

1 Atmospheric and ocean dynamics may explain cycles in oceanic 2 oscillations

3 Supplementary material 1. Power spectral densites for PDO, SOI, El 4 Niño and NAO

5 The ocean oscillation series are split into two subseries, one from the beginning to 1949 and one
6 from 1949 to the end (depending upon the length of the series). PSD is applied to the whole series, 1;
7 to the first half, 2; and to the last half, 3. The purpose is to examine if the first half have the same
8 dominating periodicities as the second half.

years	PDO- 1	PDO- 2	PDO- 3	SOI- 1	SOI- 2	SOI- 3	EN-1	EN-2	EN-3	NAO- 1	NAO- 2	NAO- 3
1,00	0,02	1,88	0,49	0,04	0,13	0,01	0,15	0,25	0,00	0,60	0,22	0,74
2,00	0,74	1,19	5,37	0,16	0,29	2,83	0,18	0,11	2,97	1,96	2,36	2,62
3,00	4,91	5,04	0,69	0,92	0,27	1,16	0,58	0,23	1,17	0,34	1,58	2,28
4,00	4,02	0,69	0,74	1,32	0,39	0,21	1,28	0,54	0,28	0,19	0,21	1,32
5,00	0,56	2,12	0,14	0,74	0,42	0,56	0,83	0,26	0,44	0,03	0,02	1,93
6,00	1,01	1,14	0,20	2,60	0,14	3,37	2,40	0,20	3,38	0,12	0,10	0,15
7,00	1,08	0,35	0,46	3,02	0,44	2,25	3,41	0,23	1,96	0,69	0,81	2,76
8,00	1,06	0,36	2,79	0,64	0,14	1,43	0,41	0,16	1,22	0,54	0,67	1,33
9,00	0,27	0,01	0,05	0,41	0,86	0,15	0,60	0,46	0,13	1,34	0,60	0,33
10,00	0,24	0,33	0,24	0,94	1,83	0,62	0,64	1,74	0,49	3,11	0,71	1,14
11,00	0,48	0,73	0,28	0,42	0,15	1,49	0,48	0,27	1,57	1,52	1,75	0,86
12,00	0,84	2,56	0,54	0,16	0,16	0,40	0,18	0,29	0,48	1,32	0,39	0,52
13,00	0,06	1,47	0,34	0,72	0,12	0,82	0,61	0,10	0,67	0,06	0,13	2,54
14,00	0,74	0,74	0,79	1,19	1,31	3,33	1,06	1,48	3,53	0,76	0,63	1,43
15,00	1,47	0,21	0,36	0,49	2,00	0,28	0,61	1,79	0,19	1,05	0,15	0,95
16,00	0,45	0,85	0,54	0,77	2,26	0,32	0,43	1,39	0,40	3,75	0,07	2,79
17,00	0,01	0,11	0,56	0,39	1,06	1,83	0,28	0,86	1,65	0,93	2,41	4,04
18,00	0,13	0,38	0,76	0,26	1,99	1,68	0,29	1,80	1,55	0,59	5,33	1,94
19,00	0,01	0,53	0,17	0,90	4,34	2,28	0,74	4,42	2,37	0,54	0,33	0,29
20,00	0,25	0,02	0,77	3,90	1,77	0,37	4,26	0,99	0,33	0,26	0,86	1,20
21,00	0,51	0,60	0,11	1,78	2,15	0,06	1,59	2,35	0,04	1,09	0,02	0,08
22,00	0,44	0,02	0,07	2,29	0,62	0,54	2,24	0,92	0,59	0,29	0,54	0,67
23,00	1,25	0,37	0,20	1,90	3,01	0,73	1,77	2,90	0,79	1,94	0,97	0,43
24,00	2,27	0,02	0,05	1,38	1,52	0,02	1,11	0,73	0,02	1,82	0,68	0,39
25,00	0,04	0,50	0,15	0,77	0,59	0,45	0,78	0,93	0,35	1,50	1,40	0,67
26,00	0,47	0,95	0,00	1,23	0,82	0,54	0,99	0,28	0,62	0,24	1,10	0,59
27,00	0,08	0,17	0,09	1,51	0,60	2,41	1,64	0,79	2,12	3,67	1,79	0,75
28,00	0,59	0,24	0,39	0,40	0,51	0,02	0,59	0,94	0,03	3,43	0,16	0,25
29,00	0,31	0,14	0,03	3,85	1,26	0,06	3,54	1,60	0,06	2,22	0,04	1,52
30,00	0,85	0,29	0,17	2,60	2,59	0,40	2,03	1,56	0,31	1,01	1,30	2,44
31,00	0,19	1,25	0,05	0,34	1,35	0,74	0,18	0,97	0,66	0,45	0,17	0,53
32,00	0,28	0,03	0,15	0,79	0,12	0,05	0,49	0,11	0,10	0,95	1,34	2,34
33,00	0,18	0,02	0,00	0,83	1,48	0,24	0,74	1,42	0,31	2,49	0,74	1,26
34,00	0,05	0,00	0,00	0,92	0,47	0,00	0,79	0,99	0,00	1,10	0,08	0,00
35,00	0,16	0,00	0,00	1,06	2,41	0,00	1,23	3,22	0,00	0,40	0,81	0,47

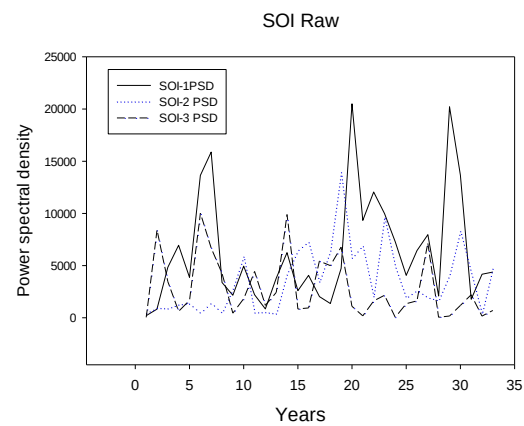
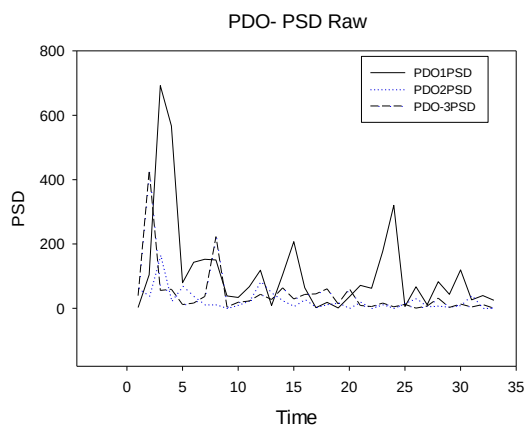
36,00	0,16	0,00	0,00	2,57	2,24	0,00	2,68	1,49	0,00	0,37	0,73	3,17
37,00	0,13	0,00	0,00	1,30	1,25	0,00	1,64	1,50	0,00	1,18	1,57	1,76
38,00	0,15	0,00	0,00	0,74	2,47	0,00	0,86	3,09	0,00	0,20	2,74	0,11
39,00	0,38	0,00	0,00	1,67	2,47	0,00	1,24	1,99	0,00	1,04	0,82	0,32
40,00	0,77	0,00	0,00	3,01	0,81	0,00	2,49	0,20	0,00	1,06	0,82	0,73

9

10 **Supplementary material 2. Power spectral density, PSD, based on raw**
11 **time series**

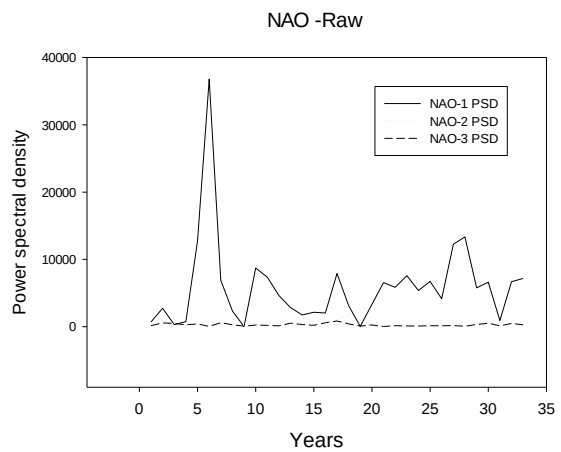
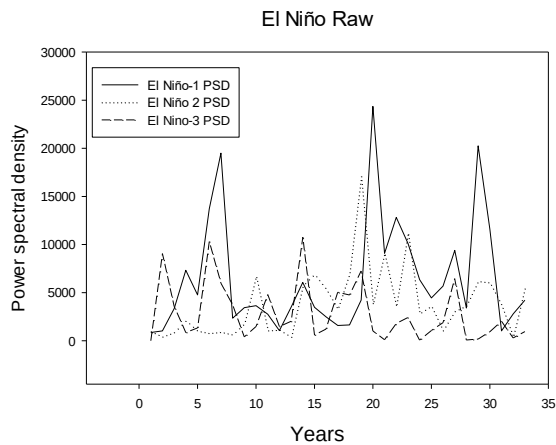
a)

b)



c)

d)



Supplementary material 3. Median cycle times

Table 1: Median cycle times and frequency split on window length and number of cycles of same sign within window

Window:3	3	2						
Median CT	3.0861	8.426						
Frequency	36.6583	63.3417						
Window:5	5	4	4					
Median CT	3.1076	5.0115	14.9467					
Frequency	12.9621	34.1112	52.9267					
Window:7	7	6	5	4				
Median CT	3.1226	4.2693	7.1108	20.1171				
Frequency	4.6331	16.2441	33.1177	46.0051				
Window:9	9	8	7	6	5			
Median CT	3.1276	3.9502	5.5121	9.1685	24.7889			
Frequency	1.6292	7.2931	18.2560	31.7607	41.0610			
Window: 11	11	10	9	8	7	6		
Median CT	3.1348	3.775	4.8344	6.7443	11.2224	29.0875		
Frequency	0.5886	3.0855	9.1400	19.211	30.2954	37.6787		
Window:13	13	12	11	10	9	8	6	
Median CT	3.1371	3.6648	4.4523	5.7081	7.9697	13.2804	32.9156	
Frequency	0.2079	1.2607	4.4338	10.6106	19.6110	28.8608	35.0152	
Window:15	15	14	13	12	11	10	9	8
Median CT	3.1468	3.5929	4.2165	5.131	6.5851	9.2043	15.3364	36.501
Frequency	0.0773	0.5183	2.0376	5.4902	11.5780	19.6043	27.7729	32.9215

For each window length the column headings indicate the number of cycles of the same sign within a window.

Interpretation example:

For window length 9, the median CT for windows with 8 cycles of the same sign (i.e. $LL = 1/9$ or $LL = 8/9$) is 3.95. 7.29% of the windows had 8 cycles of the same of the same sign.

Note that, for a given window length, the frequencies sum to 100%.

Supplementary material 4. The length of persistent leading or lagging relations for the pairs: El Niño and NAO and El Niño and PDO

Histogram of persistent leading- lagging relations for the pairs El Nino and NAO and the pairs El Niño and PDO

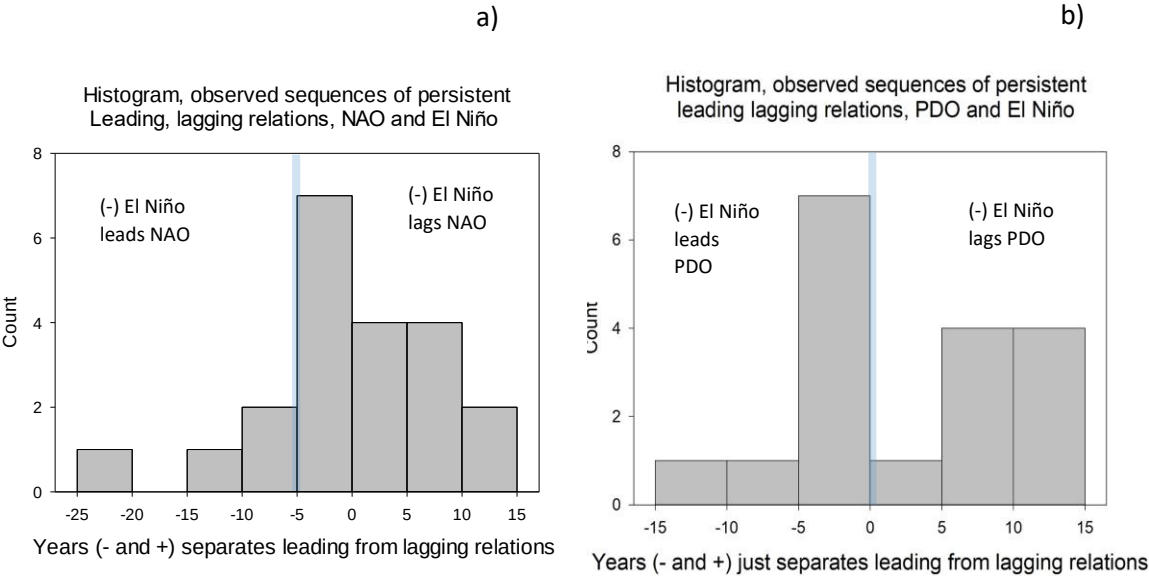


Figure S4-1 Persistent LL- relations. a) Distribution of persistent LL- relation for NAO and El Niño, average cycle lengths are 6.6 years (range 1 to 21). b) Distribution of persistent LL- relation for PDO and El Niño, average cycle lengths are 6.4 years (range 1 to 14).

Supplementary material 5 Relations between top of the atmosphere, TOA, energy flux and upper-ocean heating

Data from [1]

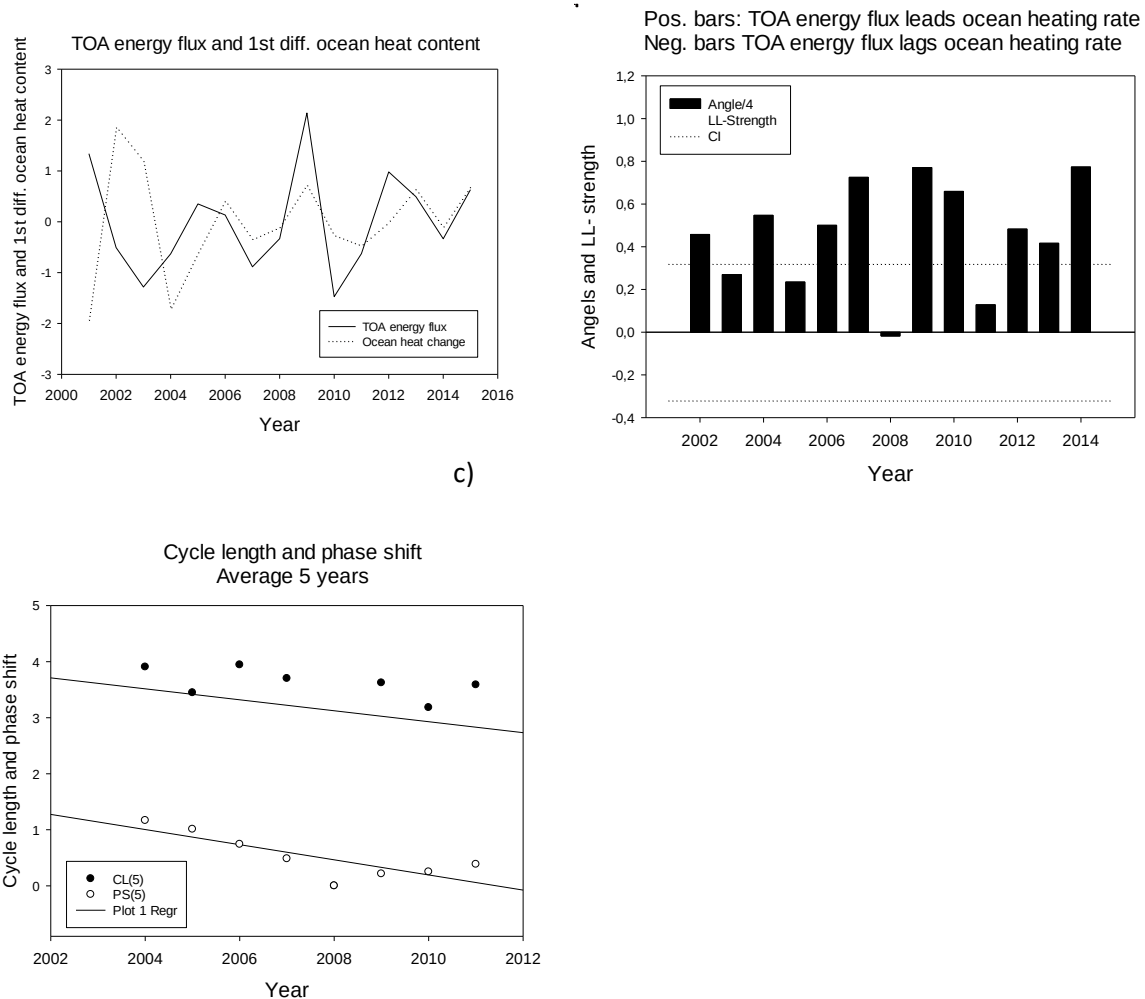


Figure 1 TOA energy flux and ocean heat rate. a) Time series for TOA energy flux and Ocean heat rate. Source [1]. b) Leading – lagging relations between TOA and heat flux. Black bars are rotational angles, red bars shows significant (0.95%) LL- relations. Dashed lines show 95% confidence limits. c) Common cycle lengths and leading length for the paired series when the regression for leading time is significant.

1. Johnson, G.C., J.M. Lyman, and N.G. Loeb, *CORRESPONDENCE: Improving estimates of Earth's energy imbalance*. Nature Climate Change, 2016. 6(7): p. 639-640.