

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ НА РОССИЙСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

**Медведев И.П.**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36,  
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, 129128, Москва,  
e-mail: [patamates@gmail.com](mailto:patamates@gmail.com)*

Статья поступила в редакцию 07.06.2018, одобрена к печати 10.10.2018

Сезонные колебания, выраженные годовой и полугодовой составляющими, – один из основных типов долгопериодной изменчивости уровенной поверхности Мирового океана. Сезонные колебания уровня Балтийского моря претерпевают существенные межгодовые вариации. В рамках настоящего исследования на основе длительных рядов береговых наблюдений были изучены особенности изменений сезонных колебаний уровня Балтийского моря в течении XX–XXI вв. Для выделения сезонных колебаний уровня Балтийского моря использовалась процедура сезонной коррекции X-12-ARIMA. Результаты настоящего исследования показали, что амплитуда и момент наступления максимума в сезонном ходе уровня моря существенно меняются от года к году. В период с 1990 по 2005 гг. наблюдалось существенное смещение максимума годового цикла на несколько месяцев с октября–декабря к январю–февралю, которое было отмечено и по данным побережья юго-восточной части Балтийского моря и Финского залива. Эти особенности годовых колебаний уровня должны были формироваться под влиянием крупномасштабных факторов, воздействующих на акваторию всего Балтийского моря, например, изменений ветра и атмосферного давления. Полученные ряды сезонных колебаний уровня моря позволили оценить их средние и максимальные амплитуды в течение второй половины XX–XXI вв. Средняя многолетняя высота ( $2\sigma$ ) сезонных колебаний уровня моря в восточной части Финского залива составляет 25–27 см, а максимальная высота может достигать 56–59 см.

**Ключевые слова:** Балтийское море, сезонные колебания, уровень моря, X-12-ARIMA

### Введение

Сезонные колебания, выраженные годовой и полугодовой составляющими, – один из основных типов движения долгопериодной изменчивости уровенной поверхности Мирового океана. Эти колебания уровня моря создаются, преимущественно, периодически повторяющимися нарушениями между приходной и расходной частями водного баланса моря и сезонными изменениями атмосферного давления и ветра. Характер сезонных колебаний уровня у различных участков береговой линии моря существенно зависит от локальных факторов.

Балтийское море – почти полностью замкнутый внутриматериковый шельфовый бассейн, сообщающийся с открытым океаном через узкие мелководные

Датские проливы. Сезонная изменчивость уровня Балтийского моря определяется преимущественно атмосферными условиями, в первую очередь, направлением преобладающих ветров, влияющих на водообмен с Северным морем, и изменениями атмосферного давления посредством обратного барометрического отклика (Ekman, 1998; Andersson, 2002; Barbosa, Donner, 2016). Пространственная структура сезонных гармоник в Балтийском море достаточно хорошо исследована. Так, в работе (Медведев, 2014) были рассчитаны средние климатические амплитуды и фазы годовой и полугодовой сезонных составляющих колебаний уровня Балтийского моря по 74 береговым станциям и было выявлено, что амплитуда годовых колебаний увеличивается от Датских проливов к вершинам Финского и Ботнического заливов, где и наблюдаются их максимальные амплитуды – 12–13 см.

В исследованиях (Ekman, Stigebrandt, 1990; Plag, Tsimplis, 1999; Hunicke, Zorita, 2008; Медведев, 2014; Barbosa, Donner, 2016; Cheng et al., 2018) было показано, что сезонные колебания уровня Балтийского моря претерпевают существенные межгодовые вариации. В работе (Ekman, Stigebrandt, 1990) по результатам анализа длительного ряда наблюдений в Стокгольме (160 лет) обнаружили увеличение амплитуды годовой гармоники от 8 см в XIX в. до 10 см XX в. В (Plag, Tsimplis, 1999) на основе взаимного спектрального анализа была выявлена когерентная временная изменчивость годового и полугодового колебаний уровня Северного и Балтийского морей и увеличение амплитуды в последние десятилетия XX века. В работе (Медведев, 2014) было показано, что амплитуда и фаза сезонных колебаний уровня Балтийского моря могут существенно меняться от года к году, что вызвано соответствующими изменениями интенсивности вынуждающих факторов (к примеру, зонального ветра, атмосферного давления и др.). Для изучения межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря в (Barbosa, Donner, 2016) были использованы различные методы анализа нестационарных временных рядов, включая непрерывный и дискретный вейвлет-анализы, анализ сингулярного спектра и метод эмпирической модовой декомпозиции сигналов. По результатам этих анализов в (Barbosa, Donner, 2016) было показано, что изменчивость сезонного цикла уровня Балтийского моря представляет собой чередующиеся периоды высоких и низких амплитуд без каких-либо значимых долгосрочных тенденций в увеличении/уменьшении амплитуды. Также в (Barbosa, Donner, 2016) было обнаружено, что более 40% вариаций амплитуды сезонных колебаний уровня Балтийского моря формируются под влиянием зонального ветра.

В рамках настоящего исследования на основе длительных рядов береговых наблюдений были изучены особенности изменений сезонных колебаний уровня Балтийского моря в течении XX–XXI вв. Сезонные колебания уровня моря представляют собой периодически коррелированный случайный процесс, вследствие чего применение классических методов спектрального и гармонического анализов позволяют получить лишь осредненные характеристики процессов. Для выявления экстремальных характеристик сезонных колебаний требуется применение методов, учитывающих нестационарность процесса.

В настоящем исследовании для выделения сезонных колебаний уровня Балтийского моря использовалась процедура сезонной коррекции X-12-ARIMA. Полученные ряды сезонных колебаний уровня моря позволили исследовать их межгодовую изменчивость и оценить средние и максимальные амплитуды в течение второй половины XX–XXI вв.

### Данные

В исследовании были использованы синхронные ряды среднемесячных значений уровня Балтийского моря на 18 российских прибрежных станциях (рис. 1). В Финском заливе Балтийского моря имелось 13 мареографов.

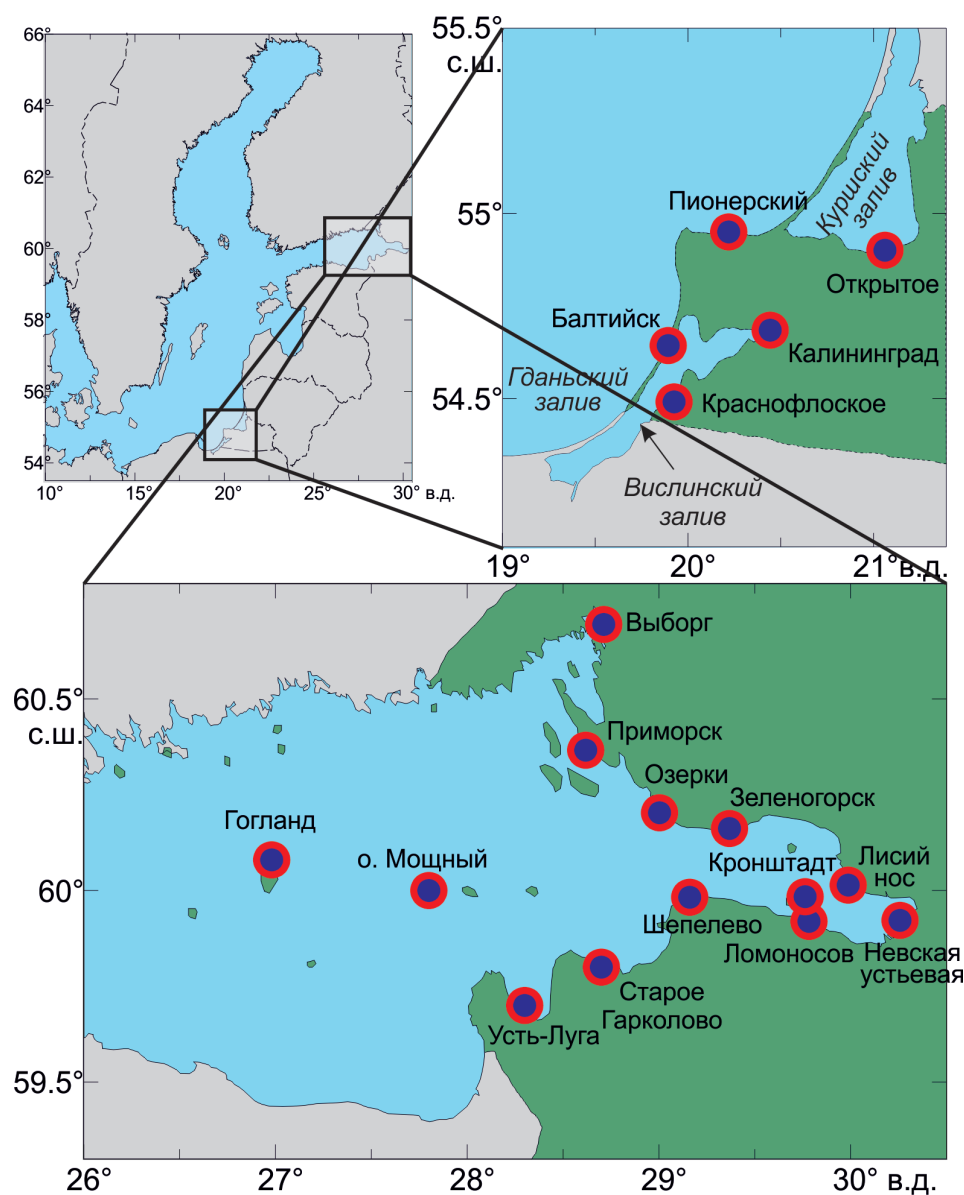


Рис. 1. Расположение станций, данные которых были использованы в настоящем исследовании.

Пять прибрежных станций располагались на побережье Калининградской области. Станция Пионерский расположена на открытом морском побережье, Открытое – в Куршском заливе, Краснофлотское и Калининград – в Вислинском заливе, Балтийск – в Балтийском проливе, соединяющем Вислинский залив с открытой Балтикой. Временные ряды в основном покрывали период с 1946 по 2015 гг. Подробная информация о периоде наблюдений для каждой станции представлена в таблице 1. Ряды данных были сформированы на основе архива Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО, <http://portal.esimo.ru/>).

Таблица 1. Данные, которые были использованы в настоящем исследовании

Название	Широта с.ш.	Долгота в.д.	Период наблюдений, гг.
Балтийск	19,9	54,6	1977–2015
Выборг	28,7	60,7	1947–2015
Головкино	21,3	55,0	1977–1984
Зеленогорск	29,4	60,1	1958–1992
Калининград	20,5	54,7	1977–2007
Краснофлотское	19,9	54,5	1977–2015
Кронштадт	29,8	60,0	1946–2015
Лисий Нос	30,0	60,0	1946–2015
Ломоносов	29,8	59,9	1946–2015
Мощный	27,8	60,0	1947–1992
Невская Устьевая	30,3	59,9	1946–2015
о. Гогланд	27,0	60,1	1945–1994
Озерки	29,0	60,2	1954–2015
Открытое	21,1	54,9	1977–2015
Пионерский	20,2	55,0	1977–2015
Приморск	28,4	60,2	1948–1987
Старое Гарколово	28,7	59,8	1957–1988
Усть-Луга	28,3	59,7	1946–1984
Шепелево	29,3	59,9	1989–2015

### Методика

Сезонные колебания уровня моря представляют собой периодически коррелированный случайный процесс. Для изучения сезонных колебаний уровня моря следует использовать методы анализа, учитывающие нестационарность временного ряда. Так, в (Barbosa, Donner, 2016) для этого были использованы непрерывный (CWT) и дискретный (DWT) вейвлет-анализы, а в (Cheng et al., 2018) применялся метод циклостационарных эмпирических ортогональных функций (CSEOF). В настоящем исследовании для выделения и последующего анализа сезонных колебаний уровня моря использовалась процедура сезонной коррекции X-12-ARIMA (Findley et al., 1998). Этот метод широко распространен при анализе сезонной изменчивости различных экономических показателей. В по-

следние десятилетия появились работы, успешно применяющие этот метод для анализа сезонной изменчивости температуры поверхности Мирового океана (Pezzulli et al., 2005), оптических свойств отдельных морей (Colella, 2016), а также колебаний уровня моря (Dangendorf et al., 2013).

Метод X-12-ARIMA позволяет разделить исходный временной ряд  $X_t$  (например, изменения уровня моря) на три компоненты: тренд  $T_t$  (в данном случае межгодовые колебания уровня), сезонный цикл  $S_t$  и нерегулярную компоненту  $I_t$ :

$$X_t = T_t + S_t + I_t, \quad (1)$$

где  $t$  – длина ряда (количество значений).

На первом этапе процедуры для расчета трендовой компоненты  $T$  временной ряд  $X$  сглаживается 12-месячным центрированным скользящим средним  $MA_{2 \times 12}$ :

$$MA_{2 \times 12}(X_t) = \frac{X_{t-6} + 2X_{t-5} + \dots + 2X_t + \dots + 2X_{t+5} + X_{t+6}}{24}. \quad (2)$$

Далее из исходного временного ряда вычитается трендовая компонента

$$Z_t = X_t - T_t, \quad (3)$$

что позволяет получить временной ряд, представляющий собой сумму сезонной компоненты и короткопериодного шума. После чего к полученному временному ряду  $Z_t$  применяется фильтр  $SMA_{2 \times 2}$ , которое представляющий собой скользящее среднее  $MA_{2 \times 2}$ :

$$MA_{2 \times 2}(X_t) = \frac{X_{t-1} + 2X_t + X_{t+1}}{4}, \quad (4)$$

которое применяется к временным сериям для каждого отдельного месяца. Полученный (сезонный) временной ряд корректируется путем вычитания скользящего среднего  $MA_{2 \times 12}$ , который представляет собой средний сезонный цикл.

На втором этапе сглаживание 12-месячным центрированным скользящим средним  $MA_{2 \times 12}$  применяется к временному ряду, полученному после вычитания сезонной компоненты:

$$Y_t = X_t - S_t, \quad (5)$$

что позволяет улучшить оценку трендовой компоненты  $T_t = MA_{2 \times 12}(Y_t)$ . После этого из исходного временного ряда вычитается улучшенная трендовая компонента  $Z_t = X_t - T_t$ . После чего к временному ряду  $Z_t$  снова применяется сезонный фильтр  $SMA_{2 \times 2}$ , позволяющий улучшить оценку сезонной компоненты  $S_t$ .

Третий шаг – это применение 12-месячного центрированного скользящего среднего уже к скорректированному временному ряду  $Y_t$ . После чего производится расчет остаточной (нерегулярной) компоненты  $I_t = X_t - T_t - S_t$ . Причем сезонная серия, полученная на втором этапе процедуры, остается неизменной. В результате вышеописанных преобразований мы получаем отдельные ряды, соответствующие трендовой  $T_t$ , сезонной  $S_t$  и нерегулярной  $I_t$  компонентам. Подробное изложение метода сезонной коррекции X-12-ARIMA представлено в работах (Dagum, 1980; Findley et al., 1998; Pezzulli et al., 2005).

На рис. 2 представлены результаты применения этого метода фильтрации для среднемесячных данных изменений уровня моря на станции Невская устьевая, которая располагается в Санкт-Петербурге. На рис. 2а показана трендовая компонента, которая представляет собой низкочастотные колебания уровня моря. Отфильтрованные сезонные колебания уровня моря показаны на рис. 2б. Нерегулярная компонента (рис. 2в) представляет собой колебания уровня моря с периодами преимущественно меньше года, оставшимися после исключения межгодовых и сезонных колебаний уровня моря. Эти колебания уровня формируются под влиянием неперiodических короткопериодных изменений вклада компонент водного баланса, а также изменений полей атмосферного давления и ветра над акваторией Балтийского моря. Также вклад в формирование отдельных месячных значений уровня моря могут вносить сгонно-нагонные явления с периодами несколько суток.

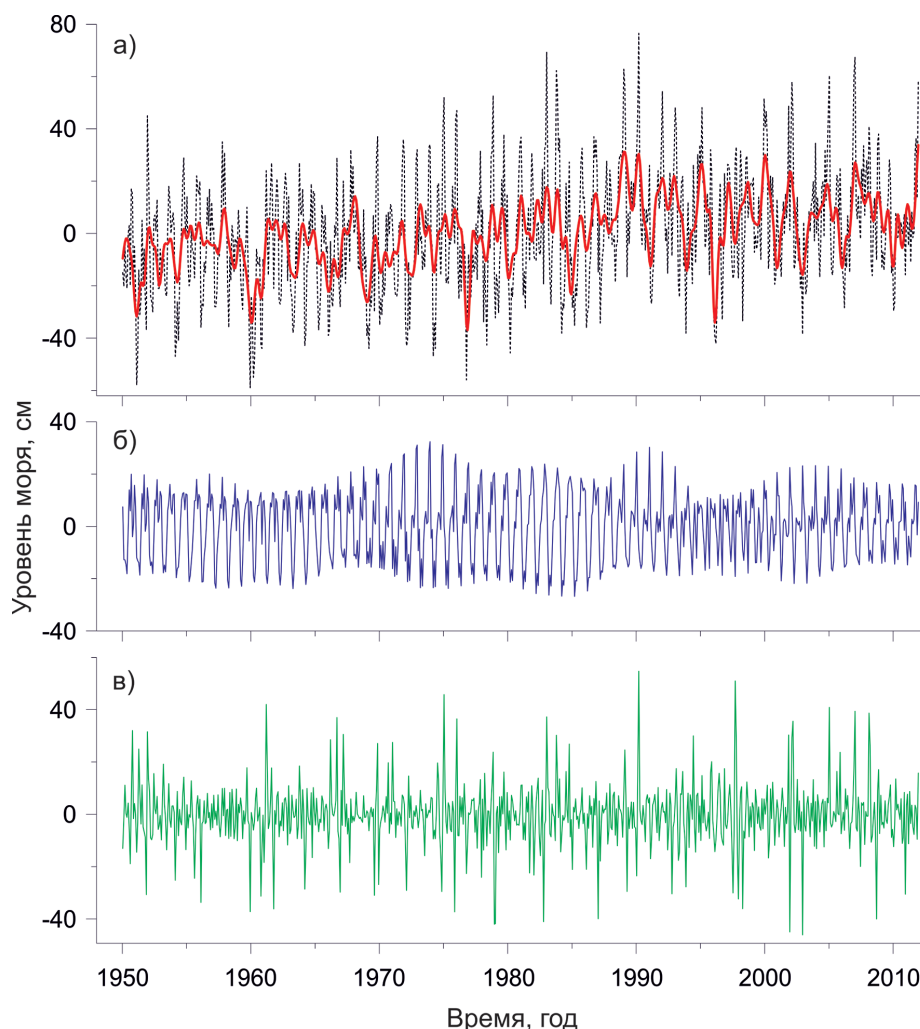


Рис. 2. Результаты сезонной фильтрации колебаний уровня моря на станции Невская устьевая. Черным цветом показан исходный ряд среднемесячных колебаний уровня моря (а), красным – межгодовые колебания уровня (трендовая компонента). Сезонные колебания уровня моря показаны синим цветом (б), нерегулярные колебания уровня – зеленым (в).



### Результаты

Процедура сезонной коррекции X-12-ARIMA была применена к рядам среднемесячных наблюдений для каждой рассматриваемой станции. В результате были получены ряды сезонных колебаний уровня моря для каждой станции. В целом для всего Финского залива характерны сезонные колебания уровня моря с максимумом в октябре–декабре и минимумом в марте–мае. На рис. 3 представлены сезонные изменения уровня моря на станциях Невская устьевая (а) и Выборг (б) с 1946 по 2015 г. Станция Невская устьевая находится в вершине Финского залива, в Санкт-Петербурге, а станция Выборг располагается в одноименном заливе на расстоянии около 170 км от Санкт-Петербурга. Несмотря на значительное расстояние между рассматриваемыми станциями, межгодовая изменчивость сезонных колебаний уровня моря на обеих станциях практически идентична: повторяется как общий характер изменчивости, так и локальные усиления сигнала,

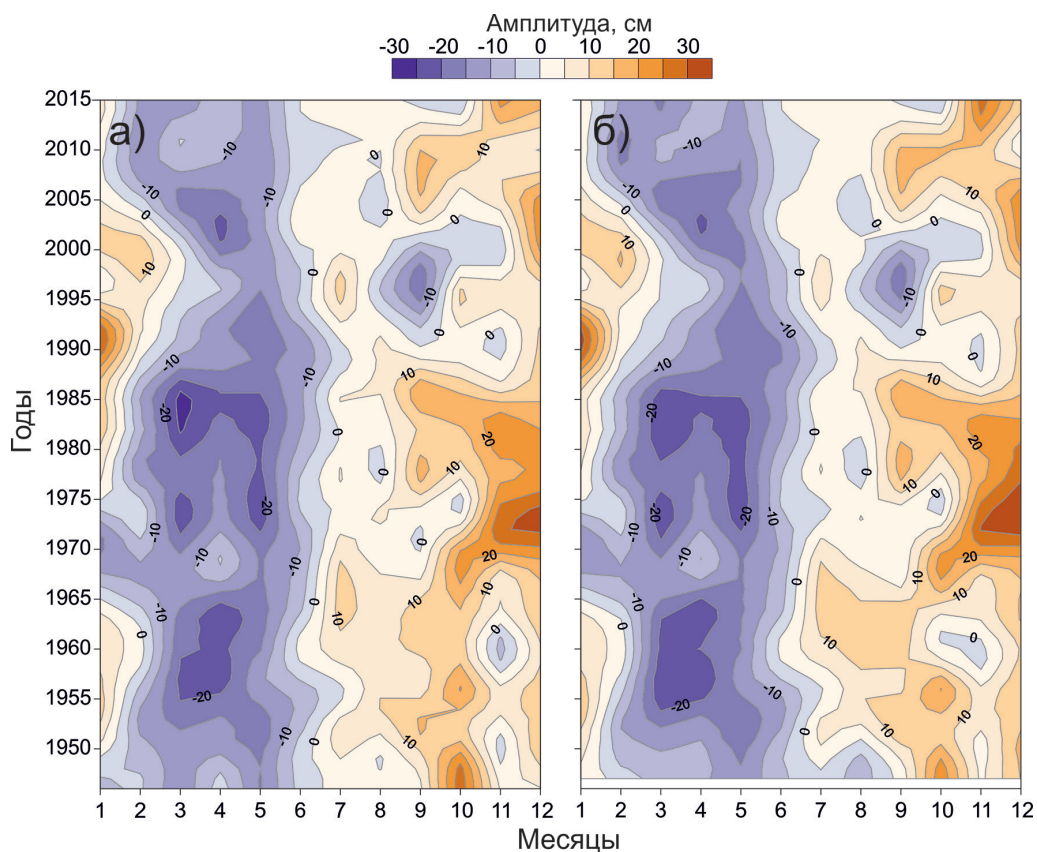


Рис. 3. Сезонные колебания уровня Балтийского моря на станциях Невская устьевая (а) и Выборг (б) с 1946 по 2015 гг.

характерные для отдельных годов. Это свидетельствует об однородности пространственной структуры сезонных колебаний уровня в восточной части Финского залива. Следует обратить внимание, что минимальные сезонные значения уровня Финского залива устойчиво наблюдаются в период с марта по май и слабо

меняются год от года. В период с мая по сентябрь–октябрь происходит подъем уровня моря. Максимальные сезонные значения уровня Финского залива, в отличие от минимальных, претерпевают существенные межгодовые изменения, которые выражены как в изменении месяца наступления максимума, так и в его высоте. В целом, максимальные значения уровня Финского залива наблюдаются в октябре или декабре. В период с 1970 по 1985 гг. максимум в сезонных колебаниях уровня моря достигался в декабре, а с 1985 по 1995 гг. позже – в январе. Максимальных высот сезонные колебания уровня моря достигали в декабре 1973–1974 гг.: до 32 см на Невской устьевой и до 35 см в Выборге (рис. 3б). С 1996 по 1998 гг. наблюдались аномальные сезонные колебания уровня Финского залива, когда уровень моря в сентябре составлял –19 см.

На рис. 4 представлены сезонные изменения уровня моря на станциях Краснофлотское (а), Открытое (б), Балтийск (в) и Пионерский (г) с 1977 по 2015 гг. Рассматриваемые станции имеют различные особенности географического расположения. Краснофлотское и Открытое располагаются в Вислинском и Куршском заливах юго-восточного побережья Балтийского моря. Станция Балтийск находится в одноименном проливе, соединяющем Вислинский залив с открытой акваторией Балтийского моря. Пионерский же располагается на открытом морском

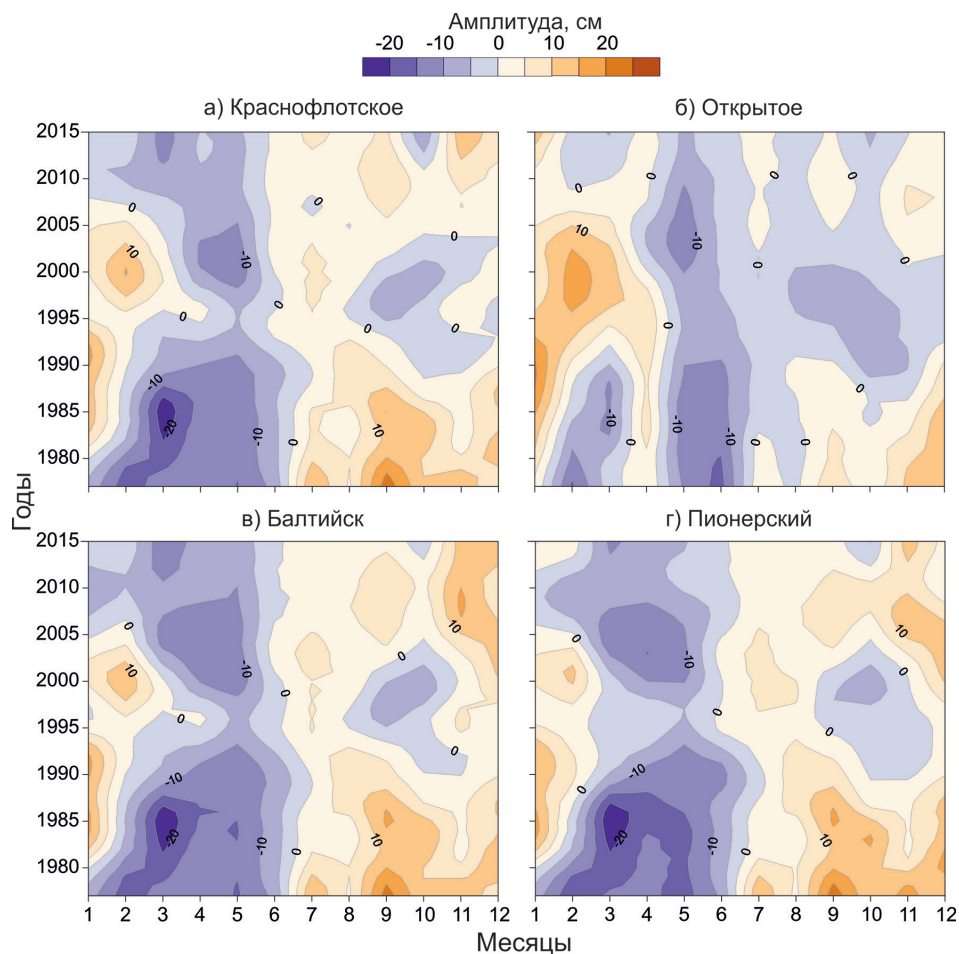


Рис. 4. Сезонные колебания уровня Балтийского моря на станциях Краснофлотское (а), Открытое (б), Балтийск (в) и Пионерский (г) с 1977 по 2015 гг.



побережье к востоку от Балтийска. Несмотря на различное местоположение станций Краснофлотское, Балтийск и Пионерский, сезонные колебания на этих станциях имеют схожий характер. Минимальные значения сезонного хода уровня моря на этих станциях наблюдаются в основном в период с марта по июнь (рис. 4а, в, г). Максимальные значения уровня моря достигаются в осенний период. Максимальные сезонные значения уровня моря на этих станциях подвержены существенным межгодовым изменением. Так, в период с 1977 по 1987 гг. максимум уровня достигался в сентябре–октябре. В период с 1994 по 2002 гг. в сентябре–октябре стал формироваться вторичный минимум сезонного хода уровня моря. Временная диаграмма изменения сезонных колебаний уровня моря в Куршском заливе (рис. 4б) имеет иную структуру. Так, минимальные значения уровня моря в Куршском заливе (рис. 4б) наблюдаются устойчиво с мая по июль. Максимальных значений уровень моря в Куршском заливе достигает в зимний период, в январе–феврале. Также в Куршском заливе в течение нескольких лет в апреле присутствовал локальный максимум сезонного хода уровня, отсутствующий в Вислинском заливе.

Отфильтрованные ряды сезонных колебаний уровня моря позволили оценить их средние и экстремальные статистические характеристики для всех 18 станций. Для каждой станции были рассчитаны среднеквадратические отклонения ( $\sigma$ ), которые представляют собой среднюю амплитуду сезонных колебаний уровня моря за рассматриваемый период наблюдений. Средняя амплитуда сезонных колебаний в восточной части Финского залива увеличиваются при перемещении к вершине залива (рис. 5а). Максимальные значения  $\sigma$  достигаются в Приморске – 14.4 см. Также для станций северного побережья залива наблюдается небольшое превышение значений  $\sigma$  по сравнению с южным (рис. 5а). В акватории моря, прилегающей к Калининградской области, значения  $\sigma$  не превышают 9.6 см, а в Куршском заливе составляют еще меньше – 7.5 см (рис. 5б).

Значения среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ) сезонных колебаний уровня моря (рис. 5а-б), рассчитанные по отфильтрованным (сезонным) рядам, близки к амплитудам сезонных колебаний уровня, которые были получены в работе (Медведев, 2014) при помощи гармонического анализа приливов. Согласно результатам работы (Медведев, 2014) амплитуда годовых колебаний в Кронштадте составляла 11.0 см, в Выборге – 11.9 см, а в Калининграде – 9.9 см.

Полученные в ходе процедуры сезонной фильтрации X-12-ARIMA временные ряды дают возможность оценить экстремальные сезонные колебания уровня Балтийского моря. Для этого на каждой станции была оценена максимальная величина (размах) сезонных колебаний уровня  $R_{max}$ , которая рассчитывалась как разница между максимальным и минимальным значениям уровня моря в течение одного годового цикла (12 месяцев). Наибольшая величина сезонных колебаний уровня  $R_{max}$  наблюдается на станции Выборг – до 59.5 см (рис. 5в). В вершине Финского залива  $R_{max}$  достигает 56–58 см. Наименьшие значения  $R_{max}$  в восточной части Финского залива получены для станций о. Мощный – 52 см, Усть-Луга и Шепелево – 51 см.

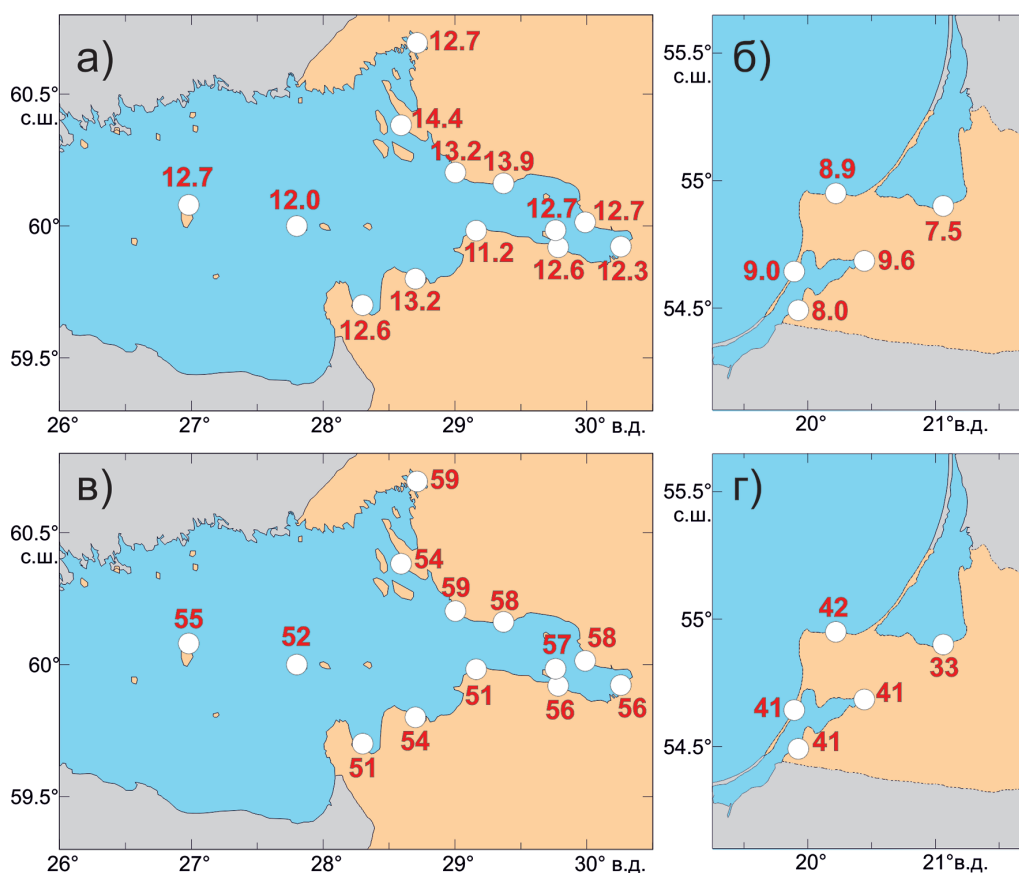


Рис. 5. Стандартное отклонение (а–б) и максимальный размах (в–г) сезонных колебаний уровня моря (см) на российском побережье Финского залива (а, в) и на побережье Калининградской области (б, г).

Размах сезонных колебаний уровня на рассматриваемых станциях сильно меняется от года к году. Наибольшей величины сезонные колебания уровня в восточной части Финского залива достигают в 1973–1974 гг. (рис. 6). В Выборге минимальный сезонный уровень моря наблюдался в марте (–24 см), максимальных значений уровень достигает в декабре (+35.6 см). Межгодовые изменения размаха сезонных колебаний уровня происходят практически синхронно на всех станциях восточного побережья Финского залива.

В Вислинском заливе максимальный размах сезонных колебаний уровня наблюдался в период с 1977 по 1985 гг. достигая 41 см (рис. 7). На открытом побережье моря, в Пионерском, максимальный размах уровня моря составил 42 см. На станции Открытое максимальный размах сезонных колебаний уровня наблюдался в 1988–1989 гг., 32 см. Размах сезонных колебаний уровня на всех станциях российской части юго-восточного побережья Балтийского моря существенно меняется от года к году. Так, в отдельные годы, размах сезонных колебаний составлял 10–11 см в Пионерском и Краснофлотском в 1995–1997 гг. В целом для всех пяти рассматриваемых станций характерны тенденции уменьшения размаха сезонных колебаний со скоростью от –0.36 см/год для Балтийска и –0.42 см/год для Открытого до –0.53–0.55 см/год для станций Калининград, Краснофлотское и Пионерский

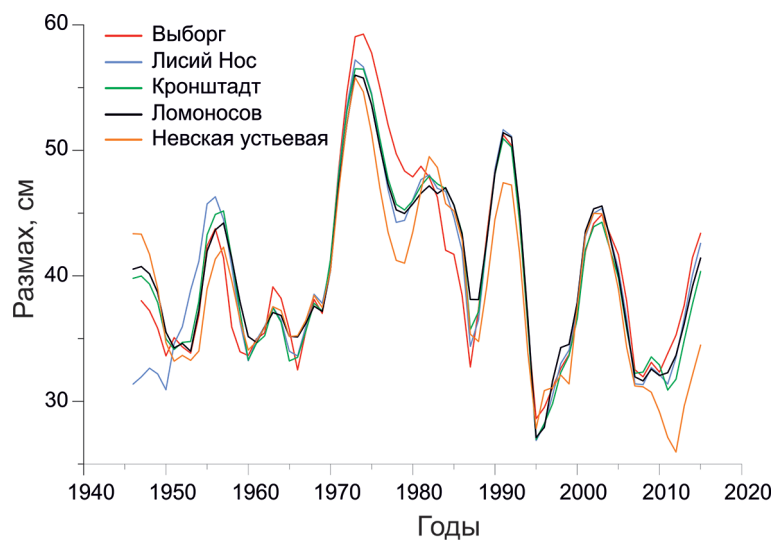


Рис. 6. Изменения размаха сезонных колебаний уровня моря на станциях Выборг, Лисий нос, Кронштадт, Ломоносов, Невская устьевая.

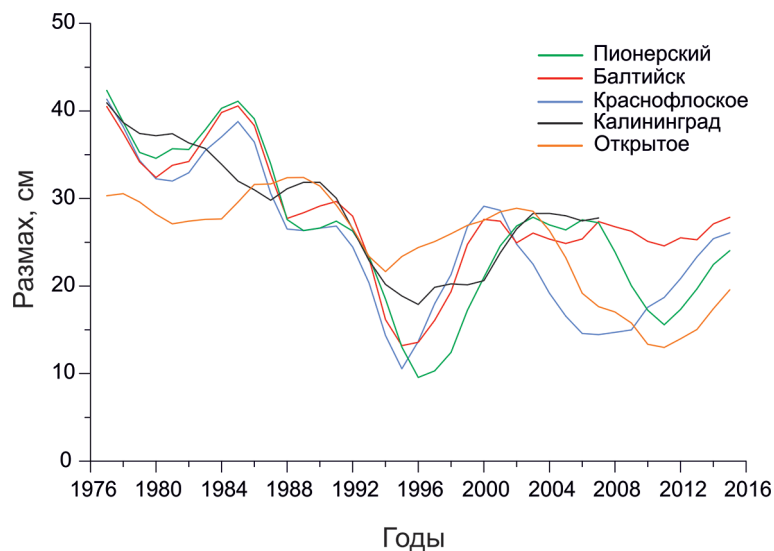


Рис. 7. Изменения размаха сезонных колебаний уровня моря на станциях Пионерский, Балтийск, Краснофлотское, Калининград, Открытое.

(рис. 7). На станциях, расположенных в Финском заливе, размах сезонных колебаний уровня моря в этот период наблюдений уменьшался со скоростью около  $-0.42$  см/год (рис. 6).

### Обсуждение

В период с 1990 по 2005 гг. на станциях в юго-восточной части Балтийского моря произошло существенное смещение годового цикла: в сентябре–октябре наблюдались вторичные годовые минимумы сезонного хода уровня моря, а основной максимум достигался в феврале. В Финском заливе (рис. 3) в этот период также произошло смещение максимума годового цикла на несколько месяцев с октября–декабря к январю–февралю. Схожее смещение момента наступления максимума

сезонного хода уровня моря после 1990-х по данным станций в Ботническом заливе и в центральной Балтике было обнаружено в работе (Barbosa and Donner, 2016). Эти особенности годовых колебаний уровня должны были формироваться под влиянием крупномасштабных факторов, воздействующих на акваторию всего Балтийского моря, например, изменений ветра и атмосферного давления.

В предыдущем разделе было отмечено, что на диаграммах для Куршского залива (рис. 4б) в апреле наблюдался локальный максимум сезонного хода уровня, который отсутствовал в Вислинском заливе. Вероятно, этот локальный максимум формируется под влиянием стока р. Неман в акваторию Куршского залива. Его максимальный объем наблюдается как раз в апреле и вызван половодьем (Dailidienė, Davulienė, 2008). Годовой объем стока р. Неман в акваторию Куршского залива составляет в среднем  $22.2 \text{ км}^3$ , что в три раза больше, чем объем всего Куршского залива (Dailidienė et al., 2011). В работе (Dailidienė et al., 2006) был рассчитан средний сезонный ход уровня моря для береговых станций Ниды и Клайпеды для двух периодов наблюдений: 1961–1981 гг. и 1982–2002 гг. Локальный вторичный максимум сезонного хода в апреле наблюдался для обеих станций для первого периода наблюдений и практически отсутствовал для второго. Причем в (Dailidienė et al., 2006) было показано, что изменился общий характер сезонного хода уровня моря на литовском побережье Балтики. Так, для Ниды, располагающейся внутри Куршского залива, максимальный уровень в сезонном ходе в период 1961–1981 гг. был достигнут в ноябре–декабре, а в период 1982–2002 гг. – в январе–феврале, что хорошо согласуется с результатами, представленными в настоящем исследовании. В (Dailidienė et al., 2006) было высказано предположение, что подобные изменения сезонного хода уровня моря в Куршском заливе могут быть вызваны уменьшением общего стока р. Неман в акваторию залива (Dailidienė, Davulienė, 2008), а также изменениями климата, приводящим к более теплым и коротким зимним сезонам, и увеличению среднего уровня Балтийского моря. В работе (Stonevičius et al., 2014) также было показано, что межгодовые изменения объема стока р. Неман имеют сложный характер. В последние десятилетия наблюдается уменьшение среднегодового объема стока р. Неман, которое вызвано уменьшением стока в период половодья, которое наблюдается преимущественно в апреле. В январе–марте сток р. Неман в последние десятилетия, напротив, увеличился. Видимо, эти особенности климатических изменений стока также повлияли на изменения сезонного хода уровня моря в Куршском заливе, который отображен на рис. 4б.

Похожая ситуация наблюдается и для Вислинского залива (см. Навроцкая, Чубаренко, 2017). Средний уровень воды в р. Преголя (Калининградский залив) повышается со скоростью  $6.4 \text{ мм/год}$ , причем скорость повышения уровня в зимний сезон в два раза больше, чем в остальные сезоны года:  $10.7 \text{ мм/год}$  и  $4.8\text{--}5.0 \text{ мм/год}$ , что объясняется участвовавшими случаями теплых и влажных зим в регионе (Навроцкая, Чубаренко, 2017).

Максимальные значения сезонного хода уровня моря в восточной части Финского залива наблюдается обычно в ноябре–декабре. Вероятность возникновения

экстремальных штормовых нагонов из-за интенсификации циклонической активности в атмосфере также возрастает в осенне-зимний период. Как известно, наводнениями в Невской губе принято считать подъемы уровня моря выше 160 см над нулем Кронштадтского футштока (0 КФ). Таким образом, экстремальные сезонные колебания уровня моря, размах которых в отдельные годы превышает 50 см, могут стать дополнительным фактором, увеличивающим высоту наводнений в вершине Финского залива во время сильных штормовых нагонов.

### Заключение

В настоящем исследовании были представлены результаты применения процедуры сезонной коррекции X-12-ARIMA к среднемесячным рядам наблюдений за изменениями уровня моря. В результате анализа удалось выделить из исходной записи сезонные колебания уровня моря, исследовать их межгодовую изменчивость и оценить их средние и максимальные величины во второй половине XX – начале XXI вв. В ходе исследования было показано, что амплитуда сезонных колебаний уровня моря и месяцы наступления сезонных максимумов и минимумов существенно изменяются от года к году. Средняя многолетняя высота ( $2\sigma$ ) сезонных колебаний уровня моря в восточной части Финского залива составляет 25–28 см, а на юго-восточном побережье Балтийского моря – 16–19 см. Максимальная величина сезонных колебаний  $R_{max}$  в восточной части Финского залива может достигать 56–59 см, а в акватории Калининградской области – до 42 см.

В настоящем исследовании было показано, что в период с 1990 по 2005 гг. на станциях в юго-восточной части Балтийского моря и в восточной части Финского залива произошло существенное смещение годового цикла на несколько месяцев с октября–декабря к январю–февралю. В рамках настоящего исследования мы ограничились лишь анализом данных об изменениях уровня моря. Для выявления причин, приведших к модификации сезонного цикла уровня моря, требуется анализ основных формирующих факторов, таких как изменение полей ветра и атмосферного давления, стока рек, осадков и температуры воды и воздуха, что планируется сделать в будущих исследованиях.

Результаты настоящего исследования продемонстрировали универсальность процедуры сезонной коррекции X-12-ARIMA, которая позволяет анализировать не только экономические характеристики, но и океанологические временные ряды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0015) и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-35-60071.



## Литература

- Медведев И.П.* Сезонные колебания уровня Балтийского моря // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 42–54.
- Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В.* О повышении среднегодовых и сезонных значений уровня воды в устьевой части реки Преголи (Балтийское море) по данным 1996–2015 гг. // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149. № 2. С. 16–30.
- Andersson H.C.* Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the Baltic sea level // *Tellus*. 2002. Vol. 54A. P. 76–88.
- Barbosa S.M., Donner R.V.* Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level // *Tellus*. 2016. Vol. 68. No. 1. P. 30540.
- Cheng Y., Xu Q., Li X.* Spatio-Temporal Variability of Annual Sea Level Cycle in the Baltic Sea // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. No. 528. DOI:10.3390/rs10040528.
- Colella S., Falcini F., Rinaldi E., Sammartino M., Santoleri R.* Mediterranean ocean colour chlorophyll trends // *PloS one*. 2016. Vol. 11. No. 6. e0155756. DOI:10.1371/journal.pone.0155756.
- Dagum E.B.* The X-11-ARIMA seasonal adjustment method. Statistics Canada, Seasonal Adjustment and Time Series Staff. 1980.
- Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S.* Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the South and East Baltic // *Oceanologia*. 2011. No. 53(1–TI). P. 293–308.
- Dailidienė I., Davulienė L.* Salinity trend and variation in the Baltic Sea near the Lithuanian coast and in the Curonian Lagoon in 1984–2005 // *Journal of Marine Systems*. 2008. Vol. 74. P. 20–29.
- Dailidienė I., Davulienė L., Tilickis B., Stankevičius A., Myrberg K.* Sea level variability at the Lithuanian coast of the Baltic Sea // *Boreal Environment Research*. 2006. Vol. 11. No. 2. P. 109–121.
- Dangendorf S., Wahl T., Mudersbach C., Jensen J.* The seasonal mean sea level cycle in the southeastern North Sea // *Journal of Coastal Research*. 2013. Vol. 65(SP2). P. 1915–1920.
- Ekman M.* Secular Change of the Seasonal Sea Level Variation in the Baltic Sea and Secular Change of the Winter Climate // *Geophysica*. 1998. Vol. 34. No. 3. P. 131–140.
- Ekman M., Stigebrandt A.* Secular change of the seasonal variation in sea level and of the pole tide in the Baltic Sea // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95(C4). P. 5379–5383.
- Findley D.F., Monsell B.C., Bell W.R., Otto M.C., Chen B.C.* New capabilities and methods of the X-12-ARIMA seasonal-adjustment program // *Journal of Business & Economic Statistics*. 1998. Vol. 16. No. 2. P. 127–152.
- Hünicke B., Zorita E.* Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle // *Tellus*. 2008. Vol. 60A. P. 154–164. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x.
- Pezzulli S., Stephenson D.B., Hannachi A.* The variability of seasonality // *Journal of Climate*. 2005. Vol. 18. No. 1. P. 71–88.
- Plag H.P., Tsimplis M.N.* Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability // *Global and Planetary Change*. 1999. Vol. 20. No. 2–3. P. 173–203.
- Stonevičius E., Valiuškevičius G., Rimkus E., Kažys J.* Climate induced changes of Lithuanian rivers runoff in 1960–2009 // *Water resources*. 2014. Vol. 41. No. 5. P. 592–603.

**INTERANNUAL VARIATIONS OF SEASONAL SEA LEVEL  
OSCILLATIONS ON THE RUSSIAN  
COAST OF THE BALTIC SEA**

**Medvedev I.P.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [patamates@gmail.com](mailto:patamates@gmail.com)  
Fedorov Institute of Applied Geophysics, 9 Rostokinskaya Street, Moscow, 129128, Russia  
Submitted 07.06.2018, accepted 10.10.2018*

Seasonal oscillations, expressed by the annual and semi-annual components, is one of the main types of long-period sea level variability of the World Ocean. Seasonal sea level oscillations of the Baltic Sea have significant interannual variations. In this study, the features of changes in seasonal sea level oscillations in the Baltic Sea during the XX-XXI centuries were studied on the basis of long-term coastal observations. To distinguish seasonal sea level oscillations in the Baltic Sea, the present study used the seasonal correction procedure X-12-ARIMA. The results of this study have shown that the amplitude and the moment of the maximum in the seasonal sea level significantly vary from year to year. In the period from 1990 to 2005, there was a significant shift in the maximum of the annual cycle for several months from October-December to January-February, which was noted also from the data of the coast of the southeastern part of the Baltic Sea and in the Gulf of Finland. These features of annual sea level oscillations are formed under the influence of large-scale factors affecting the entire Baltic Sea, for example, changes in wind and atmospheric pressure. The series of seasonal sea level oscillations to estimate their average and maximum amplitudes during the second half of the XX–XXI centuries. The average long-term height ( $2\sigma$ ) of seasonal sea level variations in the eastern part of the Gulf of Finland is 25–27 cm. The maximum range of seasonal sea level variations in this sea area can reach 56–59 cm.

**Keywords:** Baltic Sea, seasonal oscillations, sea level, X-12-ARIMA

**References**

- Andersson H.C.* Influence of long-term regional and large-scale atmospheric circulation on the Baltic sea level. *Tellus*, 2002, Vol. 54A, pp. 76–88.
- Barbosa S.M. and Donner R.V.* Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level. *Tellus*, 2016, Vol. 68, No. 1, pp. 30540.
- Cheng Y., Xu Q., and Li X.* Spatio-Temporal Variability of Annual Sea Level Cycle in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, No. 528, doi:10.3390/rs10040528.
- Colella S., Falcini F., Rinaldi E., Sammartino M., and Santoleri R.* Mediterranean ocean colour chlorophyll trends. *PloS one*, 2016, Vol. 11, No. 6, e0155756. DOI:10.1371/journal.pone.0155756.
- Dagum E.B.* The X-11-ARIMA seasonal adjustment method. Statistics Canada, Seasonal Adjustment and Time Series Staff, 1980.
- Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., and Navrotskaya S.* Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the South and East Baltic. *Oceanologia*, 2011, No. 53(1–II), pp. 293–308.

- Dailidienė I. and Davulienė L.* Salinity trend and variation in the Baltic Sea near the Lithuanian coast and in the Curonian Lagoon in 1984–2005. *Journal of Marine Systems*, 2008, Vol. 74, pp. S20–S29.
- Dailidienė I., Davulienė L., Tilickis B., Stankevičius A., and Myrberg K.* Sea level variability at the Lithuanian coast of the Baltic Sea. *Boreal Environment Research*, 2006, Vol. 11, No. 2, pp. 109–121.
- Dangendorf S., Wahl T., Mudersbach C., and Jensen J.* The seasonal mean sea level cycle in the southeastern North Sea. *Journal of Coastal Research*, 2013, Vol. 65(SP2), pp. 1915–1920.
- Ekman M.* Secular Change of the Seasonal Sea Level Variation in the Baltic Sea and Secular Change of the Winter Climate. *Geophysica*, 1998, Vol. 34, No. 3, pp. 131–140.
- Ekman M. and Stigebrandt A.* Secular change of the seasonal variation in sea level and of the pole tide in the Baltic Sea. *J. Geophys. Res.*, 1990, Vol. 95(C4), pp. 5379–5383.
- Findley D.F., Monsell B.C., Bell W.R., Otto M.C., and Chen B.C.* New capabilities and methods of the X-12-ARIMA seasonal-adjustment program. *Journal of Business & Economic Statistics*, 1998, Vol. 16, No. 2, pp. 127–152.
- Hünicke B. and Zorita E.* Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle. *Tellus*, 2008, Vol. 60A, pp. 154–164, doi: 10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x.
- Medvedev I.P.* Seasonal fluctuations of the Baltic sea level. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, Vol. 39, No. 12, pp. 814–822.
- Navrotskaya S.E. and Chubarenko B.V.* On the increase of the annual and seasonal values of water level in the mouth of the Pregolya River (the Baltic Sea) in 1996–2015. *Izvestiya RGO*, 2010, Vol. 142, No. 2, pp. 16–30.
- Pezzulli S., Stephenson D.B., and Hannachi A.* The variability of seasonality. *Journal of Climate*, 2005, Vol. 18, No. 1, pp. 71–88.
- Plag H.P. and Tsimplis M.N.* Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability. *Global and Planetary Change*, 1999, Vol. 20, No. 2–3, pp. 173–203.
- Stonevičius E., Valiuškevičius G., Rimkus E., and Kažys J.* Climate induced changes of Lithuanian rivers runoff in 1960–2009. *Water resources*, 2014, Vol. 41, No. 5, pp. 592–603.