.Ю. // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 8. С. 24.
- Horii T., Hanawa K. // *Geophys. Res. Lett.* 2004. **31**, L06304
- Mokhov I.I., Khvorostyanov D.V., Eliseev A.V. // *Intern. J. Climatol.* 2004. **24**. P. 401.
- Larkin N.K., Harrison D.E. // *Geophys. Res. Lett.* 2005. **32**. P. L13705.
- McPhaden M.J., Zebiak S.E., Glantz M.H. // *Science*. 2006. **314**. P. 1740.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. **42**, № 5. С. 650.
- Hasegawa T., Horii T., Hanawa K. // *Geophys. Res. Lett.* 2006. **33**, L02609
- Ashok K., Behera S.K., Rao S.A. et al. // *J. Geophys. Res.* 2007. **112**, C11007
- Bronnimann S. // *Rev. Geophys.* 2007. **45**, RG3003.
- Yu J.-Y., Kao H.-Y. // *J. Geophys. Res.* 2007. **112**, D13106.
- Ashok K., Yamagata T. // *Nature*. 2009. **461**. P. 481.
- Kao H.-Y., Yu J.-Y. // *J. Clim.* 2009. **22**. P. 615.
- Kug J.S., Jin F.F., An S.I. // *J. Climate*. 2009. **22**. P. 1499.
- Yeh S.-W. et al. // *Nature*. 2009. **461**. P. 511.
- Collins M., An S.-I., Cai W. et al. // *Nat. Geosci.* 2010. **3**. P. 391.
- Lee T., McPhaden M.J. // *Geophys. Res. Lett.* 2010. **37**, L14603.
- Мохов И.И. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. **47**, № 6. С. 709.
- Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B. // *Geophys. Res. Lett.* 2011. **38**, L10704.
- Ham Y.-G., Kug J.-S. // *Clim. Dyn.* 2012. **39**. P. 383.
- Yuan Y., Yang S. // *J. Clim.* 2012. **25**. P. 7702.
- Watanabe M., Kug J.-S., Jin F.-F. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2012. **39**, L20703.
- Bellenger H., Guilyardi E., Leloup J. et al. // *Clim. Dyn.* 2014. **42**. P. 1999.
- Kim S.T., Cai W., Jin F.F. et al. // *Nat. Clim. Change*. 2014. **4**. P. 786.
- Железнова И.В., Гущина Д.Ю. // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 3. С. 36.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. // *Доклады АН*. 2015. **464**, № 6. С. 722.
- Latif M., Semenov V.A., Wonsun P. // *Climatic Change*. 2015. **132**. P. 489.
- Мохов И.И., Семенов В.А. // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 16.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А. // *Доклады АН*. 2016. **467**, № 5. С. 580.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 10. С. 22.
- Cai W., Wang G., Dewitte B. et al. // *Nature*. 2018. **564**. P. 201.
- Mokhov I.I., Timazhev A.V. // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. E. Astakhova (ed.). 2019. Rep. N 49. WCRP Rep. N 12/2019. S. 6. P. 07.
- Ren H.-L., Zuo J., Deng Y. // *Clim. Dyn.* 2019. **52**. P. 5361.
- Wang B., Luo X., Yang Y.-M. et al. // *PNAS*. 2019. **116**. P. 22512.
- Wang Y., Luo Y., Lu J., Liu F. // *Clim. Dyn.* 2019. **52**. P. 1871.
- Zhang Z., Ren B., Zheng J. // *Sci. Rep.* 2019. **9**, 8373.
- Марчукова О.В., Лубков А.С., Воскресенская Е.Н. // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2020. **65**. Вып. 1. С. 96.
- Мохов И.И. // *Доклады АН. Науки о Земле*. 2020. **493**, № 2. С. 93.
- Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 11. С. 5.
- Carreric A., Dewitte B., Cai W. et al. // *Clim. Dyn.* 2020. **54**. P. 901.
- Beobide-Arsuaga G., Bayr T., Reintges A., Latif M. // *Clim. Dyn.* 2021. **56**. P. 3875.
- Мохов И.И. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2022. **58**, № 1. С. 3.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. 2022. **58**, № 3. С. 239.
- Мохов И.И. // *Вестник РАН*. 2022. **92**, № 1. С. 3.
- Jevrejeva S., Moore J., Grinsted A. // *J. Geophys. Res.* 2003. **108** (D21). P. 4677.
- Mokhov I.I. // *Ann. Geophys.* 1993. **12** (Suppl. II). P. C334.
- Mokhov I.I., Medvedev N.N. // *Research Activities in Earth System Modelling*. E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. WCRP Report N 4/2021. S. 2. P. 13.

The Amplitude–Frequency Features of Different El Niño Types and Their Changes in Recent Decades

I.I. Mokhov^{1,2,a}, N.N. Medvedev¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Atmospheric Physics
Moscow, 119991, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS. Moscow, 119017, Russia*

E-mail: ^amokhov_ii@physics.msu.ru

Features of quasi-cyclic El Niño phenomena of various types and their changes have been analyzed using long-term data (1870–2020). Changes in the characteristic periods and amplitudes of El Niño have been detected using wavelet analysis in combination with a method based on the analysis of phase portraits for quasi-cyclic processes. Cross-wavelet analysis has been used to assess the coherence of different El Niño types. Substantial differences in changes in different El Niño types have been revealed; here, significant differences have been revealed for periods before and after the middle of the 20th century. Against the background of large interdecadal variations, the secular trends for the amplitude and period of quasi-cyclic El Niño phenomena are statistically insignificant. In this case, the amplitudes of El Niño phenomena are the largest in recent decades.

Keywords: different El Niño types, Niño3 and Niño4 indices, phase portrait analysis, wavelet and cross wavelet analysis.

PACS: 92.10.ak, 92.60.-e.

Received 05 March 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. **77**, No. 3. Pp. 542–548.

Сведения об авторах

1. Мохов Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН; тел.: (495) 939-38-06, (495) 951-55-65, e-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru, mokhov@ifaran.ru.
2. Медведев Никита Николаевич — студент; тел.: (495) 939-38-06, e-mail: medvedev.nn19@physics.msu.ru.