УДК 556 Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2021. Т. 66. Вып. 4

Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря

Е. А. Захарчук[1,2], В. Н. Сухачев[2], Н. А. Тихонова[1,2]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
[2] Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет,
Российская Федерация, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6

Для цитирования: Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2021). Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле,* 66 (4), 781–805. https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.408

На основе мареографных измерений уровня моря, инструментальных наблюдений за ветром и атмосферным давлением, а также данных реанализа метеорологических полей исследованы характеристики штормовых нагонов в разных районах Финского залива во второй половине XX и начале XXI веков. Предложен критерий выделения штормовых нагонов, учитывающий пространственные изменения их интенсивности. Результаты свидетельствуют об изменении количества штормовых нагонов в Финском заливе в зависимости от года и местоположения станции в широких пределах: от 0–1 до 16–52 случаев в год. Средняя продолжительность штормовых нагонов варьируется от 6.7 до 9.0 часов, а максимальная достигает 26–96 часов. Показано, что в последние десятилетия в большинстве районов отмечается тенденция уменьшения количества штормовых нагонов, их дисперсии и максимумов уровня моря. Приведены распределения вероятностей ветра и атмосферного давления во время штормовых нагонов, показывающие, что во время штормовых нагонов наибольшей вероятностью обладают ветры, дующие с запада и юго-запада со скоростями 4–13 м/с. У северного побережья и в вершине залива наиболее вероятные значения атмосферного давления во время штормовых нагонов равны 995 гПа. На южном побережье Финского залива наибольшую вероятность имеют значения атмосферного давления в 1005–1015 гПа. Полученные результаты свидетельствуют о том, что атмосферное давление над Финским заливом во время штормовых нагонов не является очень низким. Это связано с тем, что траектории движения центров циклонов, вызывающих штормовые нагоны, проходят севернее Финского залива. Анализ метеорологической информации показал также наличие значимых отрицательных трендов в межгодовых изменениях дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления, средних значений и максимумов скорости ветра. Делается вывод, что выявленные изменения характеристик штормовых нагонов связаны с уменьшением интенсивности циклогенеза в атмосфере над Балтийским морем в последние десятилетия.

Ключевые слова: Балтийское море, штормовые нагоны, колебания уровня, наводнения, статистический анализ, межгодовая изменчивость, атмосферный циклогенез.

1. Введение

Штормовые нагоны уровня моря относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям, в силу того, что в ряде случаев они приводят к наводнениям, иногда катастрофического характера. В Финском заливе наибольший ущерб от

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2021

опасных подъемов уровня, вызванных штормовыми нагонами, испытывает его восточная часть. Несмотря на ввод в эксплуатацию комплекса защитных сооружений (КЗС) от наводнений в Санкт-Петербурге в 2011 г., проблема опасных подъемов уровня остается насущной для районов Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных к западу от КЗС. Здесь во время штормовых нагонов подвергаются подтоплению прибрежные территории, размываются береговая линия, пляжи Курортного района Санкт-Петербурга, участки шоссейных дорог, наносится ущерб объектам хозяйственной деятельности, построенным в береговой полосе.

Термин «штормовой нагон» в научной литературе имеет разные определения. Например, К. Боуден (1988) определяет штормовой нагон как вызываемое метеорологическими причинами возмущение уровня моря относительно поверхности, искривленной приливом. В Международном гидрологическом словаре (WMO, 2012) штормовой нагон — это повышение уровня моря, вызванное прохождением центра низкого атмосферного давления. Дж. Гённерт и др. (Gönnert et al., 2001) рассматривают штормовой нагон как колебания уровня воды в прибрежной зоне, продолжающиеся от нескольких минут до нескольких дней и возникающие в результате воздействия систем атмосферного давления на морскую поверхность. Д. Пью и П. Вудворт (Pugh and Woodworth, 2014) понимают под этим явлением подъемы уровня, которые вызваны сильными ветрами и низким давлением воздуха, возникающими во время штормов.

В морском энциклопедическом справочнике штормовой нагон определяется как подъем уровня моря у побережья в результате действия сильного ветра и статического эффекта атмосферного давления при прохождении циклона и, далее, уточняется, что в зависимости от конфигурации береговой черты, преобладающих глубин в прибрежной зоне и фазы астрономического прилива общий подъем уровня при штормовом нагоне может достигать 7 м и более, что приводит к катастрофическим наводнениям на побережье (Исанин, 1986).

Перечисленные определения не в полной мере учитывают многофакторность штормового нагона. Название этого опасного природного явления указывает, что процесс значительного подъема уровня моря происходит во время шторма. Однако продолжительность одного шторма в северной Балтике колеблется от 3.5 до 9 часов, а в южной — от 3 до 10 часов (Терзиев и др., 1992), в то время как, например, продолжительность штормовых нагонов у побережий Германии и Польши варьирует от 11 до 117 часов (Sztobryn et al., 2005). Такие расхождения в продолжительности штормов и штормовых нагонов объясняются тем, что под действием касательного трения ветра в движущемся над морем глубоком циклоне возбуждаются не только интенсивные ветровые течения, которые при нагонном направлении ветра переносят к берегу значительные массы воды и совместно со статическим эффектом атмосферного давления приводят к значительному подъему уровня в прибрежной зоне. Анемобарические силы в циклоне возбуждают также длинные волны, на гребень которых накладывается ветровой нагон уровня моря (Лабзовский, 1971; Аверкиев и Клеванный, 2007; Захарчук и Тихонова, 2011; Захарчук и др., 2020). В период формирования штормовых нагонов длинные волны распространяются с запада на восток Финского залива со скоростями от 4.5 до 11.2 м/с и имеют периоды от 25 до 41 часа (Захарчук и Тихонова, 2011; За-

харчук и др., 2020). В работе Захарчука и Тихоновой (2011) было показано, что не всегда длинные волны, вызывающие наводнения на востоке Финского залива, имели характеристики свободных баротропных гравитационных волн; в ряде случаев они идентифицировались как топографические волны. Результаты численных экспериментов на трехмерной гидродинамической модели Балтийского моря показывают, что из-за значительной замкнутости моря и вращения Земли длинные волны, вызывающие особо опасные подъемы уровня моря в Рижском и Финском заливах, во время штормовых нагонов трансформируются в прогрессивно-стоячие волны, имеющие выраженную амфидромическую систему с узлом в районе Готландской впадины и пучности на востоке Финского залива, в Рижском заливе и на юго-западе Балтики (Захарчук и др., 2020). В Финском заливе, согласно численным экспериментам, преобладает поступательное волновое движение водных масс во время штормового нагона (Захарчук и др., 2020). Продвигаясь к вершине Финского залива, длинная волна постоянно увеличивается в высоте вследствие уменьшения площади поперечных сечений залива. Лабораторные опыты М. С. Грушевского (1954) показали, что свободная волна, распространяющаяся вдоль Финского залива, увеличивает свою высоту в Невской губе в 3–3.5 раза. Численные эксперименты на гидродинамической модели свидетельствуют о том, что длинная волна при отсутствии возмущающих сил, распространяясь по Финскому заливу, увеличивает свою высоту всего на 40–50 % (Аверкиев и Клеванный, 2007). Еще одним важным фактором, влияющим на опасные подъемы уровня в Финском заливе во время штормовых нагонов, является резонанс между анемобарическими силами в атмосферном циклоне и собственными колебаниями Балтийского моря (Лабзовский, 1971; Куликов и Медведев, 2013). Согласно теоретическим исследованиям, любой морской бассейн характеризуется набором собственных частот баротропных и бароклинных колебаний, которые делятся на два основных класса (Haines et al., 1991). Собственные колебания 1-го класса — длинные гравитационные волны, являющиеся продольными волновыми движениями. Собственные колебания 2-го класса — градиентно-вихревые волны, наиболее известными и изученными представителями которых являются волны Россби и топографические волны (Haines et al., 1991). Это преимущественно горизонтально-поперечные волновые движения, которые генерируются только на частотах, лежащих ниже инерционной частоты (Pedlosky, 1979).

При совпадении скорости движения атмосферных циклонов с фазовой скоростью свободных волн, генерирующихся на частотах собственных колебаний Балтийского моря, происходит явление резонанса, что приводит к особенно сильному увеличению высоты длинной волны и связанному с ней подъему уровня. По оценкам Н. А. Лабзовского (1971), явление резонанса в Финском заливе возможно при скоростях атмосферных циклонов 15–21 м/с. По результатам численного гидродинамического моделирования экстремальные подъемы уровня в восточной части Финского залива формируются при меньших скоростях движения циклонов — 12–15 м/с (Аверкиев и Клеванный, 2007).

Результаты численных экспериментов на гидродинамической модели показывают, что основная сила, возбуждающая опасные подъемы уровня на востоке Финского залива во время штормовых нагонов, — сила тангенциального напряжения ветра, вклад которой составляет 69 %. Влияние силы горизонтального градиента

атмосферного давления и его статического эффекта не превышает соответственно 15 и 16 % (Аверкиев и Клеванный, 2007).

Таким образом, процесс формирования штормового нагона связан с совместным влиянием нескольких факторов, вклады которых в суммарный подъем уровня моря во время штормового нагона могут различаться в каждом конкретном случае.

В данной статье мы будем понимать под штормовыми нагонами значительные подъемы уровня моря в прибрежной зоне, вызываемые суммарным действием сил касательного трения ветра, градиента атмосферного давления и его статического эффекта в глубоком циклоне и длинной волны, которая генерируется под прямым воздействием анемобарических сил или же в результате резонанса этих сил с собственными колебаниями морского бассейна.

Применительно к Балтийскому морю для оценки штормовых нагонов использовались разные критерии. Для побережий Германии штормовым нагоном обычно считается увеличение уровня моря как минимум на 100 см выше среднего (Wolski et al., 2014). Польская гидрометеорологическая служба относит к этому явлению подъемы уровня, превышающие 70 см относительно среднего уровня моря (Majewski et al., 1983). В Северо-Западном управлении гидрометеорологической службы России для района восточной части Финского залива в зависимости от года и места наблюдений за уровнем моря использовался очень широкий диапазон его значений (от 50 до 135 см), выше которых подъем уровня считался штормовым нагоном (Туранов, 1976). Применение таких критериев для выделения штормовых нагонов в Балтийском море является недостаточно представительным, так как дисперсия колебаний уровня в Балтийском море в зависимости от района меняется в несколько раз. Если, например, в Стокгольме превышение уровня в 70 см — очень редкое экстраординарное событие, происходящее один раз за много лет, то для восточной части Финского залива такие превышения уровня моря — частые события, которые случаются при отсутствии штормовых условий.

Межгодовые изменения количества штормовых нагонов в различных районах Балтийского моря (в том числе в Финском заливе) оценивались в работе Т. Вольски и др. (Wolski et al., 2014) за период 1960–2010 гг. по критерию ≥ 70 см относительно европейской системы вертикальных отсчетов (EVRS). Результаты показали наличие, практически во всех случаях, положительных линейных трендов в межгодовых изменениях количества штормовых нагонов, свидетельствующих о том, что на различных побережьях Балтийского моря в рассматриваемый автором 50-летний период их число неуклонно растет.

В работе М. Йоханссон и др. (Johansson et al., 2001) оценивались тренды рассчитанных за каждый год среднеквадратических отклонений и максимумов уровня моря на 13 станциях побережья Финляндии по рядам значений уровня с интервалом в 4 часа. Наибольшая продолжительность рядов уровня на этих станциях составила 111 лет (с 1888 по 1999 г.). Результаты показали, что в Финском заливе на станциях Ханко и Хамина в прошлом веке наблюдались значимые положительные линейные тренды в изменениях стандартных отклонений и максимумов колебаний уровня моря. 15-летнее скользящее среднее рядов этих характеристик показало, что наибольшее их увеличение отмечалось в 1960–1970-х гг. прошлого века, а затем наметилась тенденция к уменьшению значений стандартных отклонений и максимумов колебаний уровня моря.

Дж. Тылковский и М. Хойан (Tylkowski and Hojan, 2018) с помощью квантильного анализа исследовали межгодовые изменения экстремальных событий в гидрометеорологических процессах у польского побережья Балтики, в том числе и в колебаниях уровня моря. Их результаты показали, что в период с 1965 по 2014 г. наблюдается значимый положительный тренд в изменениях количества дней с экстремальными подъемами уровня моря.

Цель данной работы — оценить различные характеристики штормовых нагонов в разных районах Финского залива, описать их межгодовые изменения в конце XX и начале XXI вв. и сравнить полученные результаты с изменениями метеорологических характеристик.

2. Данные и методы

Для выделения штормовых нагонов и оценки их характеристик анализировались ряды ежечасных мареографных измерений уровня моря на девяти станциях Финского залива: Ханко, Хельсинки, Хамина, Выборг, Кронштадт, Гогланд, Шепелево, Силламяэ, Таллин (рис. 1).

Данные для трех финских (Ханко, Хельсинки, Хамина) и двух эстонских (Таллин и Силламяэ) станций были получены с ресурса Copernicus Marine Service (marine.copernicus.eu, n. d.), а данные измерений уровня с четырех российских станций (Выборг, Кронштадт, Шепелёво, Гогланд) были предоставлены авторам статьи Северо-Западным управлением Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС Росгидромета) (meteo.nw.ru, n. d.).

В табл. 1 дано описание данных мареографных измерений уровня моря. Наибольшая длина используемых рядов ежечасных значений уровня составляет 48 лет, а наименьшая — 9 лет. Количество пропусков в рядах варьирует от 0.09 до 5.47 %.

В табл. 2 приведены некоторые статистические характеристики рядов уровня моря. Можно видеть, что в зависимости от района статистические характеристики колебаний уровня в Финском заливе заметно меняются. Наибольшая дисперсия колебаний уровня отмечается в Кронштадте, и она почти в два раза больше дисперсии колебаний уровня в Ханко. Также в Кронштадте наблюдаются наибольшие значения максимумов уровня моря, которые почти в два раза больше значений максимумов уровня в Таллине и Ханко. По сравнению с максимумами, разброс значений минимумов уровня моря меньше (в 1.6 раза). Наибольшие значения минимумов отмечаются в Выборге, Кронштадте и Шепелёво, а наименьшие — на западе залива в пункте Ханко (табл. 2).

Учитывая заметные изменения в пространстве статистических характеристик колебаний уровня в Финском заливе, мы предлагаем в данной статье для выбора критерия выделения случаев штормовых нагонов использовать среднеквадратическое отклонение уровня (σ). Будем принимать за случаи штормовых нагонов подъемы уровня моря, превышающие значение 3σ, а за продолжительность штормовых нагонов (T_{ss}) — период в часах, когда значения уровня превышали 3σ. При этом, если минимум между двумя соседними максимумами уровня, превышающими 3σ, лежит выше значения 3σ, то эти максимумы будем относить к одному штормовому нагону, а если ниже, — к разным. Значение уровня 3σ

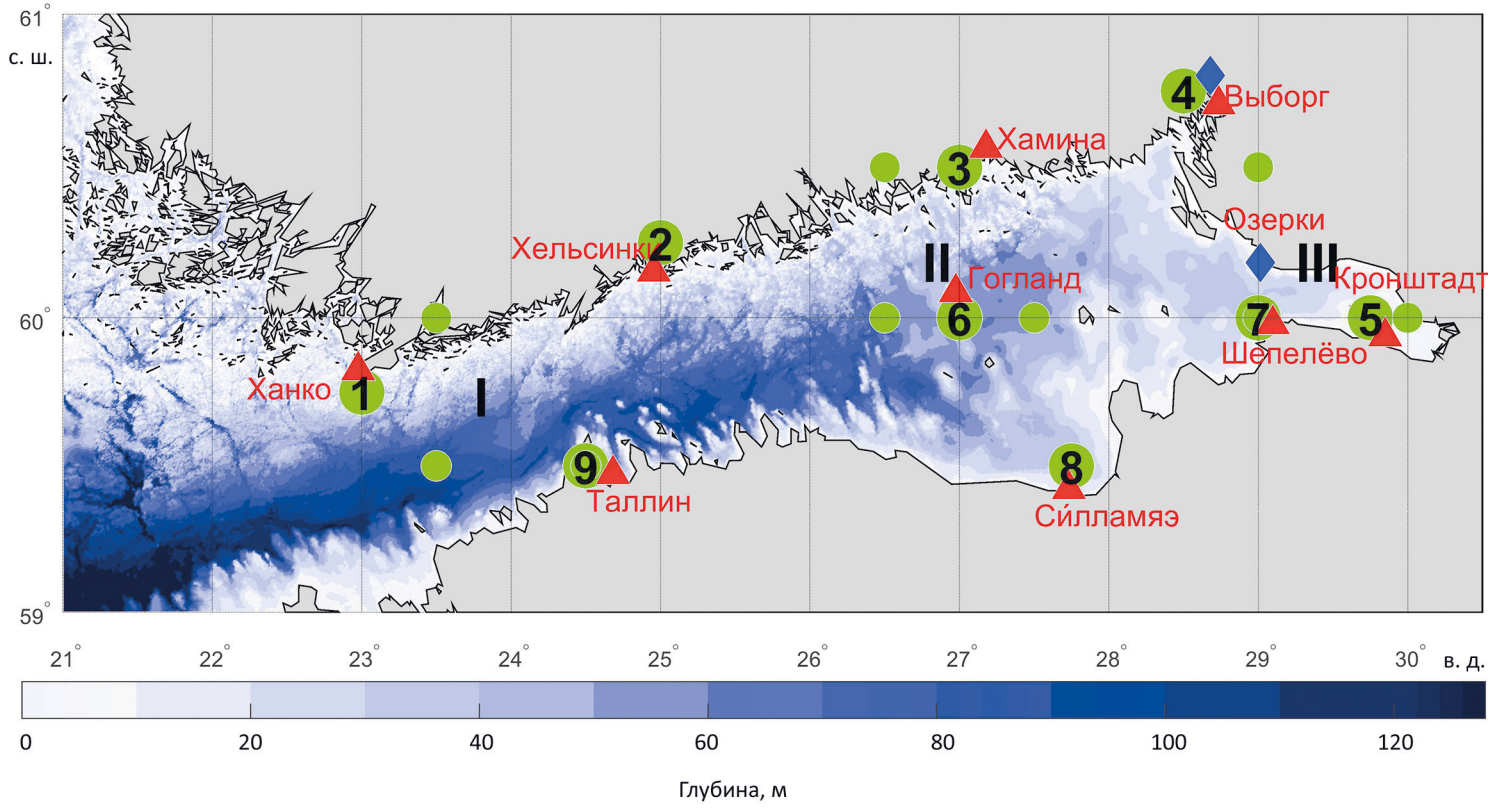

Рис. 1. Батиметрия Финского залива и местоположение станций мареографных измерений уровня моря (красные треугольники), инструментальных измерений ветра (синие ромбы), а также точек сеточной области реанализа ERA5 (зеленые кружки)

1–9 — ближайшие к мареографным стациям точки реанализа ERA5, которые использовались для оценок ветра и атмосферного давления. I, II, III — районы, где по данным реанализа ERA5 оценивалась интенсивность циклогенеза. Данные батиметрии взяты из (Baltic Sea Hydrographic Commission, 2013).

Таблица 1. **Описание рядов мареографных измерений уровня моря в Финском заливе**

Станция	Период, годы	Координаты		Интервал измерений	Число измерений	Количество пропусков, %
		в. д., град.	с. ш., град.			
Ханко	1971–2018	22.98	59.82	1 час	420 768	0.09
Хельсинки	1971–2018	24.96	60.15	1 час	420 768	0.09
Хамина	1971–2018	27.20	60.56	1 час	420 768	0.09
Выборг	1977–2018	28.73	60.70	1 час	368 160	0.64
Кронштадт	1971–2018	29.77	60.00	1 час	420 768	0.01
Шепелёво	1989–2018	29.15	59.99	1 час	298 032	2.30
Гогланд	1977–1989	27.00	60.07	1 час	113 952	0.48
Таллин	2006–2018	24.76	59.44	1 час	113 952	5.47
Силламяэ	2007–2015	27.74	59.47	1 час	78 888	4.01

Примечание: Данные для Ханко, Хельсинки, Хамина, Таллина, Силламяэ получены по Copernicus Marine Service (marine.copernicus.eu, n. d.), данные для Выборга, Кронштадта, Шепелёво, Гогланда — от СЗ УГМС Росгидромета (meteo.nw.ru, n. d.).

Таблица 2. **Статистические характеристики рядов уровня моря**

Станция	Период, годы	D, см^2	σ, см	ζ_{max}	ζ_{min}
Ханко	1971–2018	512	23	130	–79
Хельсинки	1971–2018	599	24	150	–93
Хамина	1971–2018	752	27	194	–116
Выборг	1977–2018	853	29	202	–128
Кронштадт	1971–2018	907	30	238	–126
Шепелёво	1989–2018	809	28	215	–128
Гогланд	1977–1989	820	29	162	–95
Силламяэ	2007–2015	641	25	163	–102
Таллин	2006–2018	584	24	120	–96

Примечание: D — дисперсия, σ — среднее квадратичное отклонение, ζ_{max} и ζ_{min} — максимальный и минимальный уровни моря соответственно.

близко к критериям выделения штормовых нагонов (80–100 см), принятым на некоторых морских станциях Росгидромета (Горный институт, Невская Устьевая, Лисий Нос, Озерки), расположенных в восточной части Финского залива (Туранов, 1976). Однако оценка уровня моря 3σ значительно больше критерия выделения штормовых нагонов на других станциях Росгидромета в Финском заливе (50 см), таких как Усть-Луга, Мощный, Гогланд, Приморск (Туранов, 1976). На

наш взгляд, подъемы уровня в 50 см нельзя относить к штормовому нагону, так как в восточной части Финского залива такие возвышения уровня происходят довольно часто при слабых и умеренных ветрах. Поэтому критерий $> 3\sigma$ является более представительным для определения подъемов уровня в штормовых условиях. Следует заметить также, что при подъемах уровня больше 3σ в Санкт-Петербурге начинают формироваться неблагоприятные условия для судоходства под городскими мостами (Макринова, 1954).

Случаи сильных штормовых нагонов выделялись при подъемах уровня, превышающих 5σ. При таких значениях на востоке Финского залива происходят опасные подъемы уровня моря, приводящие к наводнениям, во время которых подтапливаются прибрежные территории, размываются береговая линия, пляжи Курортного района Санкт-Петербурга, участки шоссейных дорог, наносится ущерб объектам хозяйственной деятельности, построенным в береговой полосе. Оценка $> 5\sigma$ близка к принятому критерию выделения наводнений в Санкт-Петербурге (больше 160 см, относительно нуля Кронштадского футштока).

Исследование межгодовых изменений интенсивности штормовых нагонов производилось путем оценок дисперсии превышений уровня (D) и максимальных за год значений уровня моря $\zeta_{\max}$. Для оценок D из исходных рядов ежечасных значений уровня моря исключались колебания с периодами в пять и более суток. Фильтрация колебаний проводилась с помощью быстрого преобразования Фурье. По значениям уровня моря был получен ряд коэффициентов Фурье на соответствующих периодах (частотах). Коэффициенты на периодах пяти и более суток обнулялись. Затем с помощью обратного преобразования Фурье по коэффициентам восстанавливался ряд с уже отфильтрованными колебаниями заданных периодов. Для длинных рядов такая фильтрация имеет более четкий срез на частотах и более качественную фильтрацию, чем, например, фильтр Баттерворта.

В полученных остаточных рядах производилась выборка только положительных значений уровня, которая подвергалась затем дисперсионному анализу с представлением результатов за каждый год.

Для исследования особенностей пространственно-временных изменений метеорологических характеристик в периоды штормовых нагонов использовались срочные (четыре раза в сутки) данные инструментальных измерений ветра на гидрометеорологических станциях (ГМС) Выборг (с 1966 по 2017 г.), Озерки (с 1977 по 2018 г.) и атмосферного давления на станции Кронштадт, которые были предоставлены авторам СЗ УГМС Росгидромета (meteo.nw.ru, n. d.), а также данные характеристик ветра и атмосферного давления из реанализа ERA (Hersbach et al., 2020). Выборка данных с ресурса ERA5 (cds.climate.copernicus.eu, n. d.) производилась с временным интервалом 1 час и пространственным разрешением $0.25 \times 0.25°$.

Данные атмосферного давления реанализа ERA5 сравнивались с измерениями атмосферного давления на десяти прибрежных станциях шведского побережья Балтийского моря, полученными с ресурса Шведского института метеорологии и гидрологии (smhi.se, n. d.) и на одной станции восточной части Финского залива (Кронштадт). Сравнение показало очень хорошее согласие: величины коэффициентов корреляции между сравниваемыми рядами варьировали от 0.98 до 1.00, что свидетельствует о достаточно высокой линейной связи между модельными и на-

блюдаемыми на станциях изменениями атмосферного давления; оценки абсолютной ошибки были невелики и менялись от 0.30 до 0.73 гПа; значения относительной ошибки варьировали в пределах 0.33–0.83 %; оценки критерия точности показали, что от 98 до 100 % значений в рядах атмосферного давления реанализа ERA-5 не превышают 0.674σ, где σ — среднеквадратическое отклонение рядов инструментальных измерений атмосферного давления.

Оценивание наиболее вероятных направлений и скоростей ветра во время штормовых нагонов производилось путем расчета двухмерных плотностей распределения вероятностей векторов скорости ветра по методике, описанной в работе (Рожков, 1984). Оценки распределений ветра выполнялись для ближайших к гидрометеорологическим станциям точек сеточной области реанализа ERA5 (см. рис. 1) на временных отрезках, когда подъемы уровня превышали значения 3σ. Для сравнения были оценены также двухмерные плотности вероятности векторов ветра по инструментальным измерениям на ГМС Выборг.

По данным реанализа ERA5 оценивались также распределения вероятностей атмосферного давления во время штормовых нагонов уровня моря, превышающих значение 3σ.

Для оценки интенсивности атмосферных циклонов проводился расчет дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления $I_1(t)_{\mathrm{Grad}P_a}$ в циклонах. Для этого сначала по данным реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020), полученным с ресурса (cds.climate.copernicus.eu, n. d.) для региона, ограниченного координатами 30–87.5° с. ш., 80° з. д. — 60° в. д., выбирались ежечасные поля значений атмосферного давления на уровне моря (P_a). Согласно методике, изложенной в работах (Бардин и Полонский, 2005; Голицын и др., 2007), циклоны выделялись для каждого срока в поле атмосферного давления, как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами, путем исключения среднего по полю значения $\overline{P_a}$. Для отрицательных неоднородностей рассчитывался горизонтальный градиент давления ($\mathrm{Grad}P_a$). Так как $\mathrm{Grad}P_a$ — векторная величина, для оценки ее интенсивности рассчитывался линейный инвариант тензора дисперсии $\mathrm{Grad}P_a$ (Рожков, 1984):

$$I_1(t)_{\mathrm{Grad}P_a} = D_u(t) + D_v(t), \tag{1}$$

где D_u, D_v — дисперсии составляющих $\mathrm{Grad}P_a$ на параллель и меридиан, t — время. Оценки $I_1(t)_{\mathrm{Grad}P_a}$ производились с учетом нестационарности процесса: период квазистационарности для расчета $I_1(t)_{\mathrm{Grad}P_a}$ принимался равным одному году.

3. Результаты

На рис. 2 показаны результаты межгодовых изменений количества случаев штормовых нагонов, оцененных по критерию $> 3\sigma$. В зависимости от года и местоположения станции количество штормовых нагонов, превышающих значение 3σ, меняется в Финском заливе в широких пределах: от 0–1 до 16–52 случаев в год.

Максимальное количество штормовых нагонов в заливе (от 19 до 52), выделенных по критерию $> 3\sigma$, приходится на 1983 год. В этот год в Санкт-Петербурге произошло наибольшее количество наводнений (10 случаев) за всю 317-летнюю

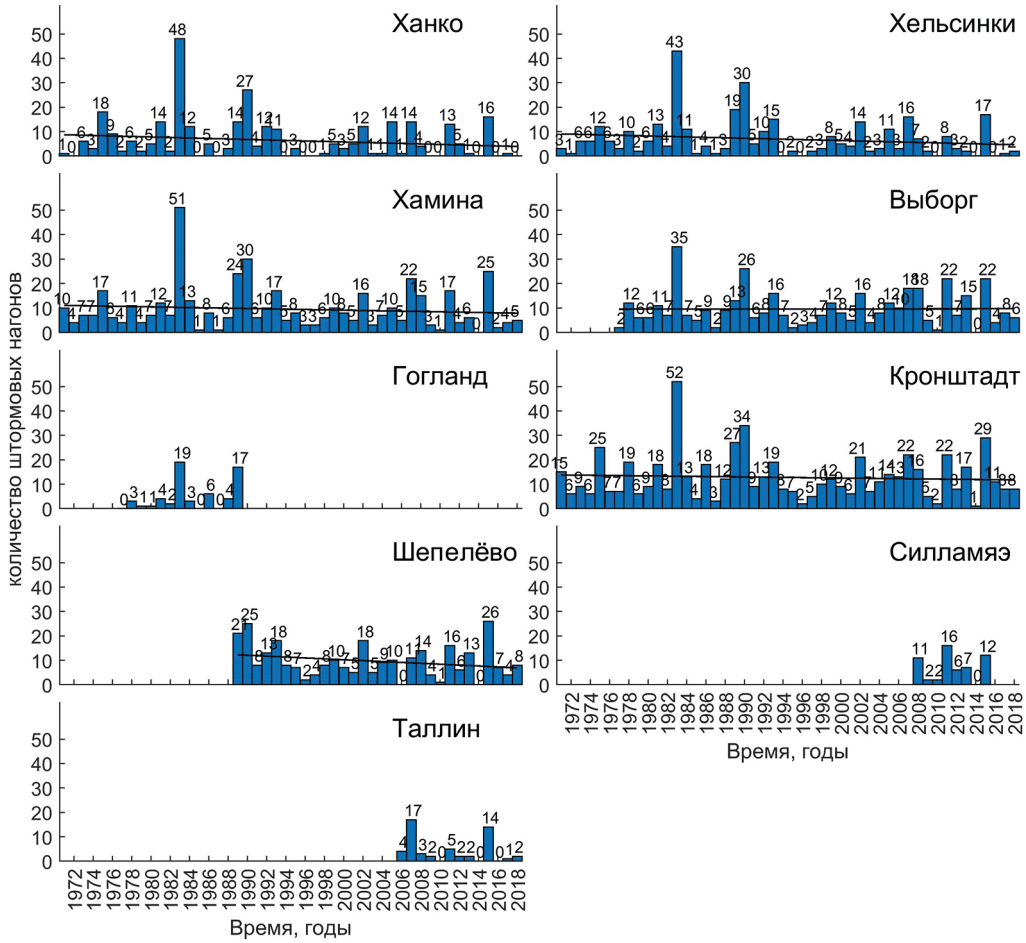

Рис. 2. Межгодовые изменения количества случаев штормовых нагонов, выделенных по критерию > 3σ, на станциях в Финском заливе

Цифры над столбиками — количество штормовых нагонов. Для самых длинных рядов прямой линией показан линейный тренд.

историю города (Померанец, 1999; Захарчук и др., 2015). Не отмечается больших различий в количестве штормовых нагонов у противоположных друг другу северных и южных материковых побережий залива (Хельсинки и Таллин, Хамина и Силламяэ). Однако на островной станции Гогланд количество штормовых нагонов в отдельные годы меньше почти в 1.5–4.0 раза по сравнению с расположенной к северу от нее материковой станцией Хамина. Оценки штормовых нагонов по самым длинным рядам уровня (≥ 30 лет) свидетельствуют о наличии отрицательного тренда, который, однако, не является значимым, во всех случаях за исключением Выборга (рис. 2). На станции Выборг тренд отсутствует.

В табл. 3 приведены оценки продолжительности штормовых нагонов с подъемами уровня более 3σ. Они меняются в зависимости от района от своих минимальных значений 1 час до максимальных значений 26–96 часов. Средние оценки периодов штормовых нагонов варьируются от 6.7 до 9.0 часов.

Таблица 3. **Оценки продолжительности штормовых нагонов с подъемами уровня более 3σ**

Станции	T_{min}	T	T_{max}
Ханко	1.0	9.0	96
Хельсинки	1.0	9.0	47
Хамина	1.0	7.3	47
Гогланд	1.0	7.6	27
Выборг	1.0	9.6	83
Кронштадт	1.0	6.9	57
Шепелёво	1.0	7.3	45
Силламяэ	1.0	7.1	35
Таллин	1.0	6.7	26

Примечание: T_{min} — минимальная, T — средняя, T_{max} — максимальная продолжительности (в часах).

Результаты оценки штормовых нагонов по критерию > 5*σ* указывают на то, что в пункте Ханко такие подъемы уровня являются очень редким явлением (всего два случая за 48 лет) (см. рис. 3). По-видимому, редкими событиями являются такие штормовые нагоны и на станции Таллин, где за последние 13 лет (с 2006 по 2018 г.) не произошло ни одного случая подъема уровня, превышающего значение 5*σ*. На станции Хельсинки с 1984 по 2007 г. произошло восемь случаев подъемов уровня, превышающих значение 5*σ*, а до и после этого периода их не наблюдалось. На станциях Хамина и Выборг в последние два десятилетия отмечается незначительное увеличение количества подъемов уровня моря, превышающих 5*σ* (рис. 3). На самом востоке Финского залива штормовые нагоны более 5*σ* приводят к опасным подъемам уровня моря, которые вызывают наводнения в прибрежных районах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (Захарчук и др., 2017б). Результаты, представленные на рис. 3, указывают на то, что после 1983 г., когда наблюдалось самое большое число случаев штормовых нагонов, превышающих 5*σ* (шесть случаев в Кронштадте), отмечается уменьшение количества таких подъемов уровня вплоть до их полного отсутствия в течение трех лет с 1995 по 1997 г., а затем число случаев опасных подъемов уровня незначительно увеличивается, достигая в отдельные годы трех-четырех случаев (Шепелёво).

Рисунок 4 иллюстрирует изменения во времени дисперсии превышений уровня у колебаний с периодами менее пяти суток на различных станциях Финского залива. Наблюдается существенное увеличение дисперсии этих превышений уровня при движении на восток, от 6.5–15.0 см^2 на западе (Ханко) до 40–118 см^2 на востоке залива (Шепелёво, Кронштадт). Можно отметить, что за исключением Выборга на всех остальных станциях Финского залива отмечаются отрицательные линейные тренды в изменениях дисперсии, которые свидетельствуют об уменьшении интенсивности положительных возмущений уровня моря в диапазоне формирования штормовых нагонов в последние десятилетия. Однако в западной и центральной

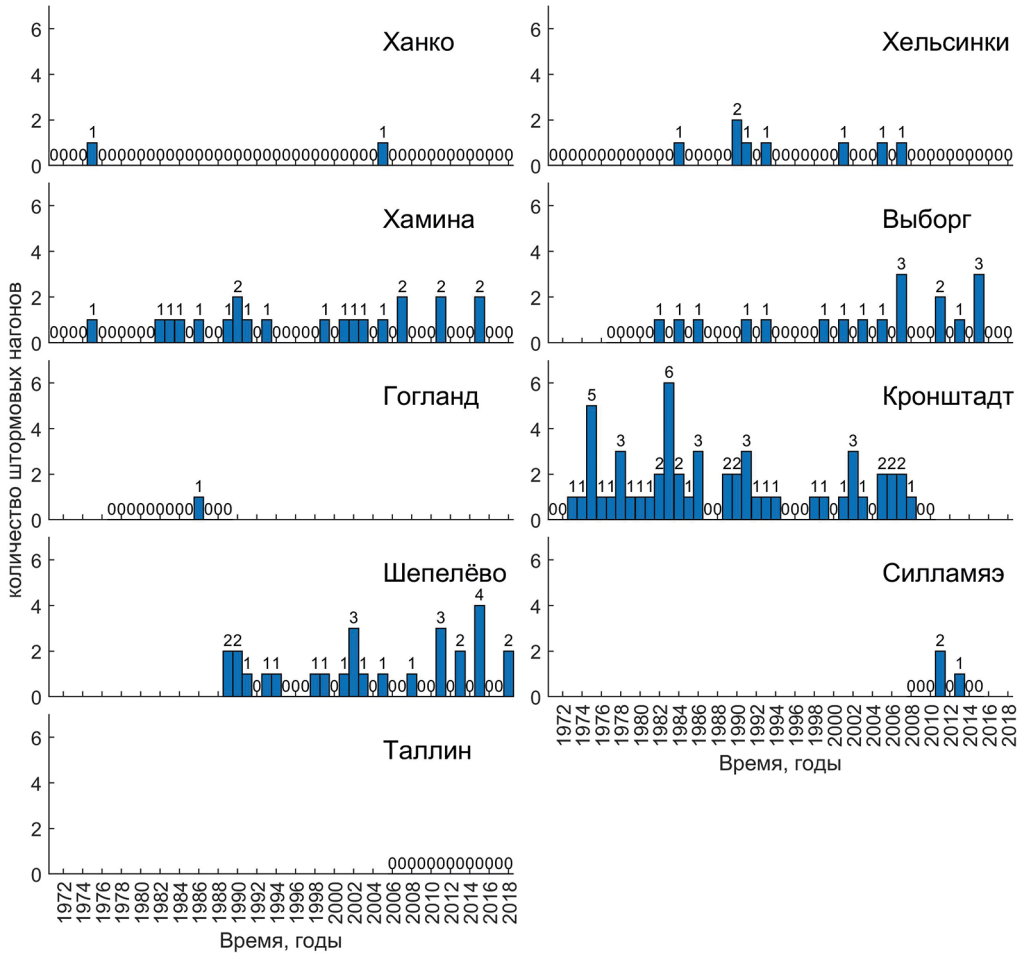

Рис. 3. Межгодовые изменения количества случаев штормовых нагонов по критерию $>5\sigma$ на отдельных станциях в Финском заливе

частях северного побережья залива (Ханко, Хельсинки, Хамина) эти тренды не являются значимыми, в то время как на востоке залива (Кронштадт, Шепелёво) отрицательные линейные тренды — значимые (рис. 4). Рассчитанные квадратичные тренды значимы на всех станциях, кроме Ханко. Они свидетельствуют о том, что в центральной части залива (Хельсинки и Хамина) с начала 1970-х по конец 1980-х гг. отмечалась тенденция к увеличению дисперсии положительных возмущений уровня моря в диапазоне штормовых нагонов, а с начала 1990-х гг. по настоящее время наблюдается выраженная тенденция уменьшения их дисперсии. На станции Выборг квадратичный тренд показывает увеличение дисперсии колебаний уровня, вызывающих штормовые нагоны, с конца 1970-х по начало 2000-х гг., а затем — уменьшение их дисперсии до 2018 г. На востоке Финского залива (Кронштадт и Шепелёво) квадратичные тренды показывают уменьшение интенсивности положительных возмущений уровня моря в диапазоне формирования штормовых нагонов на всем протяжении рассматриваемых временных рядов.

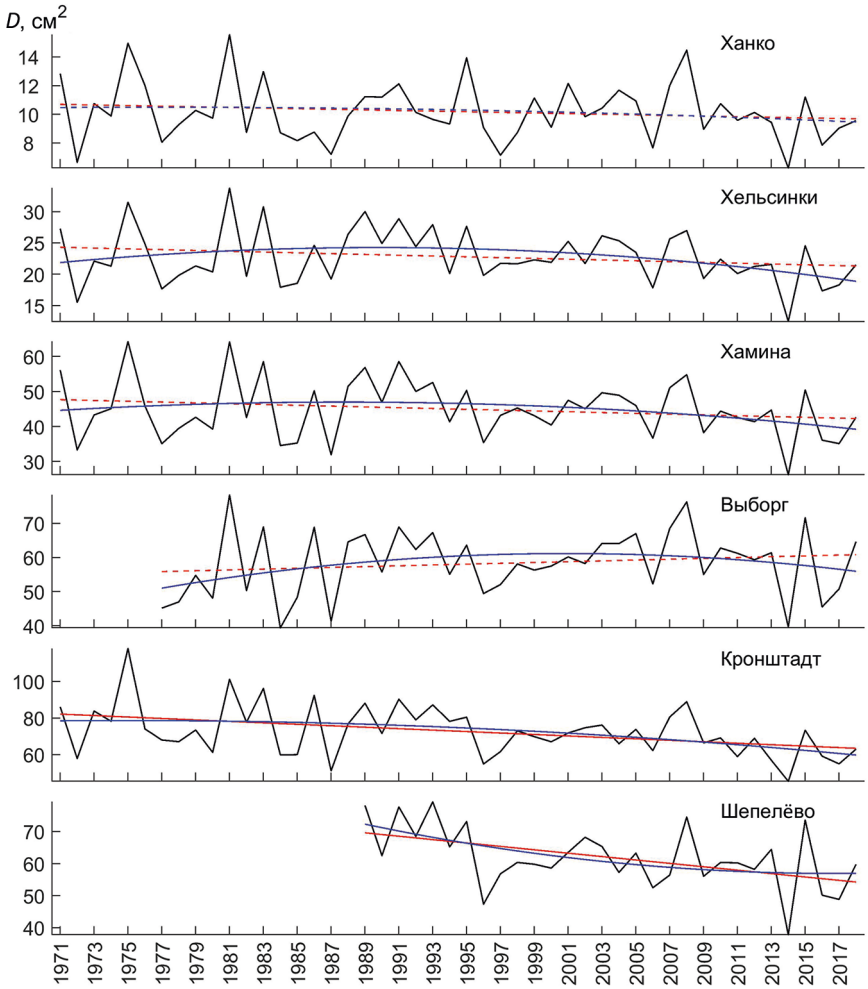

Рис. 4. Дисперсия (*D*) остаточных (после фильтрации) положительных превышений уровня у колебаний с периодами менее пяти суток

Прямая красная линия — значимый (сплошная линия) и незначимый (пунктир) линейные тренды. Синие линии — значимый (сплошная линия) и незначимый (пунктир) квадратичные тренды.

На рис. 5 представлены оценки максимальных подъемов уровня (ζ_{max}) за каждый год. Значения максимумов уровня моря увеличиваются при движении с запада на восток от 50–124 см на самой западной станции Ханко, 60–195 см в центральной части (Хельсинки, Хамина) и до 80–238 см на востоке залива (Выборг, Кронштадт, Шепелёво). Хорошо видно, что на всех станциях кроме Выборга отмечается уменьшение значений максимумов. Об этом свидетельствуют отрицательные линейные тренды в изменениях максимальных значений уровня, которые, однако, не являются значимыми. На станции Выборг линейный тренд отсутствует. Оценки квадратичных трендов показывают, что они являются значимыми только на западе и в центральной части северного побережья Финского залива (Ханко,

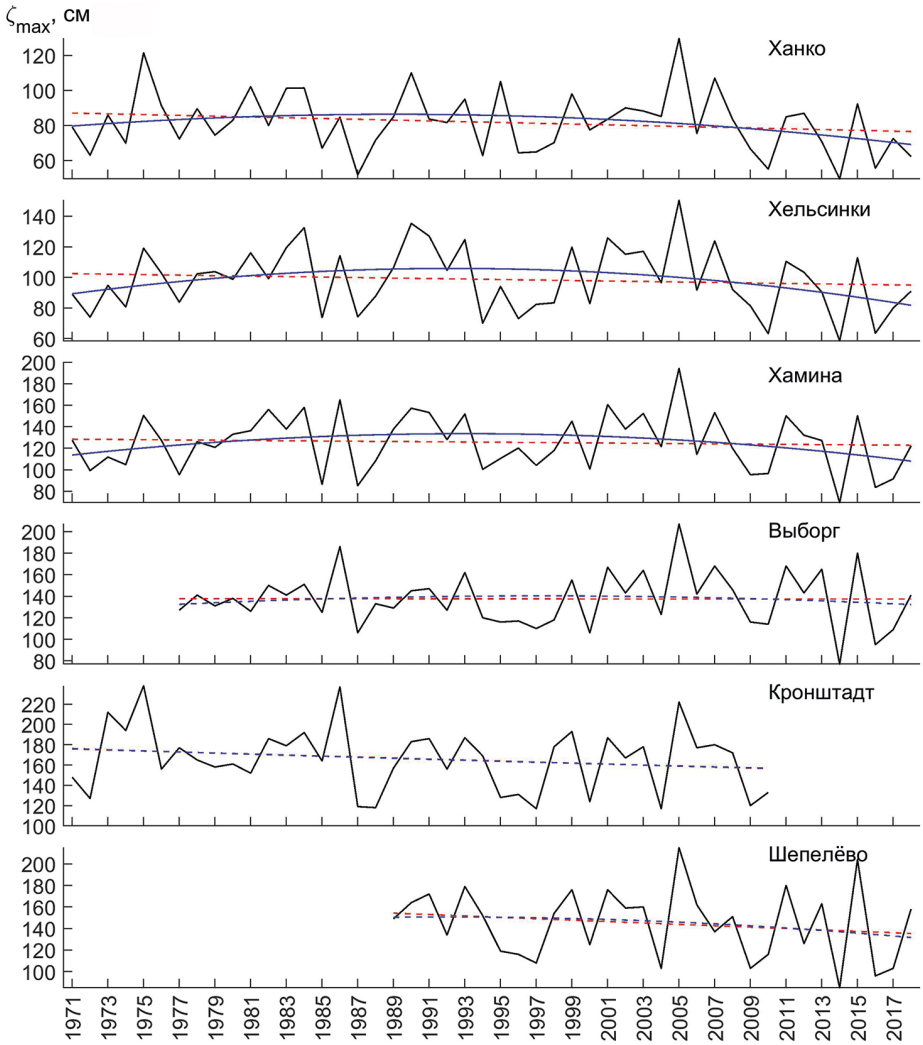

Рис. 5. Межгодовые изменения оценок максимальных за год значений уровня моря

Прямая пунктирная линия — линейный тренд. Синие линии — значимый (сплошная линия) и незначимый (пунктир) квадратичные тренды.

Хельсинки, Хамина), где до начала 1990-х гг. отмечалось незначительное увеличение максимумов, а затем их уменьшение до настоящего периода. На востоке Финского залива квадратичные тренды в изменениях максимумов значений уровня моря не выражены.

Таким образом, анализ изменений во времени различных характеристик штормовых нагонов свидетельствует в большинстве случаев о слабой и не всегда значимой тенденции к уменьшению их количества, дисперсии и максимумов уровня.

На рис. 6 представлены двухмерные плотности распределения вероятностей векторов скорости ветра, оцененные по инструментальным измерениям ветра на гидрометеорологической станции Выборг во время штормовых нагонов, превыша-

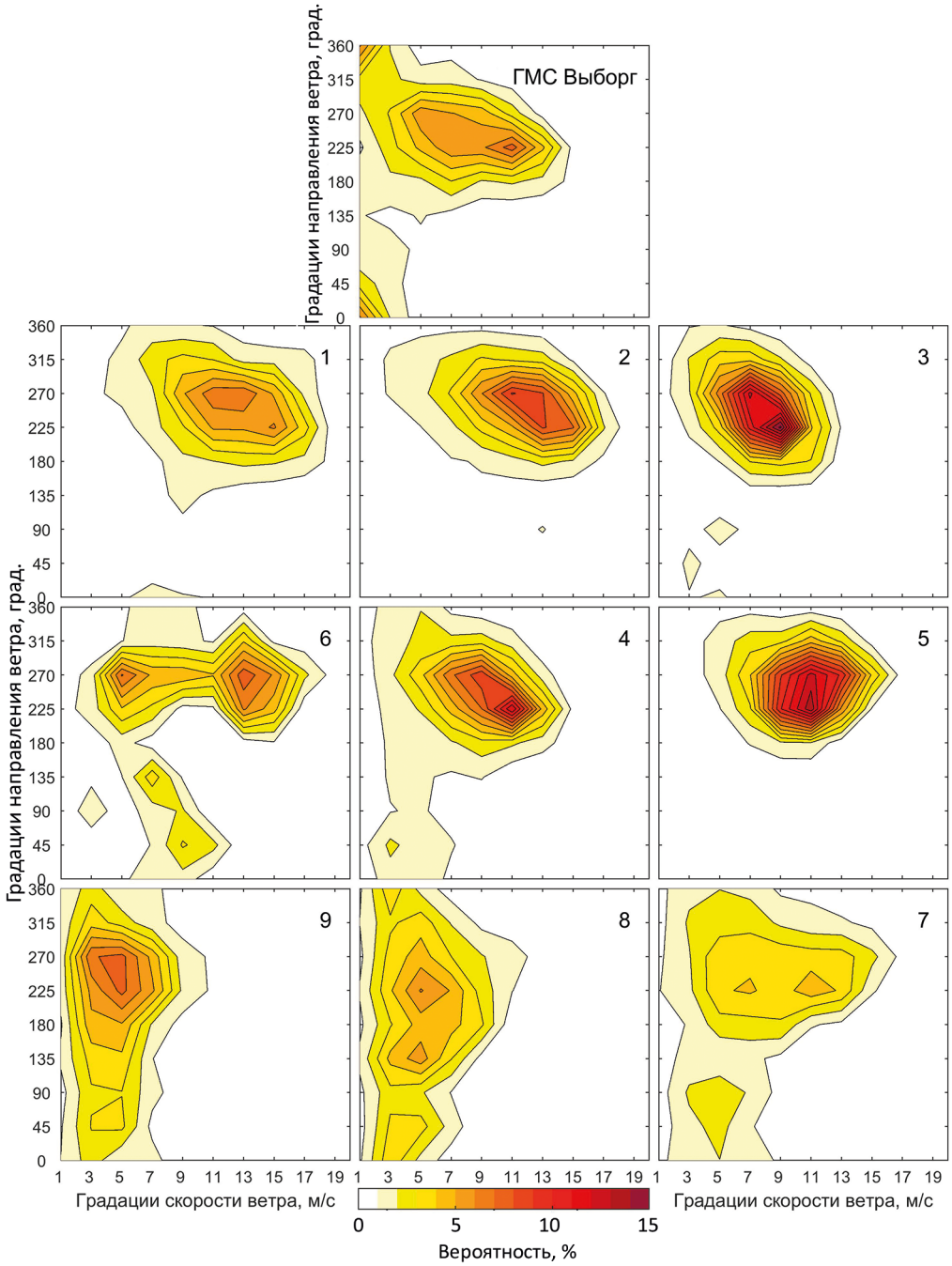

Рис. 6. Двухмерные плотности распределения вероятностей векторов скорости ветра, рассчитанные для периодов штормовых нагонов уровня моря, превышающих 3σ, по инструментальным измерениям на ГМС Выборг и по данным реанализа ERA-5

Цифры 1–9 соответствуют точкам сеточной области реанализа ERA-5 (см. рис. 1).

ющих 3σ, а на рис. 6 приведены такие же плотности распределения векторов ветра, рассчитанные по данным реанализа ERA5 для точек, ближайших к станциям уровенных измерений. Сравнение результатов, представленных на рис. 6, с соответствующими результатами, полученными по данным реанализа для района станции Выборг, показывает хорошее согласие между плотностями распределения ветра. В обоих случаях во время штормовых нагонов наибольшей вероятностью обладают ветры, дующие с юго-запада со скоростями 11 м/с.

Рисунок 6 иллюстрирует, что для рассматриваемых районов северного побережья Финского залива и в районе его вершины характерно преобладание одномодовой структуры плотностей вероятности векторов ветра. Это означает, что штормовые нагоны здесь происходят при ветрах западных румбов, дующих с наиболее вероятной скоростью 9–11 м/с, причем вероятность таких ветров увеличивается при движении с запада на восток. У южного побережья залива структура ветра во время штормовых нагонов меняется: в распределениях вероятностей векторов скорости ветра появляются другие моды. В отличие от северного побережья, в Таллине и Силламяэ штормовые нагоны с подъемами уровня больше 3σ происходят чаще всего при западных и юго-западных ветрах с меньшими значениями наиболее вероятной скорости ветра в 5 м/с. Кроме этого, здесь, а также у станции Шепелёво выделяются по направлениям менее выраженные моды северо-восточных и юго-восточных (у Силламяэ) ветров. В районе станции Шепелёво кроме моды юго-западных ветров со скоростями 11 м/с выделяется равнозначная ей мода скоростей ветра в 7 м/с, имеющих такие же направления. Видно также, что вероятность значений ветра у южного побережья увеличивается с востока на запад.

На рис. 7 представлены распределения вероятностей значений атмосферного давления во время штормовых нагонов с подъемом уровня моря более 3σ. У северного побережья и в вершине залива (Кронштадт) наиболее вероятные значения атмосферного давления во время штормовых нагонов равны 995 гПа. При движении к югу наиболее вероятные значения атмосферного давления увеличиваются до 1010 гПа (район Гогланда). У южного побережья Финского залива наибольшую вероятность имеют значения атмосферного давления в 1005–1015 гПа (рис. 7). Результаты, приведенные на рис. 7, свидетельствуют о том, что атмосферное давление над Финским заливом во время штормовых нагонов не является очень низким. Это связано с тем, что траектории движения центров циклонов, вызывающих штормовые нагоны, проходят севернее Финского залива (Гордеева и Малинин, 2014; Захарчук и др., 2014; 2015).

Для интерпретации выявленных особенностей в изменениях штормовых нагонов были проанализированы современные тенденции метеорологических процессов. На рис. 8 показаны межгодовые изменения оценок линейного инварианта тензора дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления $I_1(0)$ как одной из характеристик показателя интенсивности циклогенеза в атмосфере. Во всех трех районах Финского залива отмечаются отрицательные значимые линейные тренды в оценках $I_1(0)$, свидетельствующие о снижении интенсивности атмосферных циклонов над Финским заливом в конце XX и начале XXI веков.

О снижении циклонической активности над Финским заливом свидетельствуют результаты анализа инструментальных измерений ветра на станциях Озерки и Выборг во второй половине XX и начале XXI веков. На рис. 9 показаны случаи

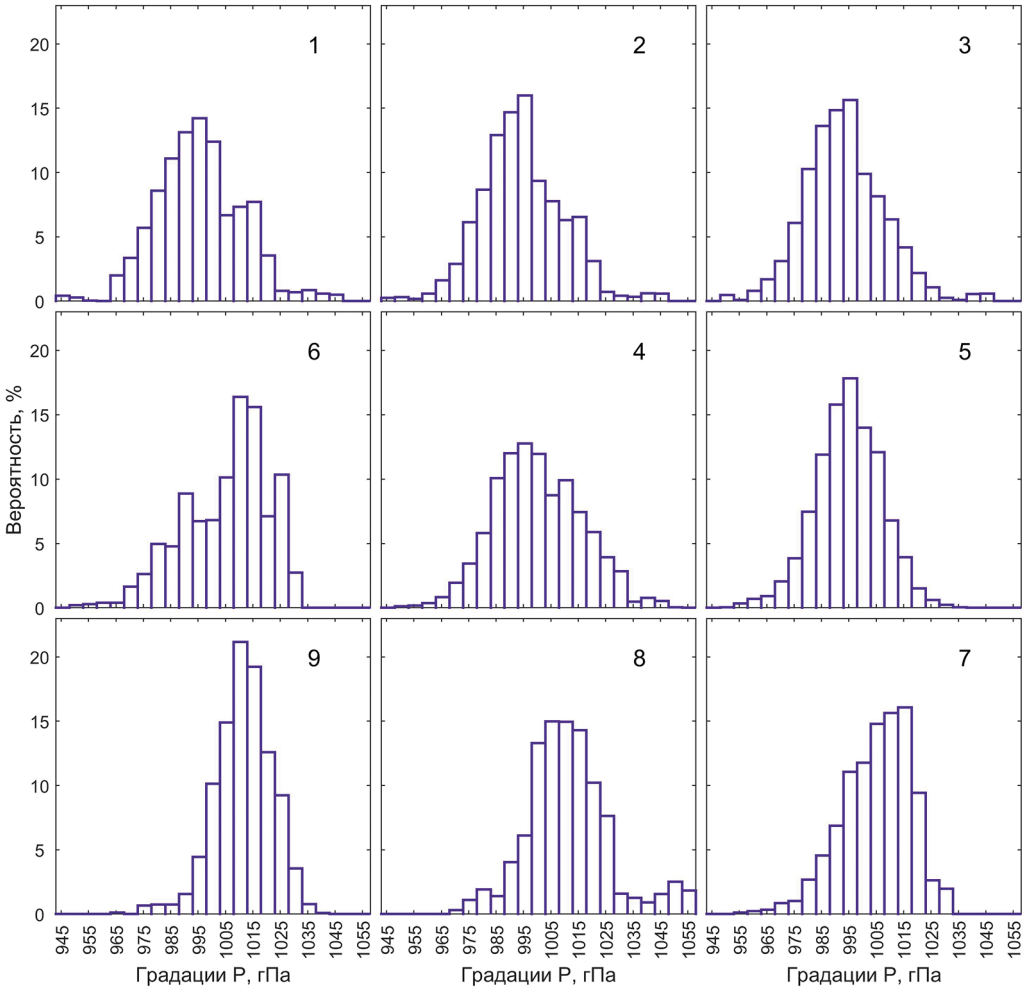

Рис. 7. Распределения вероятностей значений атмосферного давления во время штормовых нагонов с подъемом уровня моря более 3σ

Цифры 1–9 соответствуют точкам сеточной области реанализа ERA-5 (см. рис. 1).

ветра западных румбов, имевшего скорости ≥11 м/с, отмечавшиеся на этих станциях с сентября по февраль, и максимальные за год значения ветра. Результаты свидетельствуют о выраженных отрицательных значимых трендах во временном ходе различных характеристик ветра.

4. Обсуждение результатов

Полученные нами результаты оценок статистических характеристик штормовых нагонов в различных прибрежных районах Финского залива указывают на то, что в последние десятилетия отмечается тенденция уменьшения их количества, дисперсии и максимумов уровня моря. Эти результаты отличаются от выполнен-

ного ранее исследования штормовых нагонов в открытой Балтике, Ботническом и Финском заливах в период 1960–2010 гг., в котором наблюдались положительные тренды в межгодовых изменениях количества штормовых нагонов (Wolski et al., 2014). Не исключено, что различия между нашими и предыдущими оценками могут быть связаны с более поздним периодом анализа штормовых нагонов в данной работе, а также иной методикой их выделения.

Интенсивность штормовых нагонов зависит от параметров атмосферных циклонов: их количества, глубины, скорости движения, направления и скорости ветра, траекторий перемещения (Gönnert et al., 2001; Pugh and Woodworth, 2014). В работе Гордеевой и Малинина (2012) был выделен значимый квадратичный тренд в межгодовых изменениях количества атмосферных циклонов, движущихся по наводненческим траекториям над регионом северо-восточной Балтики в период с 1958 по 2008 г., который свидетельствует о выраженном уменьшении количества таких циклонов со второй половины 1980-х годов. Результаты анализа метеорологической информации, представленные нами на рис. 8 и 9, также свидетельствуют о снижении интенсивности циклогенеза в атмосфере над Балтийским морем в последние десятилетия. На это указывают значимые отрицательные тренды в оценках линейного инварианта тензора дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления $I_1(0)$ над тремя районами Финского залива (рис. 8) и уменьшение случаев ветров западных румбов, а также максимумов скорости ветра (рис. 9). Такие же отрицательные тренды отмечаются в характеристиках ветра и волнения по данным инструментальных измерений на юго-востоке и северо-западе открытой Балтики (Захарчук и др., 2017а). Можно предположить, что отмеченные нами изменения метеорологических параметров могли быть вызваны смещениями траекторий движения атмосферных циклонов над Балтийским морем. Однако пространственно-временной квантильный анализ положений центров атмосферных циклонов над Балтикой в период с 1979 по 2010 г. не выявил значимого тренда в изменениях траекторий циклонов (Захарчук и др., 2014).

По-видимому, в интенсивности атмосферного циклогенеза над Балтикой существуют долгопериодные цикличности, связанные с изменениями климата и крупномасштабного взаимодействия в системе «океан — атмосфера» в регионе Северной Атлантики (Терзиев и др., 1992), которые находят отражение в межгодовых изменениях характеристик штормовых нагонов в Балтийском море. Действительно, анализ более продолжительных метеорологических данных указывает на то, что с начала прошлого века и до 1980-х гг. в различных районах открытой Балтики и Финского залива наблюдалось увеличение дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления, после чего наметилось заметное снижение в оценках дисперсии (Захарчук и др., 2017б).

История Санкт-Петербурга свидетельствует о том, что за 317-летний период существования города в изменении количества невских наводнений наблюдается значимый положительный тренд (Гордеева и Малинин, 2014). Однако это увеличение происходило неравномерно: во временном ходе оценок наводнений выделяются периоды выраженных увеличений и уменьшений их количества, с максимумами, отмечавшимися в 1750-х, 1860–1870-х и 1980-х годах. Период между этими максимумами приблизительно равняется 110–120 гг. (Захарчук и др., 2017б).

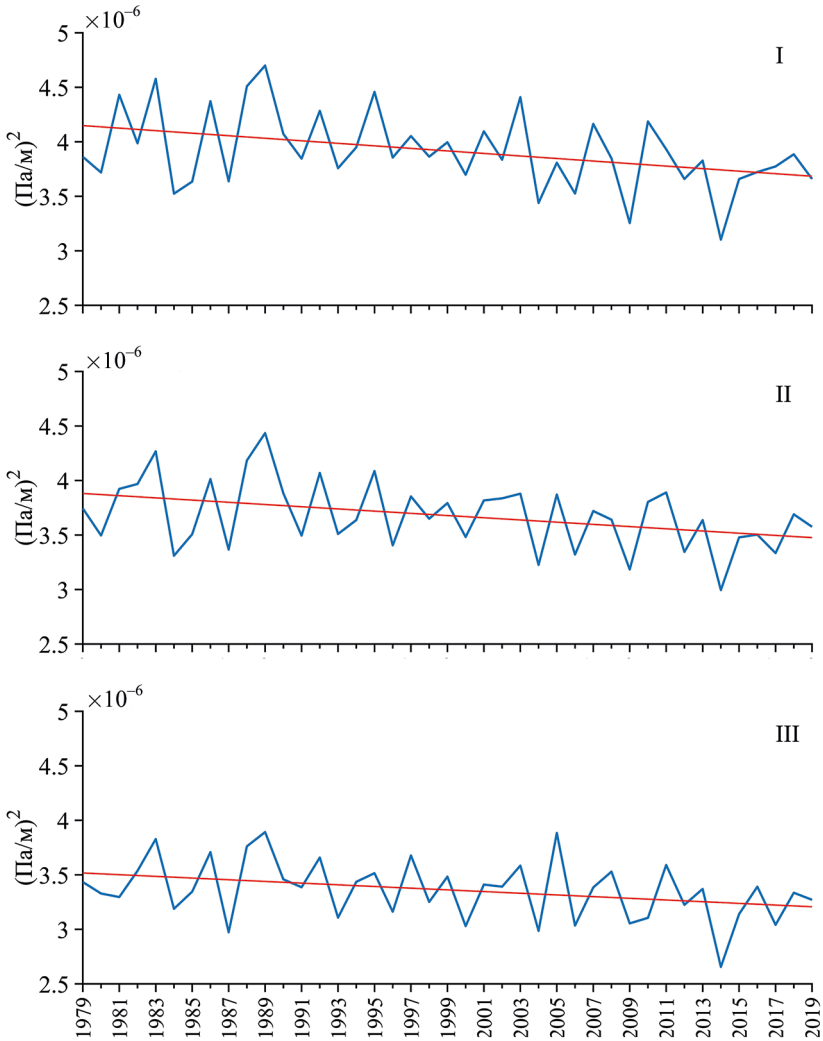

Рис. 8. Изменение линейного инварианта тензора дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления $I_1(0)$ в атмосферных циклонах над тремя районами Финского залива: западным (I), центральным (II) и восточным (III)

Местоположения районов даны на рис. 1. Красной линией обозначен линейный тренд.

Полученные нами в данной работе результаты согласуются с оценками характеристик атмосферных циклонов, выполненными Г. С. Голицыным с соавторами (2007). В этой работе оценивались статистические характеристики циклонов и антициклонов в северном полушарии в широтном поясе 20–80° с. ш. по данным NCEP/NCAR реанализа и по расчетам с климатической моделью общей циркуляции Института вычислительной математики РАН (КМОЦ ИВМ РАН). При расчетах по модели для XXI в. использовался антропогенный сценарий SRES-A2, по эмиссиям парниковых газов наиболее интенсивный из сценариев, предложенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC). Результаты анали-

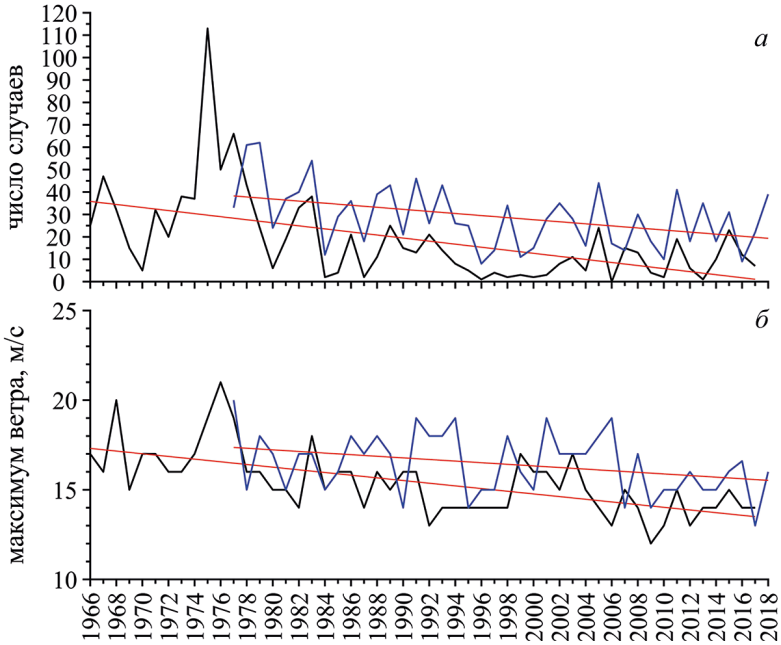

Рис. 9. Межгодовые изменения количества случаев, когда ветер на ГМС Озерки (синяя линия) и Выборг (черная линия) имел направления ЮЗ — СЗ (225–315°) и скорости ≥ 11 м/с в период с августа по март включительно (*а*), а также значений максимальной скорости ветра за каждый год на этих станциях (*б*)

Прямыми красными линиями показаны значимые линейные тренды.

за характеристик циклонов по данным NCEP/NCAR и расчетам с КМОЦ ИВМ РАН показали, что с конца XX в. для холодного периода (октябрь — март) наметилась тенденция к уменьшению количества циклонов, которая становится более выраженной на протяжении XXI века.

5. Выводы

Статистический анализ штормовых нагонов и метеорологической информации в районе Финского залива в последние десятилетия XX и первые десятилетия XXI вв. позволяет сделать следующие основные выводы.

1. В зависимости от года и местоположения станции количество штормовых нагонов, превышающих значение 3σ, меняется в Финском заливе в широких пределах: от 0–1 до 16–52 случаев в год. Оценки штормовых нагонов по самым длинным рядам уровня (≥ 30 лет) свидетельствуют о наличии отрицательного тренда в изменении количества штормовых нагонов, который, однако, не является значимым, на всех станциях за исключением Выборга.
2. Средние периоды штормовых нагонов варьируются от 6.7 до 9.0 часов, а максимальные достигают 26–96 часов.

3. Результаты оценки штормовых нагонов по критерию $>5\sigma$ указывают на то, что на западе Финского залива такие подъемы уровня являются очень редким явлением (0–2 случая за рассматриваемые периоды), в то время как в центральной и восточной частях залива количество их случаев увеличивается на порядок и более.
4. На всех станциях Финского залива за исключением Выборга отмечаются отрицательные линейные тренды в изменениях дисперсии положительных превышений уровня у колебаний с периодами менее пяти суток, которые свидетельствуют об уменьшении интенсивности подъемов уровня моря в диапазоне формирования штормовых нагонов в последние десятилетия.
5. Оценки двухмерных плотностей вероятностей векторов скорости ветра, рассчитанные на основе инструментальных измерений и данных реанализа, показывают, что во время штормовых нагонов наибольшей вероятностью обладают ветры, дующие с запада и юго-запада со скоростями 4–13 м/с.
6. Распределения вероятностей значений атмосферного давления во время штормовых нагонов показывают, что у северного побережья и в вершине Финского залива (Кронштадт) наиболее вероятные значения атмосферного давления во время штормовых нагонов равны 995 гПа. При движении к югу наиболее вероятные значения атмосферного давления увеличиваются до 1010 гПа в районе о. Гогланд и составляют 1005–1015 гПа на станциях южного побережья Финского залива.
7. В межгодовых изменениях линейного инварианта тензора дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления $I_1(0)$ в атмосферных циклонах над тремя районами Финского залива выражены значимые отрицательные тренды.
8. По данным инструментальных измерений выявлено значимое уменьшение случаев ветра западных румбов, имевшего скорости ≥ 11 м/с, и максимальных за год значений ветра на станциях Озерки и Выборг во второй половине XX и начале XXI веков.
9. Полученные результаты свидетельствуют о том, что выявленное в большинстве районов уменьшение количества штормовых нагонов и их интенсивности может быть связано со снижением циклонической активности в атмосфере над Финским заливом в конце XX и начале XXI веков.

Литература

Аверкиев, А. С., Клеванный, К. А. (2007). Определение траекторий и скоростей циклонов, приводящих к максимальным подъемам воды в Финском заливе. *Метеорология и гидрология*, 8, 55–63.

Бардин, М. Ю., Полонский, А. Б. (2005). Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период. *Изв. РАН*, 41, 3–13.

Боуден, К. Ф. (1988). *Физическая океанография прибрежных вод*. Москва: Мир.

Голицын, Г. С., Мохов, И. И., Акперов, М. Г., Бардин, М. Ю., Володин, Е. М. (2007). Оценки гидрометеорологических рисков и функций распределения интенсивности атмосферных вихрей по данным реанализа и моделям климата. *Гидрометеобезопасность. Гражданская защита*, 1, 27–37.

Гордеева, С. М., Малинин, В. Н. (2014). *Изменчивость морского уровня Финского залива*. Санкт-Петербург: РГГМУ.

Гордеева, С. М., Малинин, В. Н. (2012). О типизации траекторий циклонов, приводящих к невским наводнениям. *Общество. Среда. Развитие*, 2 (23), 187–193.

Грушевский, М. С. (1954). Воздействие ветра на распространение длинной волны малой амплитуды. *Труды ГГИ*, 23, 64–73.

Захарчук, Е. А., Литина, Е. Н., Клеванцов, Ю. П., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2017а). Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата. *Труды ГОИН*, 218, 6–62.

Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2020). О пространственной структуре и распространении волн невских наводнений. *Метеорология и гидрология*, 4, 42–53.

Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2017б). *Механизмы опасных подъёмов уровня моря в Финском заливе*. Санкт-Петербург.

Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2015). О причинах увеличения частоты невских наводнений в последние десятилетия. *Метеорология и гидрология*, 1, 86–95.

Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2014). О влиянии межгодовой изменчивости характеристик атмосферных циклонов на частоту опасных подъемов уровня моря на востоке Финского залива. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 3 (101), 27–36.

Захарчук, Е. А., Тихонова, Н. А. (2011). О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений. *Метеорология и гидрология*, 8, 54–64.

Исанин, Н. Н. (ред.) (1986). *Морской энциклопедический справочни. Т. 2.* Ленинград: Судостроение.

Куликов, Е. А., Медведев, И. П. (2013). Изменчивость уровня Балтийского моря и наводнения в Финском заливе. *Океанология*, 53 (2), 161–174.

Лабзовский, Н. А. (1971). *Непериодические колебания уровня моря*. Ленинград: Гидрометеоиздат.

Макринова, О. В. (1954). Природа ленинградских наводнений. *Труды ГГИ*, 23, 5–36.

Померанец, К. С. (1999). О статистике наводнений в Петербурге. *Метеорология и гидрология*, 8, 105–110.

Рожков, В. А. (ред.) (1984). *Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов скоростей течений и ветра*. Ленинград: Гидрометеоиздат.

Терзиев, Ф. С., Рожков, В. А., Смирнова, А. И. (ред.) (1992). *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 3. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия.* Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат.

Туранов, И. М. (ред.) (1976). *Морской гидрометеорологический ежегодник. Балтийское море. Том 1*. Ленинград.

Baltic Sea Hydrographic Commission (2013). *Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3.* [online] Доступно на: http://data.bshc.pro/ 2/58.6/16.2 [Дата доступа 10.10.2021].

cds.climate.copernicus.eu. (n. d.). *Copernicus Climate Data Store*. [online] Доступно на: https://cds.climate.copernicus.eu [Дата доступа 24.12.2021].

Gönnert, G., Dube, S., Murty, T. S. and Siefert, W. (2001). Global storm surges: theory, observations and applications. *Kuste*, 581–623.

Haines, J. W., Thompson, K. R. and Wiens, D. P. (1991). The detection of coastal-trapped waves. *J. Geophys. Res. Ocean*, 96. https://doi.org/10.1029/90jc02218

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. and Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Johansson, M., Boman, H., Kahma, K. K. and Launiainen, J. (2001). Trends in sea level variability in the Baltic Sea. *Boreal Environ. Res.*, 6, 159–179.

Majewski, A., Dziadziuszko, Z. and Wiśniewska, A. (1983). *Monografia powodzi sztormowych 1951–1975*. Warszawa: Wyd. Kom. Łącz.

marine.copernicus.eu. (n. d.). *Home | CMEMS.* [online] Доступно на: http://marine.copernicus.eu [Дата доступа 24.12.2021].

meteo.nw.ru. (n. d.). *Официальный портал Северо-Западного УГМС, прогноз погоды по Санкт-Петербургу на трое суток*. [online] Доступно на: http://www.meteo.nw.ru [Дата доступа 24.12.2021].

Pedlosky, J. (1979). Finite-Amplitude Baroclinic Waves in a Continuous Model of the Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 36 (10), 1908–1924. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1908:fabwia>2.0.co;2

Pugh, D. and Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9781139235778

smhi.se. (n. d.). *Väder Väderprognoser Klimat- & Vädertjänster i Sverige | SMHI*. [online] Доступно на: https://www.smhi.se [Дата доступа 24.12.2021].

Sztobryn, M., Stigge, H. J., Wielbińska, D., Weidig, B., Stanisławczyk, I., Kańska, A., Krzysztofik, K., Kowalska, B., Letkiewicz, B. and Mykita, M. (2005). Storm Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts). *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie,* 39.

Tylkowski, J. and Hojan, M. (2018). Threshold values of extreme hydrometeorological events on the Polish Baltic coast. *Water*, 10 (10), 1337. https://doi.org/10.3390/w10101337

WMO (2012). *International Glossary of Hydrology*. IHP/OHP-Berichte.

Wolski, T., Wiśniewski, B., Giza, A., Kowalewska-Kalkowska, H., Boman, H., Grabbi-Kaiv, S., Hammarklint, T., Holfort, J. and Lydeikaite, Ž. (2014). Extreme sea levels at selected stations on the Baltic Sea coast. *Oceanologia*, 56 (2), 259–290. https://doi.org/10.5697/oc.56-2.259

Статья поступила в редакцию 12 января 2021 г.
Статья рекомендована к печати 19 октября 2021 г.

Контактная информация:

Захарчук Евгений Александрович — eazakharchuk@yandex.ru
Сухачев Владимир Николаевич — syhachev@mail.ru
Тихонова Наталья Александровна — nata-tik@yandex.ru

Storm surges in the Gulf of Finland of the Baltic Sea

E. A. Zakharchuk[1,2], V. N. Sukhachev[2], N. A. Tikhonova[1,2]

[1] St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation
[2] N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet,
6, Kropotkinskiy per., 119034, Moscow, Russian Federation

For citation: Zakharchuk, E. A., Sukhachev, V. N., Tikhonova, N. A. (2021). Storm surges in the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (4), 781–805. https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.408 (In Russian)

The characteristics of storm surges in different regions of the Gulf of Finland in the second half of the 20th and the beginning of the 21st centuries were investigated on the basis of tide gauge measurements of sea level, instrumental observations of the wind, and data from the reanalysis of meteorological fields. A criterion for identifying storm surges, taking into account spatial changes in their intensity, is proposed. The results indicate that depending on the year and the location of the station, the number of storm surges varies in the Gulf of Finland in a wide range: from 0–1 to 16–52 cases per year. The average duration of storm surges varies from 6.7 to 9.0 hours, and the maximum reaches 26 to 96 hours. In recent decades, in most regions, there has been a tendency towards a decrease in the number of storm surges, their dispersion and sea level maximum. The distributions of the probabilities of wind and atmospheric pressure during storm surges are given. Estimates of two-dimensional probability densities indicate that during storm surges, winds blowing from the west and southwest with speeds of 4–13 m/s are most likely. At the northern coast and at the top of the bay, the most probable values of atmospheric pressure during storm surges are 995 hPa. On the southern coast of the Gulf of Finland, atmospheric pressure values of 1005–1015 hPa are most likely. The results obtained indicate that the atmospheric pressure over the Gulf of Finland during storm surges is not very low. This is due to the fact that the trajectories of the centers of cyclones causing storm surges pass north of the Gulf of Finland. Analysis of meteorological

information also showed the presence of significant negative trends in interannual variations in the dispersion of the horizontal atmospheric pressure gradient, average values and maximums of wind speed. It is concluded that the revealed changes in the characteristics of storm surges are associated with a decrease in the intensity of cyclogenesis in the atmosphere over the Baltic Sea in recent decades.

Keywords: Baltic Sea, storm surges, level fluctuations, floods, climate.

References

Averkiev, A. S. and Klevanny, K. A. (2007). Determining cyclone trajectories and velocities leading to extreme sea level rises in the gulf of Finland. *Russian Meteorology and Hydrology*, 32 (8), 514–519. (In Russian)

Baltic Sea Hydrographic Commission (2013). *Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3*. [online] Available at: http://data.bshc.pro/??2/58.6/16.2 [Accessed 10 Oct. 2021].

Bardin, M. Yu. and Polonsky, A. B. (2005). North Atlantic Oscillation and synoptic variability in the European-Atlantic region in winter. *Izvestiya Atmospheric and Ocean Physics*, 41 (2), 127–136. (In Russian)

Bouden, K. F. (1988). *Physical oceanography of coastal waters.* Moscow: Mir Publ. (In Russian)

cds.climate.copernicus.eu. (n. d.). *Copernicus Climate Data Store*. [online] Available at: https://cds.climate.copernicus.eu [Accessed 24 Dec. 2021].

Golitsyn, G. S., Mokhov, I. I., Akperov, M. G., Bardin, M. Yu. and Volodin, E. M. (2007). Estimates of hydrometeorological risks and distribution functions of the intensity of atmospheric eddies based on reanalysis data and climate models. *Gidrometeobezopasnost'. Grazhdanskaia zashchita*, 1, 27–37. (In Russian)

Gönnert, G., Dube, S., Murty, T. S. and Siefert, W. (2001). Global storm surges: theory, observations and applications. *Kuste*, 581–623.

Gordeeva, S. M. and Malinin, V. N. (2012). On the typification of the trajectories of cyclones leading to the Neva floods. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*, 2 (23), 187–193. (In Russian)

Gordeeva, S. M. and Malinin, V. N. (2014). *Gulf of Finland sea level variability*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University Press. (In Russian)

Grushevskii, M. S. (1954). The effect of wind on the propagation of a long wave of small amplitude. *Trudy GGI*, 23, 64–73. (In Russian)

Haines, J. W., Thompson, K. R. and Wiens, D. P. (1991). The detection of coastal-trapped waves. *J. Geophys. Res. Ocean*, 96. https://doi.org/10.1029/90jc02218

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. and Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Isanin, N. N. (ed.) (1986). *Marine encyclopedic reference book. Vol. 2*. Leningrad: Sudostroenie Publ. (In Russian)

Johansson, M., Boman, H., Kahma, K. K. and Launiainen, J. (2001). Trends in sea level variability in the Baltic Sea. *Boreal Environ. Res.*, 6, 159–179.

Kulikov, E. A. and Medvedev, I. P. (2013). Variability of the Baltic Sea level and floods in the Gulf of Finland. *Oceanology*, 53 (2), 145–151. (In Russian)

Labzovskii, N. A. (1971). *Non-periodic fluctuations in sea level*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)

Majewski, A., Dziadziuszko, Z. and Wiśniewska, A. (1983). *Monografia powodzi sztormowych 1951–1975*. Warszawa: Wyd. Kom. Łącz.

Makrinova, O. V. (1954). The nature of the Leningrad floods. *Trudy GGI*, 23, 5–36. (In Russian)

marine.copernicus.eu. (n. d.). *Home | CMEMS*. [online] Available at: http://marine.copernicus.eu [Accessed 24 Dec. 2021].

meteo.nw.ru. (n. d.). *The official portal of the North-Western UGMS, the weather forecast for St. Petersburg for three days*. [online] Available at: http://www.meteo.nw.ru [Accessed 24 Dec. 2021].
Pedlosky, J. (1979). Finite-Amplitude Baroclinic Waves in a Continuous Model of the Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 36 (10), 1908–1924. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1908:fabwia>2.0.co;2
Pomeranets, K. S. (1999). Flood statistics in St. Petersburg. *Meteorology and Hydrology*, 8, 105–110. (In Russian)
Pugh, D. and Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9781139235778
Rozhkov, V. A. (ed.) (1984). *Methodological letter on probabilistic analysis of vector time series of currents and wind speeds*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
smhi.se. (n. d.). *Väder Väderprognoser Klimat- & Vädertjänster i Sverige | SMHI*. [online] Available at: https://www.smhi.se [Accessed 24 Dec. 2021].
Sztobryn, M., Stigge, H. J., Wielbińska, D., Weidig, B., Stanisławczyk, I., Kańska, A., Krzysztofik, K., Kowalska, B., Letkiewicz, B. and Mykita, M. (2005). Storm Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts). *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie,* 39.
Terziev, F. S., Rozhkov, V. A., Smirnova, A. I. (eds) (1992). *Hydrometeorology and hydrochemistry of the Seas of the USSR. Vol. 3. The Baltic Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions.* St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
Turanov, I. M. (ed.) (1976). *Marine Hydrometeorological Yearbook. Baltic Sea. Vol. 1.* Leningrad. (In Russian)
Tylkowski, J. and Hojan, M. (2018). Threshold values of extreme hydrometeorological events on the Polish Baltic coast. *Water*, 10 (10), 1337. https://doi.org/10.3390/w10101337
WMO (2012). *International Glossary of Hydrology*. IHP/OHP-Berichte.
Wolski, T., Wiśniewski, B., Giza, A., Kowalewska-Kalkowska, H., Boman, H., Grabbi-Kaiv, S., Hammarklint, T., Holfort, J. and Lydeikaite, Ž. (2014). Extreme sea levels at selected stations on the Baltic Sea coast. *Oceanologia*, 56 (2), 259–290. https://doi.org/10.5697/oc.56-2.259
Zakharchuk, E. A., Litina, E. N., Klevantsov, Iu. P., Sukhachev, V. N. and Tikhonova, N. A. (2017a). Non-stationarity of hydrometeorological processes in the Baltic Sea in a changing climate. *Trudy GOIN*, 218, 6–62. (In Russian)
Zakharchuk, E. A. and Tikhonova, N. A. (2011). On the spatiotemporal structure and mechanisms of the Neva River flood formation. *Russian Meteorology and Hydrology*, 36 (8), 534–541. (In Russian)
Zakharchuk, E. A., Sukhachev, V. N. and Tikhonova, N. A. (2014). On the influence of the interannual variability of the characteristics of atmospheric cyclones on the frequency of dangerous sea level rises in the east of the Gulf of Finland. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 3 (101), 27–36. (In Russian)
Zakharchuk, E. A., Sukhachev, V. N. and Tikhonova, N. A. (2015). The reasons for increase in the Neva River flood frequency in recent decades. *Russian Meteorology and Hydrology*, 40 (1), 60–67. (In Russian)
Zakharchuk, E. A., Sukhachev, V. N. and Tikhonova, N. A. (2017b). *Mechanisms of dangerous sea level rises in the Gulf of Finland*. St. Petersburg: Peterburg XXI vek Publ. (In Russian)
Zakharchuk, E. A., Sukhachev, V. N. and Tikhonova, N. A. (2020). Spatial structure and propagation of the Neva river flood waves. *Russian Meteorology and Hydrology*, 4, 42–53. (In Russian)

Received: January 12, 2021
Accepted: October 19, 2021

Contact information:

Evgeny A. Zakharchuk — eazakharchuk@yandex.ru
Vladimir N. Sukhachev — syhachev@mail.ru
Natal'ia A. Tikhonova — nata-tik@yandex.ru