

Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 463—477.  
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(68):463—477.

## ***ОКЕАНОЛОГИЯ***

Научная статья  
УДК 551.461.25:[551.465.7:551.513](265)  
doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477

### **Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание**

*Валерий Николаевич Малинин, Максим Алексеевич Смирнов*

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
malinin@rshu.ru

*Аннотация.* В статье обсуждаются особенности межгодовых колебаний уровня океана в экваториальной зоне Тихого океана по спутниковой альтиметрии за период 1993—2019 гг. с использованием базы данных AVISO (Франция). Выполнен расчет линейных трендов уровня океана в узлах сетки архива AVISO и показано, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают +5,2 мм/год. Показано, что во время Эль-Ниньо уровень в восточной части экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья отмечается обратная картина. При этом разница высот уровня океана между его западной и восточной частью составляет 350 мм. В центрах наибольших аномалий уровня выбрано 2 разреза. Повышение уровня в западном разрезе характеризует Южное колебание в фазе Ла-Нинья ( $SL_{SO}$ ), в восточном — Эль-Ниньо ( $SL_{EN}$ ). Их разность  $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$  представляет явление Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) в целом. Показана высокая корреляция этих индексов с индексами ЭНЮК.

*Ключевые слова:* Эль-Ниньо, Южное колебание, уровень океана, тренды, индексы уровня.

*Для цитирования:* Малинин В. Н., Смирнов М. А. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 463—477. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477.

## ***OCEANOLOGY***

Original article

### **Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean**

*Valerii N. Malinin, Maksim A. Smirnov*

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, malinin@rshu.ru

*Summary.* The article discusses the features of interannual sea level fluctuations in the near-equatorial zone of the Pacific Ocean based on satellite altimetry for the 1993—2019 period using the AVISO database (France). The calculation of the linear trends of the sea level at the grid nodes of the AVISO archive has

been performed, showing that the source with the highest trend estimates is located near the southern coast of Indonesia, where its estimates reach 5.2 mm/year. During El Niño the level is shown to rise in the central and eastern parts of the equatorial zone of the ocean, while in the western part it decreases. During La Niña, the picture is reversed. In this case, the spatial gradient in the sea level is 350 mm. Noticeable positive and negative centers of level anomalies have been revealed in most of the Pacific Ocean.

Two meridional sections for the centers of the sources were selected by seven points of level anomalies. The western one characterizes the southern oscillation in the form of the La Niña phenomenon ( $SL_{SO}$ ), the eastern one characterizing El Niño ( $SL_{EN}$ ). Their difference  $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$  represents the ENSO phenomenon as a whole. A high correlation of these indices with the ENSO indices was shown. Then, a  $14 \times 27$  matrix with anomalies of the annual level was formed, followed by its decomposition using the method of principal components (PC). The first principal component describes over 80 % of the initial field dispersion and is almost functionally ( $r = 0.99$ ) related to  $SL_{ENSO}$ . The advantage of the first PC of the interannual level variability in the ENSO domain over  $SL_{ENSO}$  is that it is less affected by the random errors in sea level estimates that prevail in the younger PCs. Therefore, the first PC can be considered as an index that adequately characterizes the interannual sea level variability in the ENSO region.

*Keywords:* El Niño, Southern Oscillation, sea level, trends, level indices.

*For citation:* Malinin V. N., Smirnov M. A. Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of 4 Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):463—477. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477.

## Введение

Приэкваториальная область Тихого океана, в которой наблюдаются события Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК), является уникальным гидрометеорологическим объектом. Она представляет собой самую крупную и наиболее мощную энергоактивную зону Мирового океана, которая имеет исключительно важное влияние на формирование долгопериодных колебаний погоды и короткопериодные колебания климата [1]. При этом посредством атмосферных дальних связей ЭНЮК может в значительной степени влиять на климатическую изменчивость далеко за пределами Тихого океана. Подробный анализ дальних связей ЭНЮК с климатическими процессами за его пределами обсуждается в работе [2].

Несмотря на длительную историю исследований ЭНЮК, механизм формирования и особенно прогноз Эль-Ниньо и обратного ему явления Ла-Нинья остается одной из важнейших современных научных задач, которая не решена до сих пор [3—8 и др.]. Однако, не вызывает сомнений, что основной причиной формирования ЭНЮК являются пассаты в экваториальной циркуляционной ячейке Уокера [9]. Интенсивность пассатов характеризует Южное колебание, для оценки которого используется индекс *SOI* (South Oscillation Index). Данный индекс рассчитывается как разность атмосферного давления между о. Таити и г. Дарвин (север Австралии). При больших положительных значениях *SOI* (явление Ла-Нинья) пассаты усиливаются, что приводит к значительному нагону более теплых поверхностных вод к побережью Индонезии и понижению здесь атмосферного давления. В это время у восточного побережья океана происходит сгон вод, усиление Перуанского апвеллинга, охлаждение поверхностных вод и повышение атмосферного давления в районе экватора (рис. 1 б). При отрицательных значениях *SOI* (явление Эль-Ниньо) наблюдается обратная ситуация. Пассаты резко ослабевают, давление над Индонезией повышается, огромные массы теплой воды в виде волны Кельвина устремляются на восток. В результате ТПО в центральной и

восточной части экваториальной зоны повышается на несколько градусов. У восточного побережья океана большая часть этих вод поворачивает на юг и покрывает область апвеллинга (рис. 1 а). Поэтому поверхностная температура здесь повышается на 3—5 °С, что приводит к понижению биологической продуктивности, гибели планктона, рыб, особенно наиболее массового вида – анчоуса, птиц и т.п.

Понятно, что при нагоне вод к Индонезии (явление Ла-Нинья) и уменьшении атмосферного давления уровень моря должен здесь повышаться (принцип обратного барометра). У побережья Америки и в восточной части экваториальной зоны океана при сгоне вод и повышении атмосферного давления уровень, наоборот, должен уменьшаться. При явлении Эль-Ниньо уровень моря ведет себя

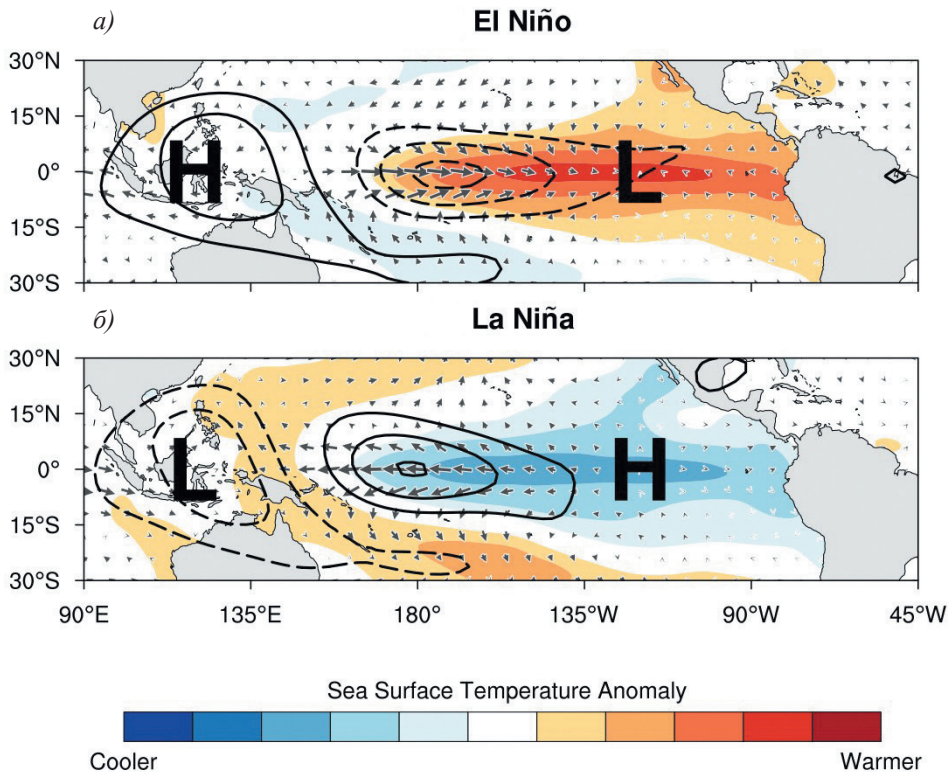


Рис. 1. Схематическая диаграмма, показывающая физические механизмы формирования явлений Эль-Ниньо (а) и Ла-Нинья (б).

Стрелки показывают направление ветра в приводном слое,  
*H* и *L* – центры высокого и низкого атмосферного давления [15], <https://psl.noaa.gov/enso/mei>.

Fig. 1. Schematic diagram showing the physical mechanisms of the formation of the El Niño (a) and La Niña (b) phenomena.

The arrows show the wind direction in the near-water layer,  
*H* and *L* are the centers of high and low atmospheric pressure [15], <https://psl.noaa.gov/enso/mei>.

противоположным образом. К сожалению, количественные оценки взаимосвязи морского уровня с явлениями Эль-Ниньо / Ла-Нинья малоизучены. Можно упомянуть лишь работу [10], в которой на основании расчетов по альтиметрическим данным за 1993—2010 гг. указывается, что в периоды интенсивного Эль-Ниньо абсолютная величина уровня моря на востоке достигает плюс 35 см, а на западе минус 25 см. В зарубежных исследованиях в основном рассматриваются десятилетние изменения уровня, его тренды и факторы их обуславливающие [11—14 и др.].

Целью данной работы являлось выявление закономерностей межгодовой изменчивости уровня океана в тропической зоне Тихого океана ( $20^\circ$  с.ш. —  $20^\circ$  ю.ш.) по архиву спутниковой альтиметрии AVISO за период 1993—2019 гг. и оценке их взаимосвязи с явлениями Эль-Ниньо / Ла-Нинья.

### Материалы и методы

Основой для выполнения расчетов послужила информация из трех баз данных, две из которых содержат натурные альтиметрические наблюдения за уровнем моря, а третья представляет каталог индексов, характеризующих ЭНЮК. База спутниковой лаборатории NOAA/NESDIS/STAR (Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Level Rise) [16] включает среднемесячные альтиметрические оценки уровня 6 морей Тихого океана (Берингово, Охотское, Японское, Желтое, Южно-Китайское и Индонезийское), а также для района  $N_{3+4}$  за период с 1992 г. по настоящее время.

База AVISO [17] позволяет использовать оценки аномалий уровня поверхности океана относительно их среднемноголетних значений в каждом узле с пространственным разрешением  $0,25^\circ$  по широте и долготе. Исходные альтиметрические данные покрывают океан от  $66^\circ$  с.ш. до  $65^\circ$  ю.ш., имеют дискретность примерно 9,9 сут и точность расчета — 4,2 см. Неопределенности оценок морского уровня обусловлены методическими аспектами преобразования необработанных спутниковых измерений в реальные оценки морского уровня, необходимостью учета атмосферных условий, ветровых волн и приливов, а также гляциоизостатического приспособления, в результате чего происходит некоторое увеличение площади океанских бассейнов из-за отступления суши в конце последнего ледникового периода. Приблизительно скорость их увеличения оценивается в  $-0,3$  мм/год с ошибкой не менее 50 % [18]. В работе использовались данные по уровню акватории Тихого океана от  $100^\circ$  в.д. до  $70^\circ$  з.д. и от  $80^\circ$  ю.ш. до  $80^\circ$  с.ш. с 1993 г. по 2019 г.

Сопоставление годовых значений уровня двух указанных выше архивов для района  $N_{3+4}$  за период 1993—2019 гг. показало определенное отличие в оценках тренда. Согласно AVISO тренд составляет 2,11 мм/год, а по данным NOAA/NESDIS/STAR — 3,07 мм/год. Межгодовая изменчивость уровня по коэффициенту вариации почти одинакова, а корреляция между временными рядами составляет  $r = 0,74$ .

Дополнительно к работе привлекался архив NOAA, Physical Sciences Laboratory [19], который содержит каталог из 16 индексов, описывающих с различными

сторон явление ЭНЮК (*MEI.v.2*;  $N_4$ ;  $N_{3+4}$ ;  $N_3$ ;  $N_{1+2}$ ; ONI; BEST; *SOI*; TNI; PDO; PNA; OLR; Heat Content; 850 mb Zonal Winds; 200 mb Zonal Winds; ESPI Precip Index).

Из указанных индексов наиболее универсальным очевидно считается MEI (multivariate ENSO index) [20]. Это комплексный индекс, представляющий собой первую главную компоненту из шести метеорологических и океанологических параметров: давление на уровне моря, зональные и меридиональные компоненты поверхностного ветра, температура поверхности моря, температура поверхностного воздуха и облачность, среднемесячные значения которых выбираются из архива ICOADS с 1950 г. В последующем была разработана его 2 версия (*MEI.v.2*), в которой вместо температуры воздуха и облачности использовано исходящее длинноволновое излучение [15] <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>. Значения *MEI.v.2* рассчитываются по архиву реанализа JRA-55 с 1980 г. Отметим, что хотя указанные выше индексы основаны на большом числе различных параметров взаимодействия в системе океан—атмосфера, однако ни один из них не учитывает аномалии уровня океана. Как показано выше, уровень океана имеет значение при формировании явлений Эль-Ниньо / Ла-Нинья.

Основой для расчетов служит аддитивная модель межгодовых изменений временного ряда в следующем виде:

$$X(t) = Tr(t) + C(t) + P(t), \quad (1)$$

где  $Tr(t)$  — трендовая составляющая;  $C(t)$  — циклическая компонента, характеризующая регулярные (циклические) межгодовые колебания;  $P(t)$  — остаточная часть, характеризующая нерегулярные (случайные) межгодовые колебания. Сумма трендовой и циклической компонент означает детерминированную часть разложения (1), которая поддается интерпретации и строго описывается статистическими методами. Методы расчета и оценивания указанных компонент приводятся в работе [21].

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приводится пространственное распределение среднегодовых аномалий уровня поверхности (УП) и их тренда в широтной зоне  $20^\circ$  с.ш. —  $20^\circ$  ю.ш. Тихого океана за период 1993—2019 гг. Как видно из рис. 2 а, различия в оценках УП прослеживаются в основном в широтном направлении, но они невелики. Максимальное расхождение составляет 24 мм, при этом максимальное значение УП отмечается в районе  $N_{3+4}$  (47 мм), а минимальное около побережья Индонезии (23 мм).

Из распределения трендов (рис. 2 б) видно, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают  $+5,2$  мм/год. В центральной и восточной части рассматриваемой акватории оценки тренда практически одинаковы и равны примерно  $+2,2$  мм/год. Отметим, что карта на рис. 2 б принципиально близка к аналогичным картам распределения тренда уровня, полученными другими авторами [22—25 и др.], однако абсолютные оценки тренда на рис. 2 б несколько занижены. Отметим, что при сохранении

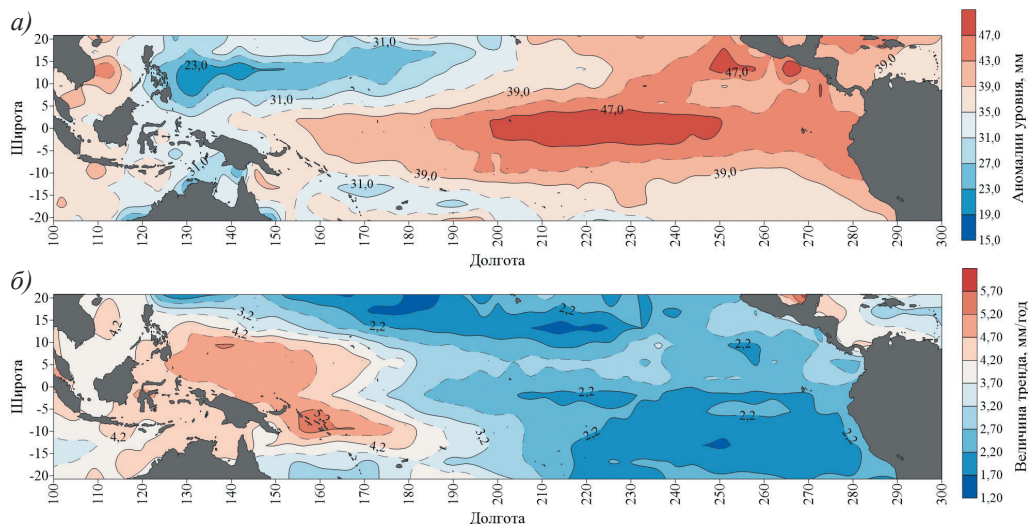


Рис. 2. Пространственное распределение среднегодовых аномалий уровня поверхности (а) и их тренда (б) в широтной зоне 20° с.ш. — 20° ю.ш. Тихого океана за период 1993—2019 гг. по данным архива AVISO.

Fig. 2. Spatial distribution of the average annual anomalies of the sea level surface (a) and their trend (b) in the latitudinal zone 20° N — 20° S of the Pacific Ocean for 1993—2019 according to the AVISO archive.

современных темпов роста уровня уже через 10 лет аномалии УП на всей акватории широтной зоны 20° с.ш. — 20° ю.ш. станут примерно одинаковыми.

Можно отметить наличие высокой корреляции годовых значений уровня океана в районе  $N_{3+4}$  после удаления линейного тренда с ТПО в данном районе ( $r = 0,80$ ), а также с другими индексами ЭНЮК ( $MEI.v.2$ ;  $Nino_4$ ;  $Nino_3$ ;  $Nino_{1+2}$ ;  $ONI$ ;  $SOI$ ). При этом экстремальные положительные оценки уровня совпадают с максимумами Эль-Ниньо, а отрицательные — с Ла-Нинья. Из временного ряда  $MEI.v.2$  было выделено 3 года с наибольшими оценками Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2007, 2010). Для этих 6 лет строились карты аномалий УП Тихого океана. Далее выполнялось осреднение аномалий УП за 3 года для Эль-Ниньо и Ла-Нинья. После этого из оценок УП для Эль-Ниньо вычитались аналогичные оценки для Ла-Нинья.

На рис. 3 представлена карта пространственного распределения разности аномалий годовых значений уровня Тихого океана для 3 лет наибольших значений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. По сути, данная карта характеризует диапазон межгодовых изменений уровня между указанными явлениями. Во время Эль-Ниньо УП в центральной и восточной части экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья картина обратная. Как видно из рис. 3, пространственный градиент в аномалиях уровня океана является огромным и составляет 330 мм ( $> 150$  мм в центре зоны и  $< -180$  мм на ее западе).

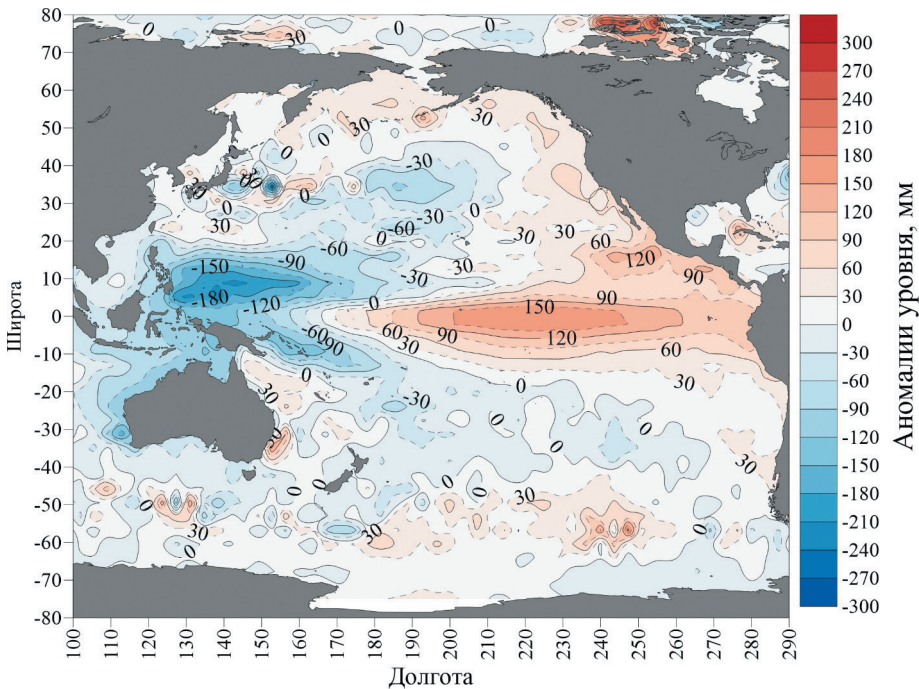


Рис. 3. Пространственное распределение разности аномалий годовых значений уровня при Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2007, 2010) для Тихого океана.

Fig. 3. Spatial distribution of the difference of anomalies of annual level values at El Niño (1997, 2009, 2015) and La Niña (2000, 2007, 2010) for the Pacific Ocean.

Можно отметить также вытянутый в меридиональном направлении очаг положительных аномалий уровня вдоль побережья Америки от Аляски до Мексики, где отмечается их максимум ( $\approx 120$  мм). Кроме того, локальные очаги аномалий УП (30—60 мм) свойственны и другим районам океана, особенно в северном полушарии. В южном полушарии подобные очаги выражены слабее. В Перуанском апвеллинге аномалии уровня составляют примерно 30 мм. Таким образом, влияние ЭНЮК распространяется на УП большей части Тихого океана.

Исходя из полученных результатов, в центрах очагов аномалий УП было выбрано 2 разреза. Западный разрез имеет координаты  $137^\circ$  в.д. и  $5\text{--}10^\circ$  с.ш., а центрально-восточный —  $221^\circ$  з.д. и  $2,5^\circ$  с.ш. —  $2,5^\circ$  ю.ш. На западном разрезе повышение уровня океана происходит при событиях Ла-Нинья ( $SL_{LA}$ ), а в восточном — при Эль-Ниньо ( $SL_{EN}$ ). При этом экстремальные оценки уровня отмечаются в основном через месяц экстремумов Ла-Нинья и Эль-Ниньо. Для указанных разрезов были сформированы временные ряды аномалий среднемесячных значений уровня за период 1993—2019 гг., а также ряд их разности  $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{LA}$ , который представляет явление ЭНЮК (ENSO) в целом.

В табл. 1 приводятся оценки коэффициентов корреляции среднемесячных и годовых значений этих рядов с индексами ЭНЮК, которые являются значимыми при  $\alpha = 0,05$ . Как и следовало ожидать, наиболее высокая корреляция с индексами ЭНЮК имеет  $SL_{ENSO}$ . Максимальная корреляция отмечается с основным индексом ЭНЮК  $N_{3+4}$  ( $r = 0,91$ ). Во всех случаях, корреляция для годовых значений выше, чем для среднемесячных значений. Уровненный индекс  $SL_{LA}$  имеет самую высокую корреляцию с  $SOI$  ( $r = 0,85$ ), а  $SL_{EN}$  — с  $N_{3+4}$  ( $r = 0,89$ ). Для среднемесячных значений уровненных индексов были рассчитаны оценки взаимнокорреляционной функции с индексами  $SOI$  и  $N_{3,4}$ . Выявлено, что максимальная корреляция отмечается при запаздывании на 1 месяц  $SL_{EN}$  и  $SL_{ENSO}$  от  $N_{3,4}$ , а  $SL_{SO}$  от  $SOI$ . Отсюда следует, что индексы  $SL_{ENSO}$ ,  $SL_{EN}$  и  $SL_{SO}$  можно рассматривать как реакцию уровневой поверхности океана на явление ЭНЮК.

Таблица 1

Оценки коэффициентов корреляции среднемесячных и среднегодовых значений временных рядов  $SL_{ENSO}$ ,  $SL_{EN}$  и  $SL_{SO}$  с индексами ЭНЮК за 1993—2019 гг.

Estimates of correlation coefficients of the average monthly and annual values of the  $SL_{ENSO}$ ,  $SL_{EN}$  and  $SL_{SO}$  time series with ENSO indices for 1993—2019

Индекс	Среднегодовые значения			Среднемесячные значения		
	$SL_{ENSO}$	$SL_{EN}$	$SL_{SO}$	$SL_{ENSO}$	$SL_{EN}$	$SL_{SO}$
$SL_{ENSO}$	1,00	0,88	-0,94	1,00	0,86	-0,92
$SL_{EN}$	0,88	1,00	-0,66	0,86	1,00	-0,59
$SL_{SO}$	-0,94	-0,66	1,00	-0,92	-0,59	1,00
$MEI.v2$	0,87	0,73	-0,83	0,79	0,70	-0,72
$SOI$	-0,84	-0,67	0,85	-0,66	-0,58	0,60
$N_{3+4}$	0,91	0,89	-0,78	0,84	0,83	-0,70
$N_3$	0,80	0,83	-0,66	0,76	0,76	-0,61
$N_4$	0,87	0,84	-0,76	0,80	0,76	-0,67
$N_{1+2}$	0,49	0,53	-0,38	0,47	0,48	-0,37
<i>Oceanic Nino Index</i>	0,92	0,87	-0,81	0,85	0,80	-0,74

Обратимся к табл. 2, в которой представлены первичные статистические характеристики среднегодовых и среднемесячных индексов уровня за период 1993—2019 гг. Градиент средних аномалий уровня между восточным ( $SL_{EN}$ ) и западным ( $SL_{SO}$ ) разрезами составляет 13,5 мм. Наибольшая межгодовая изменчивость свойственна среднегодовым и среднемесячным значениям индекса  $SL_{ENSO}$ , а наименьшая — индекса  $SL_{EN}$ . Амплитуда колебаний индексов также максимальна для  $SL_{ENSO}$ . При этом для годовых значений наибольшее значение  $SL_{ENSO}$  (385 мм) отмечалась в 2015 г., а наименьшее (-206,1 мм) — в 1999 г. (рис. 4). Что касается оценки трендов, то даже максимальный тренд в  $SL_{SO}$  по критерию Стьюдента [21] находится на грани значимости при уровне  $\alpha = 0,05$  ( $R^2 = 0,14$ ). Кстати, все приведенные в табл. 1 индексы ЭНЮК также характеризуются отсутствием значимых трендов. Амплитуда колебаний среднемесячных значений для  $SL_{ENSO}$  составляет 927,3 мм, т. е. лишь немного меньше 1 м. При этом наибольший уровень (590 мм)



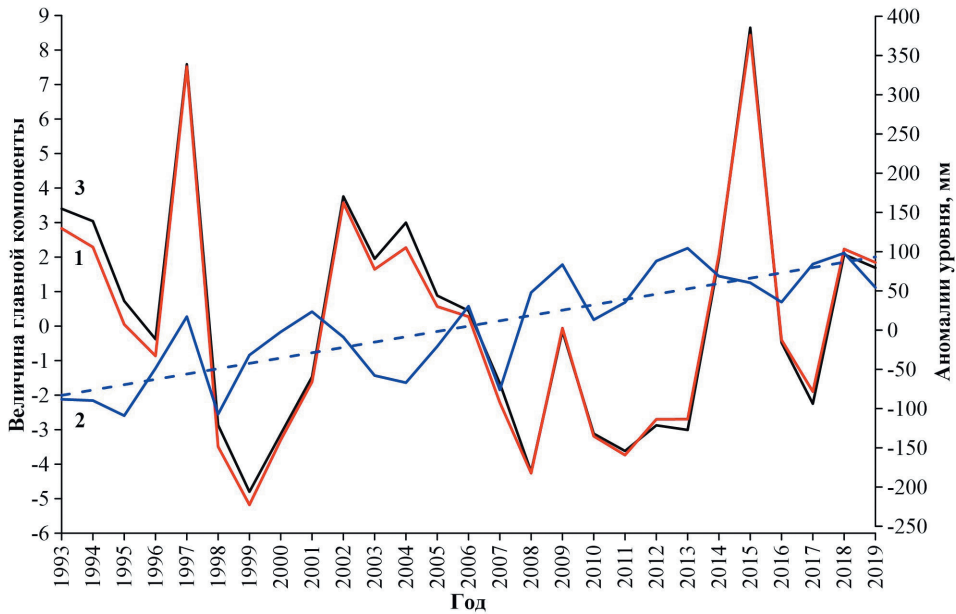


Рис. 4. Межгодовой ход годовых значений  $SL_{ENSO}$  и первых двух главных компонент уровня океана в области ЭНЮК:

1 – 1 ГК уровня океана; 2 – 2 ГК уровня океана; 3 – индекс  $SL_{ENSO}$ .

Fig. 4. The interannual variation of the annual values of  $SL_{ENSO}$  and the first two main components of the sea level in the ENSO region:

1 — the 1st PC of sea level; 2 — the 2nd PC of sea level; 3 —  $SL_{ENSO}$  index.

наблюдался в ноябре 1997 г., а наименьший (–337,1) — в июне 1998 г., т. е. всего лишь через 9 месяцев!

Таблица 2

Статистические характеристики временных рядов  $SL_{ENSO}$ ,  $SL_{EN}$  и  $SL_{SO}$  за 1993—2019 гг.

Statistical characteristics of the  $SL_{ENSO}$ ,  $SL_{EN}$  and  $SL_{SO}$  time series for 1993—2019.

Характеристика	Среднегодовые значения			Среднемесячные значения		
	$SL_{ENSO}$	$SL_{EN}$	$SL_{SO}$	$SL_{ENSO}$	$SL_{EN}$	$SL_{SO}$
Среднее, мм	13,5	44,2	30,6	13,5	44,2	30,6
Стандартное отклонение, мм	149,7	68,8	95,2	189,1	89,8	121,5
Амплитуда, мм	591,5	291,7	322,5	927,3	561,3	514,1
Оценка тренда, мм/год	–1,79	2,58	4,38	–1,78	2,59	4,40
Вклад тренда в дисперсию ряда	0,009	0,089	0,143	0,009	0,089	0,143

На восточном и западном разрезах в области ЭНЮК выделено по 7 точек с годовыми значениями уровня океана и за период 1993—2019 гг. составлена матрица размером 14×27. Для данной матрицы выполнено разложение методом главных

компонент. Первое собственное число описывает 80,6 % дисперсии исходного поля, второе — 16,5 %, остальные — пренебрежимо малы. Первая главная компонента (ГК) почти функционально ( $r = 0,99$ ) связана с  $SL_{ENSO}$  (рис. 4). Отметим также, что 1 ГК имеет более высокую корреляцию с  $SL_{EN}$  и  $SL_{SO}$  (соответственно 0,92 и  $-0,90$ ) чем  $SL_{ENSO}$ . Вторая ГК имеет значимый положительный тренд и описывает короткопериодные случайные колебания (рис. 4). Преимущество 1 ГК межгодовой изменчивости уровня в области ЭНЮК ( $SL_{ENSO}^{1ГК}$ ) перед  $SL_{ENSO}$  состоит в том, что она менее подвержена влиянию случайных ошибок на оценки уровня океана, которые аккумулируются в младших ГК. Очевидно, значения  $SL_{ENSO}^{1ГК}$  можно рассматривать как индекс, адекватно характеризующий межгодовую изменчивость уровня в области ЭНЮК.

Кроме того,  $SL_{ENSO}^{1ГК}$  в общем характеризует межгодовую изменчивость поля уровня большей части Тихого океана (рис. 5 а). Действительно, нетрудно видеть, что пояс значимой положительной корреляции простирается вдоль Северной Америки от Алеутских островов до Южной Америки. При этом очаг максимальной корреляции ( $r > 0,90$ ) находится в районе  $N_{3+4}$ . Значимая отрицательная корреляция  $SL_{ENSO}^{1ГК}$  с уровнем отмечается в приэкваториальных широтах западной части Тихого океана. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между 2 ГК ЭНЮК ( $SL_{ENSO}^{2ГК}$ ) и годовыми значениями уровня океана представлено на рис. 5 б, из которого видно о существовании значимой положительной корреляции ( $r \geq 0,40$ ) на значительной части акватории Тихого океана. Межгодовой ход 2 ГК в основном отражает наличие значимых положительных трендов в уровне океана. Локальные очаги с максимальной корреляцией ( $r > 0,80$ ) отмечаются в Южно-Китайском море и южнее Новой Зеландии. В межгодовом ходе уровня в этих районах отмечается наличие хорошо выраженных трендов и соответствие короткопериодных циклов с периодами 3—5 лет циклам в 2 ГК ЭНЮК.

### Заключение

В работе обсуждаются особенности межгодовых колебаний уровня океана в экваториальной зоне Тихого океана по спутниковой альтиметрии за период 1993—2019 гг. С этой целью использовались базы данных спутниковой лаборатории США NOAA/NESDIS/STAR и Франции AVISO. Сопоставление годовых значений уровня двух указанных баз данных для района ЭНЮК  $N_{3+4}$  за период 1993—2019 гг. показало, что AVISO несколько занижает оценку тренда по сравнению с NOAA/NESDIS/STAR (2,11 и 3,07 мм/год соответственно). Межгодовая изменчивость уровня по коэффициенту вариации временных рядов уровня почти одинакова, а корреляция между ними составляет  $r = 0,74$ .

Выполнен расчет линейных трендов уровня океана в узлах сетки для зоны  $20^\circ$  с.ш. —  $20^\circ$  ю.ш. с разрешением  $0,25^\circ$  по широте и долготе. Показано, что очаг с наибольшими оценками тренда находится вблизи южного побережья Индонезии, где его оценки достигают 5,2 мм/год. В центральной и восточной части рассматриваемой акватории оценки тренда практически одинаковы и равны примерно 2,2 мм/год.

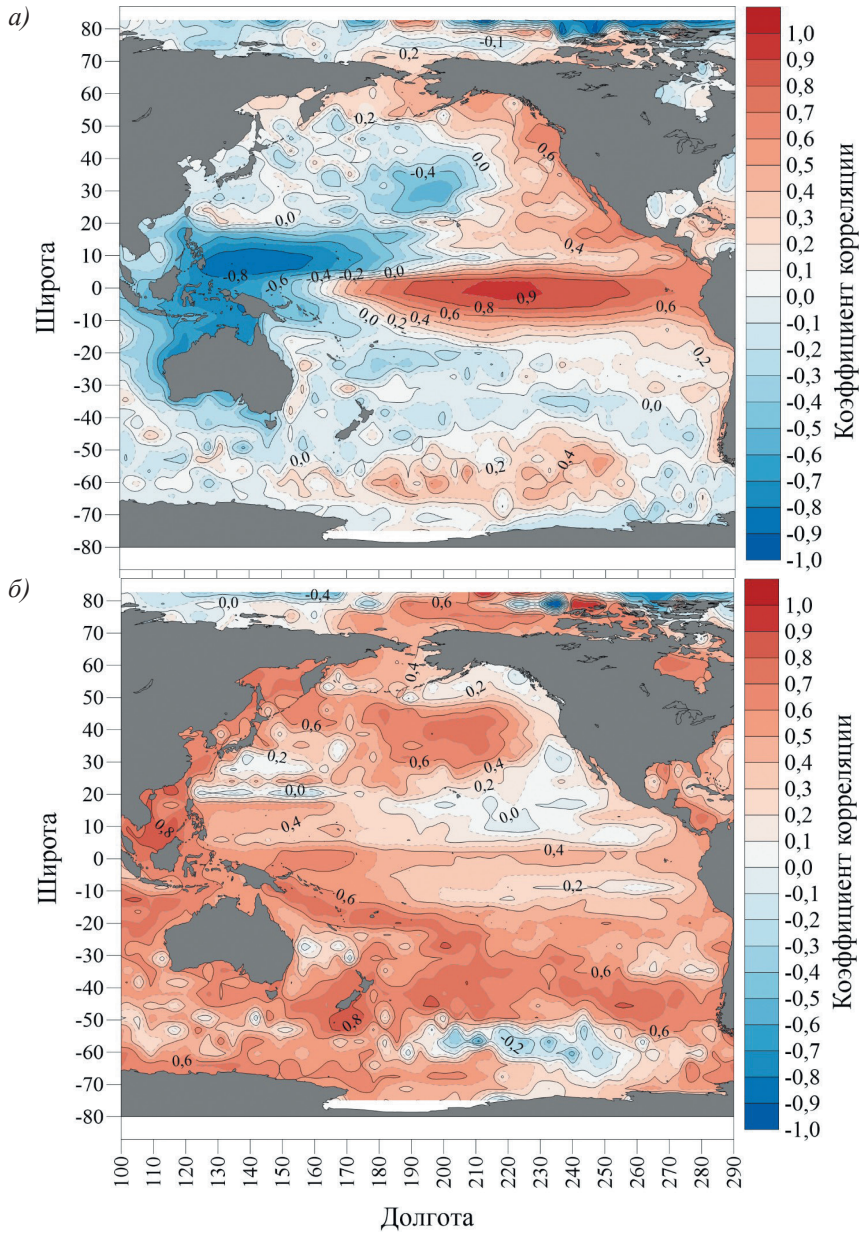


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов корреляции по акватории Тихого океана годовых значений уровня океана с 1 ГК (а) и 2 ГК (б).

Fig. 5. Spatial distribution of correlation coefficients of annual sea level values with the 1st PC (а) and the 2nd PC (б) over the Pacific Ocean area.

Для 3 лет с наибольшими оценками Эль-Ниньо (1997, 2009, 2015) и Ла-Нинья (2000, 2007, 2010) строились карты аномалий уровенной поверхности Тихого океана. Далее выполнялось осреднение аномалий УП за 3 года для Эль-Ниньо и Ла-Нинья. После этого из оценок УП для Эль-Ниньо вычитались аналогичные оценки для Ла-Нинья, что позволило построить карту пространственного распределения разности аномалий годовых значений уровня Тихого океана. Показано, что во время Эль-Ниньо уровень в центральной и восточной части экваториальной зоны океана повышается, а в западной части понижается. Во время Ла-Нинья картина обратная. При этом пространственный перекосяк в уровне океана является огромным и составляет 350 мм ( $> 150$  мм в центре зоны ЭНЮК и  $< -180$  мм на ее западе). Выявлены заметные положительные и отрицательные очаги аномалий уровня на большей части акватории Тихого океана.

В центрах указанных очагов было выбрано 2 меридиональных разреза по 7 точкам аномалий уровня. Западный разрез имеет координаты  $137^\circ$  в.д. и  $5\text{--}10^\circ$  с.ш., а восточный —  $221^\circ$  з.д. и  $2,5^\circ$  с.ш. —  $2,5^\circ$  ю.ш. Первый разрез характеризует преимущественно южное колебание в виде явления Ла-Нинья ( $SL_{SO}$ ), а восточный — Эль-Ниньо ( $SL_{EN}$ ). Для этих разрезов были сформированы осредненные по 7 точкам временные ряды аномалий среднемесячных значений уровня за период 1993—2019 гг., а также ряд их разности  $SL_{ENSO} = SL_{EN} - SL_{SO}$ , который представляет явление ЭНЮК (ENSO) в целом. Для указанных индексов уровня выполнена корреляция их среднемесячных и годовых значений с индексами ЭНЮК. Показано наличие высокой корреляции между ними, причем для годовых значений она выше, чем для среднемесячных значений. Анализ взаимокорреляционных функций среднемесячных значений уровенных индексов с индексами ЭНЮК показал, что максимальная корреляция отмечается при их запаздывании на 1 месяц. Это означает, что индексы  $SL_{ENSO}$ ,  $SL_{EN}$  и  $SL_{SO}$  можно рассматривать как реакцию уровенной поверхности океана на явление ЭНЮК.

Дополнительно для указанных разрезов была сформирована матрица годовых значений уровня размером  $14 \times 27$ , которая подвергнута разложению методом главных компонент. Первое собственное число описывает 80,6 % дисперсии исходного поля, второе — 16,5 %, остальные — пренебрежимо малы. Первая главная компонента (ГК) почти функционально ( $r = 0,99$ ) связана с  $SL_{ENSO}$ . Преимущество 1 ГК межгодовой изменчивости уровня в области ЭНЮК ( $SL_{ENSO}^{1ГК}$ ) перед  $SL_{ENSO}$  состоит в том, что она менее подвержена влиянию случайных ошибок на оценки уровня океана, которые доминируют в младших ГК. Очевидно, значения  $SL_{ENSO}^{1ГК}$  можно рассматривать как индекс, адекватно характеризующий межгодовую изменчивость уровня океана в области ЭНЮК.

### Список источников

1. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов источников и стока  $\text{CO}_2$  в океане на основе данных наблюдений // Гидрометеорология и экология. 2022. № 66. С. 51—70. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
2. Серых И. В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329—370.

3. Осипов А. М., Гущина Д. Ю. Эль-Ниньо 2015—2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 3. С. 54—81. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81.
4. Бондаренко А. Л., Серых И. В. О формировании явления Эль-Ниньо — Ла-Нинья Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 57—63.
5. Philander S. G. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA, 1990. 293 p.
6. Yeh S. W., Cai W., Min S. K., McPhaden M. J., Dommenget D., Dewitte B., Collins M., Ashok K., An S. I., Yim B. Y., Kug J. S. ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56, No. 1. P. 185—206.
7. Diaz H. F., Hoerling M. P., Eischeid J. K. ENSO variability, teleconnections and climate change. *Int. J. Climatol*. 2001. Vol. 21. P. 1845—1862.
8. Малинин В. Н., Вайновский П. А. Влагообмен между океаном и атмосферой во внутритропической зоне конвергенции // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 63. С. 255—278. doi: 10.33933/2074-2762-2021-63-255-278.
9. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific // *Mon. Wea. Rev.* 1969. Vol. 97. P. 163—172.
10. Скларов В. Е. Бышев В. И. Наблюдение из космоса за явлением Эль-Ниньо в Мировом океане // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 105—110.
11. Nidheesh A. G., Lengaigne M., Vialard J., Unnikrishnan A. S., Dayan H. Decadal and long-term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean // *Clim Dyn*. 2012. doi: 10.1007/s00382-012-1463-4.
12. Han W., Meehl G. A., Hu A., Alexander M. A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B. D. et al. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades // *Clim. Dyn*. 2014. Vol. 43. P. 1357—1379. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.
13. Wu Q. X., Zhang J., Church A., Hu J. Variability and change of sea level and its components in the Indo-Pacific region during the altimetry era // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 1862—1881. doi: 10.1002/2016JC012345.
14. Moon J.-H., Song Y. T., Bromirski P. D., Miller A. J. Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958—2008 // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013. Vol. 118. P. 7024—7035, doi: 10.1002/2013JC009297.
15. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). URL: <https://psl.noaa.gov/enso/mei>.
16. NOAA/NESDIS/STAR. Laboratory for Satellite Altimetry. URL: [https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php).
17. AVISO. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>.
18. Curry J. *Sea Level and Climate Change: Special Report*. Climate Forecast Applications Network, 2018. 79 p. URL: <https://curryja.files.wordpress.com/2018/11/special-report-sea-level-rise3.pdf>.
19. NOAA, Physical Sciences Laboratory: URL: <https://psl.noaa.gov/enso/dashboard.lanina.html>.
20. Wolter K., and M. S. Timlin. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Intl. J. Climatology*, 2011. 31, 1074-1087. doi: 10.1002/joc.2336.
21. Малинин В.Н. *Статистические методы анализа гидрометеорологической информации*. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
22. Cazenave A. *Climate Change and Sea Level Rise // Spatium*. 2020. No. 46. 16 p.
23. Zhang X., Church J.A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2012, 39, L21701.
24. Merrifield M.A., Maltrud M.E. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophys. Res. Lett.* 2011, 38, L21605.
25. Han W., Meehl G.A., Hu A., Alexander M.A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B.D., Quan X.-W., Leben R.R. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades // *Clim Dyn*. 2013. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.

## References

1. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO<sub>2</sub> in the ocean based on observational data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(66):(51—70). doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70.
2. Serykh I.V. On the influence of El Niño — Global Atmospheric Oscillation on the interannual variability of hydrometeorological parameters. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2021;(63):(329—370). doi: 10.33933/2074-2762-2021-63-329-370. (In Russ.).
3. Osipov A. M., Gushchina D. Yu. El Niño 2015-2016: evolution, mechanisms, accompanying remote anomalies. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya — Fundamental and applied climatology*. 2018;(3):54—81. doi: 10.21513/2410-8758-2018-3-54-81. (In Russ.).
4. Bondarenko A. L., Serykh I. V. On the formation of the phenomenon of El Niño — La Niña of the Pacific Ocean. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(2):57—63. (In Russ.).
5. Philander S. G. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, CA, 1990: 293 p.
6. Yeh S. W., Cai W., Min S. K., McPhaden M. J., Dommenget D., Dewitte B., Collins M., Ashok K., An S. I., Yim B. Y., Kug J. S. ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*. 2018;56(1):185—206.
7. Diaz H. F., Hoerling M. P., Eischeid J. K. ENSO variability, teleconnections and climate change. *Int. J. Climatol*. 2001;21:1845—1862.
8. Malinin V. N., Vainovsky P. A. Moisture exchange between the ocean and the atmosphere in the intertropical convergence zone. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021;63:255—278. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-255-278. (In Russ.).
9. Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.* 1969;97:163—172.
10. Sklyarov V. E., Byshev V. I. Observation from space of the El Niño phenomenon in the World Ocean. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(2):105—110. (In Russ.).
11. Nidheesh A. G., Lengaigne M., Vialard J., Unnikrishnan A. S., Dayan H. Decadal and long-term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean. *Clim. Dyn.* 2012. doi: 10.1007/s00382-012-1463-4.
12. Han W., Meehl G. A., Hu A., Alexander M. A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B. D. et al. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades. *Clim. Dyn.* 2014;(43):1357—1379. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.
13. Wu Q. X., Zhang J., Church A., Hu J. Variability and change of sea level and its components in the Indo-Pacific region during the altimetry era. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017;(122):1862—1881. doi: 10.1002/2016JC012345.
14. Moon J.-H., Song Y. T., Bromirski P. D., Miller A. J. Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958—2008. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013;(118):7024—7035. doi: 10.1002/2013JC009297.
15. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>
16. NOAA/NESDIS/STAR. Laboratory for Satellite Altimetry. [https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php)
17. AVISO. Available at <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>.
18. Curry J. Sea Level and Climate Change: Special Report. Climate Forecast Applications Network, 2018: 79 p. Available at: <https://curryja.files.wordpress.com/2018/11/special-report-sea-level-rise3.pdf>.
19. NOAA, Physical Sciences Laboratory. Available at: <https://psl.noaa.gov/enso/dashboard.lanina.html>.
20. Wolter K., Timlin M. S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Intl. J. Climatology*, 2011;(31):1074—1087. doi: 10.1002/joc.2336.
21. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
22. Cazenave A. Climate Change and Sea Level Rise // *Spatium*. 2020;(46):16 p.
23. Zhang X., Church J. A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2012; 39, L21701.

24. Merrifield M. A., Maltrud M. E. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophys. Res. Lett.* 2011; 38. L21605.
25. Han W., Meehl G. A., Hu A., Alexander M. A., Yamagata T., Yuan D., Ishii M., Pegion P., Zheng J., Hamlington B. D., Quan X-W., Leben R. R. Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades. *Clim Dyn.* 2013. doi: 10.1007/s00382-013-1951-1.

### ***Информация об авторах***

*Малинин Валерий Николаевич*, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО—МОК и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

*Смирнов Максим Алексеевич*, магистрант Российского государственного гидрометеорологического университета.

### ***Information about authors***

*Valery N. Malinin*, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, UNESCO—IOC Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

*Maksim A. Smirnov*, magistrant, Russian State Hydrometeorological University.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 29.06.2022.*

*Принята к публикации после доработки 28.08.2022.*

*The article was received on 29.06.2022.*

*The article was accepted after revision on 28.08.2022.*