Использование спутниковой альтиметрической информации для оценки особенностей генерации возмущений уровня синоптического масштаба под действием касательного трения ветра в системе Балтийского и Северного морей

Е.А. Захарчук, В.Н. Сухачев

Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: eazakharchuk@yandex.ru Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Санкт-Петербургское отделение, Санкт-Петербург, 199397, Россия E-mail: syhachev@mail.ru

На основе совместного статистического анализа спутниковой альтиметрической информации и данных реанализа метеорологических полей оцениваются особенности генерации низкочастотных возмущений уровня в системе Балтийского и Северного морей под действием касательного трения ветра. Полученные результаты свидетельствуют, что между этими гидрометеорологическими процессами в Балтийском море отсутствует стационарная взаимосвязь. Учёт нестационарности процессов при проведении взаимного корреляционного анализа показывает, что на большей части Балтики частота повторения периодов высокой корреляции между касательным трением ветра и низкочастотными колебаниями уровня моря синоптического диапазона изменчивости близка к нулю и лишь в локализованных районах юго-западной и юго-восточной частей моря эта частота может достигать 20-50 %. Показано, что по сравнению с Балтикой в Северном море складываются более благоприятные условия для генерации низкочастотных волнообразных колебаний уровня под действием касательного трения ветра: оценённые в стационарном приближении коэффициенты взаимной корреляции здесь заметно выше. Учёт нестационарности процессов выявляет значительную неоднородность в распределении оценок коэффициентов корреляции: на востоке-юго-востоке Северного моря, а также в локализованных районах центральной, северной и северо-западной частей повторяемость случаев высокой корреляции достигает 80-92 %, в то время как на югозападе и северо-востоке отмечаются акватории, где повторяемость случаев высокой корреляции не превышает 5-10 %.

Ключевые слова: Балтийское море, Северное море, спутниковая альтиметрия, уровень моря, касательное трение ветра, взаимный корреляционный анализ

Одобрена к печати: 22.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-163-174

Введение

Исследования низкочастотных колебаний уровня Балтийского моря по спутниковым альтиметрическим данным опубликованы в ряде работ (Захарчук и др., 2006, 2014; Тихонова, Сухачев, 2017; Xu et al., 2015). В статье (Захарчук и др., 2006) на основе частотно-направленного спектрального анализа спутниковых альтиметрических полей, имевших временное разрешение 7 сут, оценены различные характеристики колебаний уровня Балтийского моря в диапазоне периодов от недель до месяцев. Показано, что возмущения уровня моря с периодами от 30 до 92 сут в этих полях имеют пространственные масштабы от 250 до 1400 км и распространяются в разных направлениях со скоростями 7–31 см/с. Характеристики данных возмущений уровня моря сравнивались с теоретическими дисперсионными соотношениями низкочастотных волн, что позволило идентифицировать их как баротропные и бароклинные волны Россби и бароклинные топографические волны.

В работе (Xu et al., 2015) на основе вдольтрековых альтиметрических данных по предложенной авторами методике конструировались среднемесячные поля уровня Балтийского моря. Сравнение колебаний уровня в альтиметрических полях с рядами среднемесячных значений, оценённых с помощью береговых мареографных измерений, показало высокие коэффициенты корреляции при небольших расхождениях значений средних квадратических отклонений (СКО) сравниваемых рядов уровня.

В работах (Захарчук и др., 2014; Тихонова, Сухачев, 2017) спутниковые альтиметрические данные использовались для изучения больших затоков солёных североморских вод в Балтийское море. Было показано, что перед большими затоками в течение нескольких недель отмечаются резкие перепады уровня между Северным и Балтийским морями, достигающие 50–100 см. Процесс интенсивных затоков североморских вод в Балтийское море сопровождается не только горизонтальными, но и вертикальными движениями, проявляющимися в усилении конвергентных потоков в Северном море и дивергентных — в Балтийском (Захарчук и др., 2014). Выраженной особенностью низкочастотной динамики вод Северного и Балтийского морей во время больших затоков является её волновая структура (Захарчук и др., 2014; Тихонова, Сухачев, 2017). В обоих морях низкочастотные волны с периодами от недель до месяцев распространяются с восточной составляющей фазовой скорости вдоль изобат, однако их характеристики значительно отличаются: в южной части Балтики фазовые скорости волн составляют 5 см/с, а длины — 64 км, в то время как в Северном море фазовые скорости и длины волн в несколько раз больше и составляют 12–32 см/с и 307–956 км соответственно (Захарчук и др., 2014).

Плохо изученным остаётся вопрос об особенностях возбуждения в системе Балтийского и Северного морей выделенных в альтиметрических полях уровней низкочастотных волновых возмущений под действием анемобарических сил. Согласно теоретическим исследованиям считается, что касательное трение ветра обладает наибольшей эффективностью при генерации возмущений синоптического масштаба в термодинамических полях открытого океана по сравнению с горизонтальным градиентом атмосферного давления (Коротаев, 1988; Frankignoul, Muller, 1979a, b). Спутниковая альтиметрия открыла возможность на эмпирическом уровне исследовать эту проблему для открытых районов морей и океанов. В данной статье на примере Балтийского моря исследуются возможности массива спутниковых альтиметрических данных аномалий уровня моря (SLA) для описания колебаний уровня синоптического масштаба и оценки статистической связи между ними и касательным трением ветра. Под синоптическим масштабом изменчивости здесь, следуя работам (Каменкович и др., 1987; Монин, 1972), будем понимать возмущения в полях уровня моря с временными периодами от суток до месяцев и пространственными масштабами от десятков до тысяч километров.

Данные и методы

Для исследования колебаний уровня Балтийского моря использовался массив комбинированных альтиметрических данных нескольких спутников: Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2, включающий поля аномалий уровня моря (SLA) с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^{\circ}$ и дискретностью 1 сут (E. U. Copernicus Marine Service Information, http://marine.copernicus.eu), полученные методом оптимальной интерполяции (Bretherton et al., 1976; Pujol et al., 2016). При создании массива в исходные альтиметрические данные были введены поправки на орбитальную ошибку, коррекции на инструментальные ошибки, поправки на влияние тропосферы и ионосферы на запаздывание зондирующего и отражённого импульса альтиметра (Le Traon et al., 1998). Кроме этого, из альтиметрических данных были исключены колебания, связанные со статическим эффектом атмосферного давления, воздействия ветровых волн, океанских и земных приливов. Альтиметрические данные проверялись на наличие пропусков. Точки сеточной области, в которых отмечался хотя бы один пропуск в альтиметрических данных, исключались из дальнейшего анализа. Наибольшее количество пропусков связано с наличием припайного и дрейфующего льда в зимний период и приходится на северную часть Ботнического залива, а также на центральную и восточную части Финского залива.

Для ответа на вопрос, насколько точно спутниковые альтиметрические данные описывают колебания уровня синоптического масштаба, было проведено их сравнение с имеющимися

в нашем распоряжении инструментальными мареографными измерениями уровня на 28 различных береговых станциях в Балтийском море, имеющими продолжительность от 2 до 18 лет, которые были получены частично с ресурса Е. U. Copernicus Marine Service Information (http://marine.copernicus.eu), а частично — из базы данных СПО ФГБУ «ГОИН». Ряды инструментальных измерений уровня усреднялись до одних суток, а затем из них с помощью данных реанализа об атмосферном давлении (NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis) были исключены колебания, связанные с эффектом «обратного барометра». Сравнение альтиметрических и мареографных измерений уровня проводилось с помощью взаимного корреляционного, квантильного и спектрального анализов. К сожалению, в рядах мареографных измерений уровня после 2010 г. (на станции Пионерский — после 2008 г.) имеются пропуски, поэтому для сравнительного статистического анализа альтиметрических и мареографных рядов уровня были отобраны ряды до 2011 г. (см. *таблицу*).

Для исследования особенностей генерации колебаний уровня моря синоптического масштаба (ζ) под действием касательного трения ветра использовалась срочная (4 раза в сутки) информация о ветре (W) с пространственным разрешением 0,5×0,5°, полученная по данным реанализа метеорологических полей (NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2), NOAA's National Centers for Environmental Prediction, http://nomads.ncdc. noaa.gov/modeldata/). Так как пространственное разрешение сеточной области для полей ветра было более грубым по сравнению с пространственным шагом альтиметрических значений уровня, проводилась двухмерная линейная интерполяция составляющих ветра на параллель и меридиан в узлы сеточной области альтиметрических измерений рассчитывались ряды среднесуточных значений касательного трения ветра $\tau = c\rho_0 W |W|$ (где *c* — безразмерный коэффициент, ρ_0 — плотность воздуха). Затем из рядов (τ) и (ζ) исключался линейный тренд, а потом с помощью Фурье-анализа, выполнявшегося по методу наименьших квадратов, исключались сезонные колебания (годовая гармоника и её обертоны: полугодовой).

Для оценки взаимосвязи между касательным трением ветра (т) и уровнем моря (ζ) проводился взаимный корреляционный анализ по методике, изложенной в работе (Рожков, 2002). Следуя этой методике, в начале оценивались матрицы коэффициентов взаимных корреляций следующего вида:

$$K_{\zeta\tau} = \begin{vmatrix} r_{\zeta\zeta} & r_{\zeta u} & r_{\zeta v} \\ r_{u\zeta} & r_{uu} & r_{uv} \\ r_{v\zeta} & r_{\zeta u} & r_{vv} \end{vmatrix}, \quad K_{uv} = \begin{vmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{vu} & r_{vv} \\ r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix},$$

где $K_{\zeta\tau}$ и K_{uv} — определители матриц; ζ — скалярный процесс (в нашем случае — уровень моря); τ — касательное трение ветра; u, v — составляющие τ на параллель и меридиан соответственно; $r_{\zeta\zeta}, r_{\zeta u}, r_{uv}, r_{vv}$ — коэффициенты взаимной корреляции. Затем рассчитывался множественный коэффициент корреляции между скалярным (ζ) и векторным (τ) процессами:

$$R_{\zeta\tau}(\theta) = \sqrt{1 - \frac{K_{\zeta\tau}}{K_{uv}}},\tag{1}$$

где θ — временной сдвиг.

Оценки взаимной корреляции между рядами $\tau(t)$ и $\zeta(t)$ в узлах сеточной области спутниковых альтиметрических данных производились в стационарном приближении ($R_{\zeta\tau}(\theta)$) и с учётом нестационарности процессов ($R_{\zeta\tau}(\theta, t)$). Период квазистационарности для расчётов $R_{\zeta\tau}(\theta, t)$ принимался равным двум месяцам. Таким образом, за рассматриваемый здесь временной период непрерывных спутниковых альтиметрических измерений (18 лет) для каждой точки сеточной области получалось 108 оценок $R_{\zeta\tau}(\theta, t)$. Столь большое количество результирующих полей $R_{\zeta\tau}(\theta, t)$ требует применения какого-либо метода сжатия информации для её дальнейшего обобщения и визуализации с целью физической интерпретации. Для этого в данной работе предлагается следующий подход: в каждой точке сеточной области из 108 полученных оценок $R_{\zeta\tau}(\theta, t)$ выбираются случаи (количество, в процентах), когда значения $R_{\zeta\tau}(\theta, t) > 0,60$. Такой подход позволяет выявить районы Балтийского моря, которые являются наиболее благоприятными для передачи энергии касательного трения ветра движениям водных масс в исследуемом диапазоне пространственно-временных масштабов.

Сравнение спутниковых альтиметрических и мареографных измерений уровня моря

На *рис.* 1 показаны примеры среднесуточных рядов уровня моря, полученных на основе мареографных и спутниковых альтиметрических измерений.



Рис. 1. Ряды среднесуточных значений уровня моря, полученные на основе мареографных (красная линия) и спутниковых альтиметрических (синяя линия) измерений в пунктах Симрисхамн (*a*), Спикарна (*б*), Стокгольм (*в*) и Пионерский (*г*)



Рис. 2. Станции мареографных измерений уровня в Балтийском море (красные кружки). Цифрами показаны коэффициенты корреляции между контактными и альтиметрическими измерениями уровня моря

Хорошо видно, что спутниковые альтиметрические данные неплохо описывают основные тенденции изменений уровня моря, хотя отмечаются и заметные различия, на которых мы остановимся ниже, при описании сравнительного статистического анализа рядов альтиметрических и мареографных измерений уровня моря.

На *рис. 2* представлены результаты взаимного корреляционного анализа, выполненного в стационарном приближении, между рядами среднесуточных значений уровня моря, полученными по данным мареографных измерений на береговых станциях, и рядами альтиметрических наблюдений. За исключением Датских проливов, в подавляющем большинстве рассматриваемых прибрежных районов открытой Балтики, а также в Ботническом, Финском и Рижском заливах отмечаются высокие значения коэффициентов взаимной корреляции между альтиметрическими и контактными наблюдениями уровня моря, варьирующие от 0,67 до 0,92. На самом западе Балтики коэффициенты корреляции несколько ниже — 0,62–0,75, а в Датских проливах они достигают самых низких значений — 0,40–0,44.

В таблице сведены для сравнительного анализа альтиметрических и контактных данных различные статистические характеристики колебаний уровня моря, оценённые за отдельные годы. От года к году коэффициенты взаимной корреляции меняются незначительно, оставаясь достаточно высокими (0,6–0,9). При этом наибольшую стабильность во времени демонстрируют оценки коэффициентов взаимной корреляции для станций Стокгольм и Пионерский (0,8–0,9).

Сравнительный анализ других статистических характеристик, представленных в *таблице*, выявляет существенные расхождения между альтиметрическими и контактными измерениями уровня моря. Наименее выражены различия между оценками медианы, однако значения максимумов и СКО у альтиметрических данных заметно занижены (а для минимумов — завышены), в отдельные годы — в 2–3 раза (см. *таблицу*).

Район	Параметр	Годы									
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Симрисхамн	R	0,69	0,80	0,73	0,68	0,79	0,80	0,73	0,72	0,71	0,68
	СКО _и СКО _а	17,0 12,4	19,8 14,4	17,1 12,3	15,4 12,2	18,4 13,6	18,2 14,5	18,3 13,6	18,9 12,7	15,7 12,8	18,1 11,5
	min _и min _a	-47,3 -24,4	-48,4 -31,2	-53,8 -29,6	-40,2 -26,6	-41,4 -26,9	-51,8 -31,1	-27,6 -16,2	-36,4 -25,6	-42,8 -26,4	-46,7 -42,9
	те _и те _а	$0,2 \\ -0,3$	0,4 0,3	-2,9 0,1	2,8 2,0	0,5 2,5	$-2,3 \\ -0,6$	11,0 9,2	4,0 3,8	-2,3 -1,6	-1,0 -2,8
	тах _и max _a	58,9 31,8	71,9 37,1	49,0 35,5	52,7 30,1	58,1 39,3	50,0 41,6	76,7 42,8	74,4 36,0	66,1 39,8	59,5 19,8
Спикарна	R	0,70	0,85	0,60	0,72	0,83	0,81	0,73	0,78	0,69	0,65
	СКО _и СКО _а	19,2 13,4	28,5 15,4	19,2 9,6	19,7 12,7	24,5 15,6	24,2 15,2	22,5 13,7	24,0 13,6	17,5 11,2	17,8 8,5
	min _и min _a	-52,0 -20,2	-61,8 -37,5	-60,39 -24,59	$-53,52 \\ -31,04$	-53,47 -23,78	-53,55 -26,43	$-46,22 \\ -14,00$	-50,15 -26,27	-48,92 -22,16	-54,96 -27,07
	те _и те _а	$^{-1,0}_{-1,0}$	-1,6 -1,0	$-2,58 \\ -0,57$	4,79 2,60	3,51 2,90	$-0,16 \\ 0,71$	12,53 10,32	7,64 5,33	$-3,42 \\ -1,80$	$-8,26 \\ -4,36$
	тах _и тах _а	58,9 35,2	$101,1 \\ 28,5$	56,55 21,71	81,38 33,30	94,02 44,77	71,74 37,58	104,39 46,64	89,36 32,25	75,87 26,96	55,06 14,13
CTOKFOJIĐM	R	0,75	0,89	0,70	0,77	0,88	0,86	0,78	0,82	0,78	0,72
	СКО _и СКО _а	16,4 12,4	24,9 15,1	$17,17 \\ 10,12$	16,50 11,76	21,17 15,27	21,22 15,15	20,11 13,97	21,26 13,05	14,98 11,37	16,25 9,73
	min _и min _a	-45,2 -25,7	-57,7 -28,1	-54,35 -26,17	-31,18 -27,27	-43,36 -24,77	$-53,01 \\ -24,80$	$-25,31 \\ -18,38$	-38,14 -21,92	-41,94 -21,98	-49,35 -30,03
	те _и те _а	$-1,4 \\ -0,5$	$-3,6 \\ -0,6$	$-3,20 \\ -0,86$	4,72 2,64	2,06 2,07	$-1,14 \\ 0,12$	13,20 9,84	8,39 5,01	-2,85 -2,13	-5,37 -4,24
	тах _и тах _а	55,8 27,4	75,4 30,6	56,34 24,27	64,91 26,42	77,23 44,96	54,37 37,69	102,94 44,31	76,31 31,20	59,55 29,22	55,99 15,37
Пионерский	R	0,79	0,84	0,78	0,78	0,85	0,87	0,80	0,79		
	СКО _и СКО _а	20,4 15,1	24,2 17,5	19,88 12,03	18,05 13,04	20,34 15,97	21,65 17,38	20,77 15,60	20,82 13,45		
	min _и min _a	-53,4 -31,7	-56,4 -34,0	-70,40 -31,96	$-40,40 \\ -28,79$	-42,40 -28,09	$-60,40 \\ -36,88$	$-53,40 \\ -25,99$	$-46,40 \\ -27,90$		
	те _и те _а	$0,5 \\ -1,8$	-1,2 -2,5	-1,87 -1,33	2,11 1,45	-0,83 1,15	-4,94 -2,97	10,08 9,64	4,11 3,32		
	max _u max _a	82,6 39,8	75,1 35,7	62,60 31,76	72,60 26,76	72,60 40,47	72,60 43,99	92,60 53,52	110,10 30,22		

Сравнение статистических характеристик колебаний уровня моря, оценённых на основе контактных и альтиметрических измерений

Примечание: R — коэффициент корреляции между альтиметрическими и контактными измерениями уровня моря; CKO_{μ} — среднеквадратическое отклонение контактных измерений уровня моря; CKO_{a} — среднеквадратическое отклонение альтиметрических измерений; min_u — минимальный уровень моря по контактным измерениям; min_a — минимальный уровень моря по альтиметрическим данным; me_u — средний уровень моря по контактным измерениям; me_a — средний уровень моря по альтиметрическим данным; max_u — максимальный уровень моря по контактным измерениям; max_a — максимальный уровень моря по контактным измерениям; max_a — максимальный уровень моря по альтиметрическим данным.



Рис. 3. Спектры колебаний уровня в районах станций Симрисхамн (*a*), Спикарна (*б*), Стокгольм (*в*) и Пионерский (*г*), оценённые по мареографным измерениям (красная линия) и по спутниковым альтиметрическим данным (синяя линия)

Сравнение спектров рядов альтиметрических и контактных значений уровня моря, показанных на *рис. 3*, даёт представление, в каких частотных диапазонах отмечаются наибольшие расхождения между альтиметрическими и контактными данными. Хорошо видно, что в высокочастотном диапазоне, соответствующем периодам от двух суток до трёх недель, значения спектральной плотности альтиметрических данных значительно занижены по сравнению с контактными измерениями. Так, для района станций Симрисхамн и Пионерский спектральная плотность альтиметрических данных в диапазоне периодов от нескольких суток до трёх недель занижена на порядок и больше. В более низкочастотном диапазоне спектральные оценки сравниваемых рядов спутниковых и мареографных измерений уровня близки.

Таким образом, альтиметрические данные дают возможность достаточно хорошо описывать только низкочастотную область спектра интересующего нас диапазона синоптической изменчивости колебаний уровня Балтийского моря. Эти колебания вносят очень заметный вклад в суммарную изменчивость крупномасштабных колебаний уровня моря. На это указывает выполненное нами сравнение оценок дисперсий исходных рядов среднесуточных значений уровня моря и дисперсий рядов, из которых с помощью фильтра Баттерворта были исключены колебания от двух суток до трёх недель, а также более трёх месяцев. Сравнение показало, что в зависимости от года дисперсия колебаний низкочастотного диапазона синоптической изменчивости уровня моря меняется в широких пределах, достигая в отдельные годы 54–94 % от суммарной дисперсии рядов среднесуточных значений уровня моря.

Результаты взаимного корреляционного анализа между колебаниями уровня моря и касательным трением ветра

На *рис. 4a* (см. с. 170) представлено пространственное распределение коэффициентов корреляции, рассчитанных в стационарном приближении между альтиметрическими колебаниями уровня синоптического масштаба и касательным трением ветра по формуле (1). Их низкие значения, меняющиеся от 0,10 до 0,35, свидетельствуют об отсутствии стационарной связи между рассматриваемыми гидрометеорологическими характеристиками.

Рисунок 46 обобщает результаты взаимного корреляционного анализа между $\tau(t)$ и $\zeta(t)$, выполненного с учётом нестационарности процессов, давая представление о том, в каких районах Балтики чаще всего наблюдается высокая (>0,60) корреляция между касательным трением ветра и низкочастотными колебаниями уровня моря. Хорошо видно, что эти районы локализованы в юго-западной и юго-восточной частях открытой Балтики. Однако и в этих областях частота повторения периодов высокой корреляции между касательным трением ветра и низкочастотными колебаниями уровня моря синоптического диапазона изменчивости не является высокой, так как она не превышает здесь 20–50 %. В других регионах Балтийского моря эта повторяемость приближается к нулю.

Можно предположить, что основным регионом генерации волнообразных возмущений уровня с периодами от недель до месяцев под действием анемобарических сил может быть Северное море. На это указывают результаты, опубликованные в работе (Kulikov et al., 2015). В данном исследовании на основе взаимного спектрального анализа контактных мареографных измерений уровня показано, что Датские проливы выступают в роли фильтра для мезомасштабных и синоптических колебаний уровня Северного моря с периодами от нескольких часов до 10 сут, в то время как высокие оценки когерентности и наличие разности фаз для более низкочастотных колебаний уровня свидетельствовали о том, что они распространялись из Северного моря в Балтийское со сравнительно небольшим уменьшением амплитуды. На основании этих результатов авторы приходят к выводу, что в отличие от более низкочастотных возмущений уровня с периодами от нескольких часов до 10 сут не являются индуцированными, а генерируются непосредственно в Балтийском море.

Для проверки гипотезы о североморской природе возмущений уровня с периодами от недель до месяцев мы, так же как и для Балтики, по описанной выше методике провели взаимный корреляционный анализ между колебаниями уровня Северного моря, полученными по альтиметрическим данным, и касательным трением ветра.



Рис. 4. Коэффициенты взаимной корреляции $R_{\zeta\tau}(\theta)$ между колебаниями уровня Балтийского моря, полученными по альтиметрическим данным, и касательным трением ветра, оценённые в стационарном приближении (*a*); результаты нестационарного взаимного корреляционного анализа, показывающего количество случаев (в процентах), когда значения $R_{\tau\tau}(\theta, t) > 0,60$ (*б*)



Рис. 5. Коэффициенты взаимной корреляции *R*_{ζτ}(θ) между колебаниями уровня Северного моря, полученными по альтиметрическим данным, и касательным трением ветра, оценённые в стационарном приближении (*a*); результаты нестационарного взаимного корреляционного анализа, показывающего количество случаев (в процентах), когда значения *R*_{ζτ}(θ, *t*) > 0,60 (*б*)

Результаты анализа иллюстрирует *рис. 5а*, который показывает, что в отличие от Балтики в Северном море оценённые в стационарном приближении коэффициенты взаимной корреляции $R_{\zeta\tau}(\theta)$ между низкочастотными колебаниями уровня и касательным трением ветра заметно выше: их максимальные величины наблюдаются на юго-востоке Северного моря, где они достигают значений 0,51. Учёт нестационарности гидрометеорологических процессов при проведении взаимного корреляционного анализа выявляет значительную неоднородность в распределении оценок количества случаев с высокой корреляцией ($R_{\zeta\tau}(\theta) > 0,60$) между касательным трением ветра и низкочастотными колебаниями уровня Северного моря (*рис. 56*). На востоке-юго-востоке моря наблюдается обширный регион, где повторяемость случаев высокой корреляции достигает 80–92 %. Такие же показатели отмечаются в сравнительно локализованных районах в центральной, северной и северо-западной частях моря. В сравнении с этими районами на юго-западе и северо-востоке Северного моря отмечаются акватории, где повторяемость случаев высокой корреляции не превышает 5–10 %.

Выводы

Сравнительный статистический анализ спутниковых альтиметрических данных и прибрежных контактных мареографных измерений уровня Балтийского моря показал, что альтиметрическая информация позволяет достаточно хорошо описывать только низкочастотную часть спектра интересующих нас колебаний уровня синоптического масштаба с периодами от недель до месяцев.

Результаты взаимного корреляционного анализа между низкочастотными волнообразными колебаниями уровня моря и касательным трением ветра показывают, что в Балтийском море отсутствует стационарная связь между этими гидрометеорологическими характеристиками. Учёт нестационарности процессов при проведении взаимного корреляционного анализа показывает, что на большей части Балтики частота повторения периодов высокой корреляции между касательным трением ветра и низкочастотными колебаниями уровня моря синоптического диапазона изменчивости близка к нулю и лишь в локализованных районах юго-западной и юго-восточной частей моря эта частота может достигать 20–50 %. В отличие от Балтийского моря в отдельных районах Северного моря в периодах от недель до месяцев происходит квазипостоянная передача энергии от анемобарических сил к низкочастотным движениям водных масс. В этом море складываются более благоприятные, чем в Балтийском, гидрометеорологические условия для генерации низкочастотных волнообразных колебаний уровня под действием касательного трения ветра, которые затем проникают в Балтику в виде свободных волн.

Литература

- 1. Захарчук Е.А., Клеванцов Ю. П., Тихонова Н.А. Пространственно-временная структура и идентификация синоптических возмущений уровня Балтийского моря по данным спутниковых альтиметрических измерений // Метеорология и гидрология. 2006. № 5. С. 69–78.
- 2. Захарчук Е.А., Кудрявцев А.С., Сухачев В. Н. О резонансно-волновом механизме больших балтийских затоков // Метеорология и гидрология. № 2. 2014. С. 56–68.
- 3. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. 512 с.
- 4. *Коротаев Г. К.* Теоретическое моделирование синоптической изменчивости океана. Киев: Наукова Думка, 1988. 160 с.
- 5. *Монин А. С.* Классификация нестационарных процессов в океане // Изв. АН СССР. 1972. № 7. С. 26–30.
- 6. *Рожков В.А.* Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 2. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 780 с.
- 7. *Тихонова Н.А., Сухачев В. Н.* Волновая интерпретация больших балтийских затоков // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 67–79.
- 8. *Bretherton F., Davis R., Fandry C.* A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE–73 // Deep-Sea Research. 1976. No. 23. P. 559–582.
- 9. *Frankignoul C., Muller P.* (1979a) On the generation of geostrophic eddies by surface buoyancy flux anomalies // J. Physical Oceanography. 1979. V. 9. No. 6. P. 1207–1213.
- Frankignoul C., Muller P. (1979b) Quasi-geostrophic response of an infinite β-plane ocean to stochastic forcing by the atmosphere // J. Physical Oceanography. 1979. V. 9. No. 6. P. 104–127.
- 11. *Kulikov E.A., Medvedev I.P., Koltermann K.P.* Baltic Sea Level Low-Frequency Variability // Tellus A. 2015. V. 67. 25642. URL: http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.25642.
- 12. *Le Traon P.Y., Nadal F., Ducet N.* An improved mapping method of multisatellite altimeter data // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 1998. No. 15. P. 522–534.
- 13. Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N. DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years // Ocean Science. 2016. V. 12. Iss. 5. P. 1067–1090. DOI: 10.5194/os-12-1067-2016.
- Xu Q., Cheng Y., Plag H.-P., Zhang B. Investigation of sea level variability in the Baltic Sea from tide gauge, satellite altimeter data, and model reanalysis // Intern. J. Remote Sensing. V. 36. Iss. 10. 2015. P. 2548–2568.

Application of satellite altimetry data for analysis of peculiarities in synoptic sea-level perturbations forced by wind stress in the Baltic Sea-the North Sea system

E.A. Zakharchuk, V.N. Sukhachev

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia E-mail: eazakharchuk@yandex.ru N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Saint Petersburg Branch Saint Petersburg 199397, Russia E-mail: syhachev@mail.ru

Based on a joint statistical analysis of satellite altimetry information and meteorological field reanalysis data, the features of generation of low-frequency sea level disturbances in the system of the Baltic and North Seas under the action of tangential wind stress are estimated. The results indicate that there is no stationary relationship between these hydrometeorological processes in the Baltic Sea. Taking into account the nonstationarity of processes during the conduct of cross-correlation analysis shows that in most of the Baltic Sea regions the frequency of repetition of periods of high correlation between the wind stress and low-frequency sea level oscillations of the synoptic range of variability is close to zero and only in localized areas of the southwestern and southeastern part of the sea this frequency can reach 20-50 %. It is shown that, in comparison with the Baltic Sea, more favorable conditions are created in the North Sea for the generation of low-frequency wave sea-level oscillations under the action of wind stress: the coefficients of cross-correlation estimated in the stationary approximation are noticeably higher here. Accounting for non-stationarity of processes reveals a significant heterogeneity in the distribution of estimates of correlation coefficients: in the east-south-east of the North Sea, as well as in localized areas of the central, northern and north-western parts of the sea, the frequency of occurrences of high correlation reaches 80–92 %, while in the southwest and northeast of the North Sea, there are water areas where the frequency of occurrences of high correlation does not exceed 5-10 %.

Keywords: Baltic Sea, North Sea, satellite altimetry, sea level, wind stress, cross-correlation analysis

Accepted: 22.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-163-174

References

- 1. Zakharchuk E.A., Klevantsov Y.P., Tikhonova N.A., Prostranstvenno-vremennaya struktura i identifikatsiya sinopticheskikh vozmushchenii urovnya Baltiiskogo morya po dannym sputnikovykh al'timetricheskikh izmerenii (Spatio-temporal structure and identification of synoptic perturbations of the Baltic Sea level from satellite altimetric measurements), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2006, No. 5, pp. 69–78.
- 2. Zakharchuk E.A., Kudryavtsev A.S., Sukhachev V.N., O rezonansno-volnovom mekhanizme bol'shikh baltiiskikh zatokov (On the resonance-wave mechanism Major Baltic Inflow), *Meteorologiya i gidrologiya*, No. 2, 2014, pp. 56–68.
- 3. Kamenkovich V. M., Koshlyakov M. N., Monin A. S., *Sinopticheskie vikhri v okeane* (Synoptic vortexes in the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 512 p.
- 4. Korotaev G.K., *Teoreticheskoe modelirovanie sinopticheskoi izmenchivosti okeana* (Theoretical modeling of synoptic ocean variability), Kiev: Naukova Dumka, 1988, 160 p.
- 5. Monin A. S., Klassifikatsiya nestatsionarnykh protsessov v okeane (Classification of non-stationary processes in the ocean), *Izvestiya AN SSSR*, 1972, No. 7, pp. 26–30.
- 6. Rozhkov V.A., *Teoriya i metody statisticheskogo otsenivaniya veroyatnostnykh kharakteristik sluchainykh velichin i funktsii s gidrometeorologicheskimi primerami. Kniga II* (Theory and methods of statistical estimation of probabilistic characteristics of random variables and functions with hydrometeorological examples. Book II), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002, 780 p.
- 7. Tikhonova N.A., Sukhachev V.N., Volnovaya interpretatsiya bol'shikh baltiiskikh zatokov (Wave interpretation of Major Baltic floods), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, No. 4, pp. 67–79.
- 8. Bretherton F., Davis R., Fandry C., A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73, *Deep-Sea Research*, 1976, No. 23, pp. 559–582.

- 9. Frankignoul C., Muller P. (1979a), On the generation of geostrophic eddies by surface buoyancy flux anomalies, *J. Physical Oceanography*, 1979, Vol. 9, No. 6, pp. 1207–1213.
- 10. Frankignoul C., Muller P. (1979b), Quasi-geostrophic response of an infinite β-plane ocean to stochastic forcing by the atmosphere, *J. Physical Oceanography*, 1979, Vol. 9, No. 6, pp. 104–127.
- 11. Kulikov E.A., Medvedev I.P., Koltermann K.P., Baltic Sea Level Low-Frequency Variability, *Tellus A*, 2015, Vol. 67, 25642, URL: http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.25642.
- 12. Le Traon P.Y., Nadal F., Ducet N., An improved mapping method of multisatellite altimeter data, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, No. 15, pp. 522–534.
- 13. Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N., DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years, *Ocean Science*, 2016, Vol. 12, Issue 5, pp. 1067–1090, DOI: 10.5194/os-12-1067-2016.
- 14. Xu Q., Cheng Y., Plag H.-P., Zhang B., Investigation of sea level variability in the Baltic Sea from tide gauge, satellite altimeter data, and model reanalysis, *Intern. J. Remote Sensing*, Vol. 36, Issue 10, 2015, pp. 2548–2568.