

О ВЛИЯНИИ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНЫХ ЦИКЛОНОВ НА ЧАСТОТУ ОПАСНЫХ ПОДЪЕМОВ УРОВНЯ МОРЯ НА ВОСТОКЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

*д-р геогр. наук Е.А. ЗАХАРЧУК^{1,2}, аспирант В.Н. СУХАЧЕВ^{1,2},
канд. геогр. наук Н.А. ТИХОНОВА¹*

¹ — Санкт-Петербургское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова», e-mail: spbsoi@rambler.ru

² — Санкт-Петербургский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

12 августа 2011 г. состоялось официальное открытие Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС), в рамках которого функционирует автоматизированная система предупреждения угрозы наводнений (СПУН). Ввод в эксплуатацию КЗС позволил обеспечить защиту Санкт-Петербурга от наводнений. Однако проблема опасных подъемов уровня моря остается насущной для районов Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных к западу от КЗС. Здесь во время наводнений подвержены подтоплению прибрежные районы, размывается береговая линия, участки шоссежных дорог, наносится ущерб объектам, построенным в береговой полосе.

Статистические данные о произошедших в Санкт-Петербурге наводнениях свидетельствуют, что их число в конце XX и начале XXI века заметно возросло. Ре-

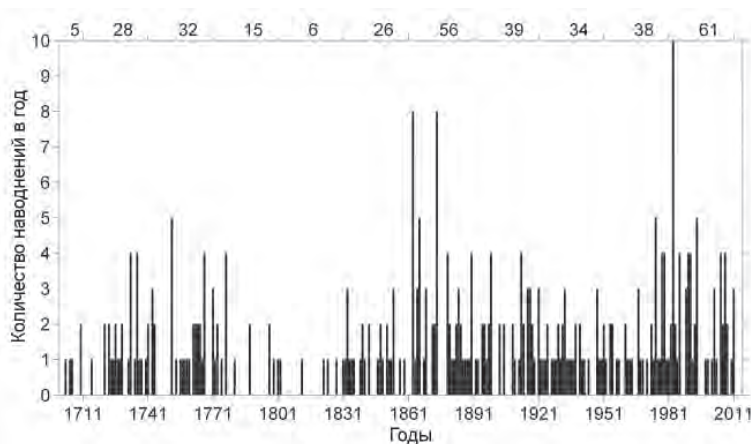


Рис. 1. Распределение случаев невыходов наводнений по годам по данным К.С. Померанца (Померанец, 2009). На верхней шкале указано количество наводнений, произошедших за каждые тридцать лет.

зультаты, представленные на рис. 1, показывают, что за последние 30 лет количество наводнений в устье Невы увеличилось в 1,6 раза.

Считается, что физические механизмы формирования наводнений в устье Невы на сегодняшний день хорошо изучены. Их описанию посвящено большое количество научных и научно-популярных статей и монографий. Однако механизм межгодовой изменчивости частоты опасных подъемов уровня моря на востоке Финского залива остается все еще непонятным.

А.Е. Антоновым (Антонов, 2001) исследовалась зависимость межгодовых изменений числа и интенсивности невских наводнений от различных индексов атмосферной циркуляции, солнечной активности, планетарно-космических и региональных гидрометеорологических процессов. Разработанные автором на основе этих предикторов долгосрочные прогнозы невских наводнений не подтверждаются временем.

Одна из гипотез увеличения частоты наводнений в последние десятилетия может быть связана с долгопериодными изменениями характеристик атмосферных циклонов. Действительно, наши знания о механизмах генерации наводнений в устье Невы дают веские основания предполагать, что межгодовая изменчивость аномобарических сил в циклонах, их численности, траекторий и скоростей движения должны, по-видимому, влиять и на изменения частоты опасных подъемов уровня моря на востоке Финского залива.

Характеристики атмосферных циклонов над Балтикой исследовались за период 1948–2002 гг. в работе (Sepp, 2009). Автором было показано, что в долгопериодных изменениях количества глубоких циклонов (давление в центре < 1000 гПа) наблюдается значимый положительный линейный тренд. Наибольшее количество глубоких циклонов отмечалось в 1973 г. (32), а наименьшее — в 1996 (6) и 1953 (8) гг. В изменениях атмосферного давления в центрах глубоких циклонов наблюдался значимый отрицательный линейный тренд, свидетельствующий о том, что их глубина за период с 1948 по 2002 г. увеличилась в среднем на 2,2 гПа.

В работе (Гордеева, Малинин, 2012) оценивалось количество циклонов, траектории которых проходили через район, ограниченный 59–66° с.ш. и 21–30° в.д. за период с 1958 по 2008 г. Результаты показали, что в межгодовой изменчивости циклонов проявляется нелинейный тренд: до середины 1980-х гг. число циклонов росло, а затем стало уменьшаться. Значения коэффициентов корреляции между числом невских наводнений и количеством циклонов оказались низкими (0,28 ÷ 0,32). Квантильный анализ не выявил заметных межгодовых изменений в траекториях движения всех циклонов, проходящих через выбранный авторами район. Однако для «наводненческих» циклонов на меридиане Гринвича отмечалось заметное (около 1000 км) смещение к северу медианы траекторий между периодами 1958–1975 и 1976–2008 гг., в то время как на меридиане Санкт-Петербурга это смещение было незначительным по сравнению с размерами атмосферных циклонов. К недостаткам данной работы следует отнести малую репрезентативность района, в котором оценивались характеристики циклонов, так как согласно историческим сведениям траектории движения «наводненческих циклонов» могут проходить как севернее, так и южнее выбранного авторами района (Макринова, 1954).

Цель данной статьи — на основе статистического анализа метеорологических данных современных информационных источников оценить зависимость межгодовых изменений частоты опасных подъемов уровня моря на востоке Финского залива от разнообразных параметров атмосферных циклонов, таких, как их количество, глубина, траектории и скорости движения, скорости ветра в циклоне.

ДАнные И МЕТОды

Для статистического анализа использовалась следующая исходная информация:

- 1) срочные (4 раза в сутки) данные о динамике барических образований в атмосфере, полученные на основе реанализа метеорологических полей с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ для периода 1948–2013 гг. (NCEP/NCAR Reanalysis),
- 2) данные реанализа метеорологических полей с пространственным разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ для периода 1979–2009 гг. (NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2)),
- 3) срочные (4 раза в сутки) данные инструментальных измерений ветра на гидрометеорологической станции Выборг с 1985 по 2007 г.,
- 4) архив характеристик циклонической активности в Северном полушарии с 1958 по 2008 г. с временным интервалом 6 часов (Northern Hemisphere Cyclone Locations and Characteristics from NCEP/NCAR Reanalysis Data/ Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center (<http://nsidc.org/data/nsidc-0423>)).

Вначале было оценено изменение во времени дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления $\text{grad}P_a(t)$ в циклонах как показателя их интенсивности. Для этого по данным реанализа NCEP/NCAR (NCEP/NCAR Reanalysis) для региона, ограниченного координатами $20\text{--}90^\circ$ с.ш., 80° з.д. – 60° в.д., выбирались срочные поля значений атмосферного давления на уровне моря (P_a). Для каждого поля P_a оценивались положительные (антициклоны) и отрицательные (циклоны) неоднородности, путем исключения среднего по полю значения $\overline{P_a}$. Для отрицательных неоднородностей рассчитывался горизонтальный градиент P_a ($\text{grad}P_a$). Так как $\text{grad}P_a(t)$ – векторный процесс, для оценки его интенсивности рассчитывался линейный инвариант тензора дисперсии $\text{grad}P_a$ (Методическое письмо, 1984):

$$I_1(t)_{\text{grad}P_a} = D_u(t) + D_v(t), \quad (1)$$

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

Исследование межгодовой изменчивости траекторий движения атмосферных циклонов над Балтийским морем производилось сотрудниками СПО ГОИН в рамках темы 1.5.4.3 ЦНТП Росгидромета «Научные исследования и разработки в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды в 2011–2013 гг.». Для этого использовались данные атмосферного давления с пространственным разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ за период с 1979 по 2011 г. (NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2)). Для анализа был выбран район, ограниченный координатами: $36\text{--}90^\circ$ с.ш., 80° з.д. – 60° в.д. Согласно методике, изложенной в работах (Акперов, 2007; Бардин, Полонский, 2005), циклоны выделялись для каждого синоптического срока в поле атмосферного давления как области пониженного давления, ограниченные замкнутыми изобарами. Определялись координаты их центров. Для обобщения полученных результатов применительно к региону Балтийского моря в районе, ограниченном координатами $0\text{--}30^\circ$ в.д., $50\text{--}72^\circ$ с.ш., проводился пространственно-временной квантильный анализ положений центров циклонов.

Для исследования межгодовых изменений количества атмосферных циклонов, их глубины и скоростей перемещения использовался архив характеристик циклонической активности в Северном полушарии с 1958 по 2008 г. (Northern Hemisphere Cyclone...). Алгоритм получения параметров циклонов, содержащихся в этом архиве, подробно описан в работе (Serreze et al., 1997). Нами был выбран район, ограничен-

ный координатами 14–40° в.д., 54–72° с.ш. На выбор этого района повлияли имеющиеся сведения о траекториях движения «наводненческих» циклонов (Макринова, 1954). Хорошо известно, что в 90 % случаев наводнения в устье Невы происходили в осенне-зимний период, а циклоны, вызывающие наводнения, перемещались только с восточной составляющей скорости. Поэтому такие же ограничения принимались нами при исследовании изменчивости характеристик атмосферных циклонов.

Считается, что важным сопутствующим фактором при формировании опасных подъемов уровня являются дующие в тылу циклонов над Финским заливом сильные западные и юго-западные ветры, создающие значительный ветровой нагон уровня моря, совмещающийся с гребнем длиной гравитационной волны (Лабзовский, 1971). Согласно статистическим данным, наибольшее количество наводнений в устье Невы происходит при ветрах западных и юго-западных направлений, имеющих скорости около 12 м/с (Макринова, 1954). Для оценки межгодовой изменчивости ветра по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II (NCEP/DOE AMIP-II) проводился квантильный анализ скорости ветра, имеющего направления от юго-западного до западного. Для каждого года оценивалось также количество случаев $N_w(t)$, когда скорости ветра указанных направлений превышали 11 м/с.

Характеристики линейного и нелинейного трендов метеорологических параметров рассчитывались с помощью метода наименьших квадратов. Сравнительный вклад тренда в общую дисперсию процесса определялся путем проверки значимости коэффициента детерминации по критерию Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

На рис. 2 приведены изменения во времени оценок $I_1(t)_{\text{gradPa}}$ в циклонах для различных точек Балтийского моря. Можно выделить три региона, различающиеся по долгопериодным тенденциям изменений $I_1(t)_{\text{gradPa}}$: район юго-западной и центральной Балтики, Ботнический и Финский заливы. В первом из них значимые положительные линейные тренды в оценках $I_1(t)_{\text{gradPa}}$, свидетельствующие об увеличении глубины циклонов, отмечаются только в южной части моря. Однако все нелинейные тренды в первом районе — значимые, и их анализ показывает, что с середины 1980-х гг. наметилась тенденция уменьшения интенсивности циклонов над этой акваторией Балтики. В районе Ботнического залива все тренды в оценках $I_1(t)_{\text{gradPa}}$ не являются значимыми, за исключением нелинейного тренда на юге залива, который показывает, что до 1980 г. отмечалось уменьшение интенсивности циклонов, а в дальнейшем их глубина начала увеличиваться. Над акваторией Финского залива все тренды не являются значимыми.

На рис. 3 представлен результат квантильного анализа положений центров атмосферных циклонов. Этот анализ не выявил значительных изменений в траекториях их движения над Балтийским морем. В межгодовых изменениях медианы местоположения центров циклонов $MeC_{zn}(t)$ отмечаются 2–4-летние колебания и слабо выраженный положительный линейный тренд, который не является значимым.

Рис. 4 иллюстрирует результаты квантильного анализа оценок глубины атмосферных циклонов, имеющих давление в центре ≤ 1005 гПа, которые перемещались только с восточной составляющей скорости в осенне-зимние месяцы (сентябрь–февраль). В оценках медианы $MeD_{zn}(t)$ и минимальных значений $MinD_{zn}(t)$ наблюдаются слабые отрицательные линейные тренды, которые не являются значимыми, в то время как анализ квадратичных трендов показал их значимость, свидетельствующую, что до середины 1980-х гг. глубина атмосферных циклонов увеличивалась, а затем начала

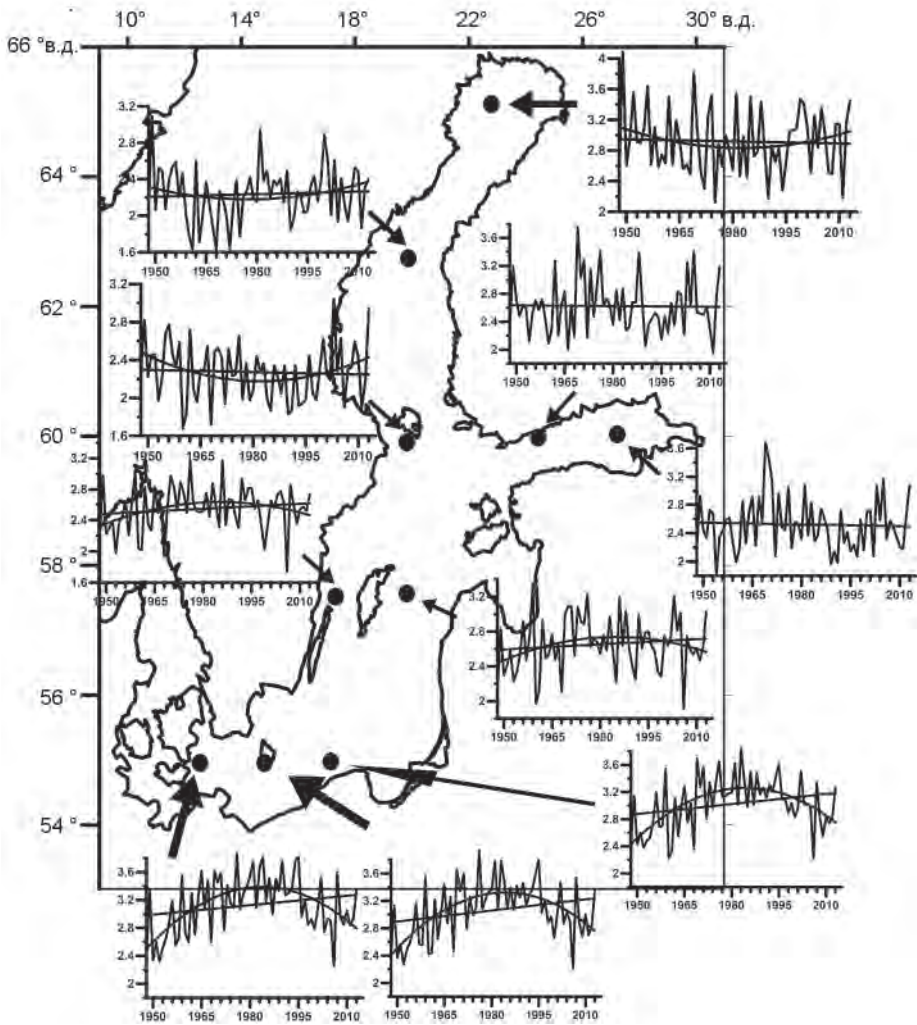


Рис. 2. Оценки линейного инварианта тензора дисперсии горизонтального градиента атмосферного давления в циклонах над акваторией Балтийского моря в период 1948–2013 гг. Размерность вертикальных шкал на графиках — $(\text{гПа/м})^2 \cdot 10^{-5}$.

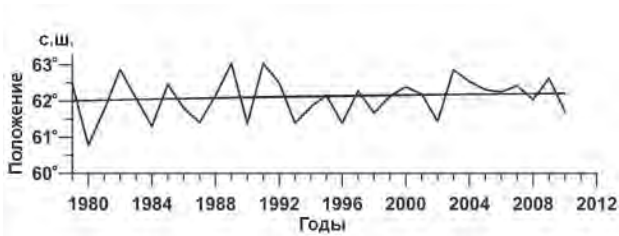


Рис. 3. Изменение во времени медианы местоположения центров циклонов $MeC_{2n}(t)$ в регионе 0–30° в.д., 50–72° с.ш.

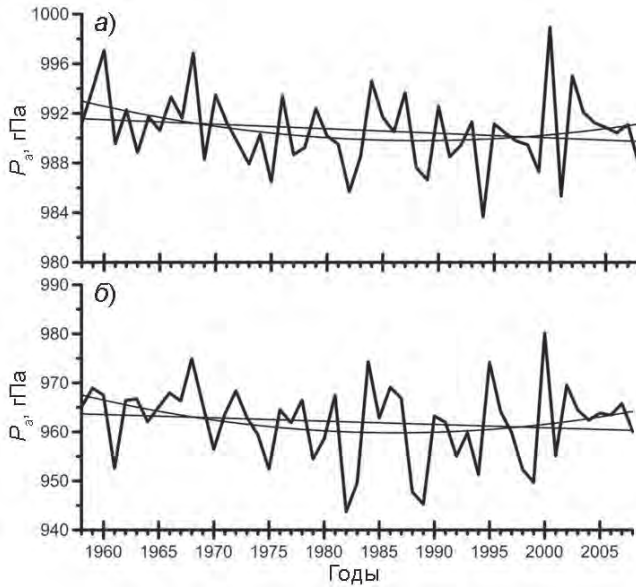


Рис. 4. Изменение во времени медианы $MedD_{zn}(t)$ (а) и минимумов $MinD_{zn}(t)$ (б) оценок атмосферного давления в центре циклонов ≤ 1005 гПа, которые движутся только с восточной составляющей скорости в осенне-зимние месяцы (сентябрь–февраль).

уменьшаться. В оценках количества глубоких циклонов $N_{990}(t)$ (с давлением в центре ≤ 990 гПа) отмечается незначимый положительный линейный тренд (см. рис. 5), однако квадратичный тренд значим, и он показывает, что до середины 1990-х гг. доля глубоких циклонов в осенне-зимний период увеличивалась, после чего наметилась тенденция к их уменьшению.

При описании физических механизмов формирования наводнений в устье Невы большое значение придается скоростям движения атмосферных циклонов. При совпадении их скорости со скоростью распространения свободной длинной волны в поле уровня моря происходит резонанс, что приводит к особенно значительному увеличению ее амплитуды (Лабзовский, 1971). На рис. 6 представлены результаты квантильного анализа оценок скорости движения атмосферных циклонов с сентября по февраль. Видно, что максимальные скорости перемещения циклонов достигают

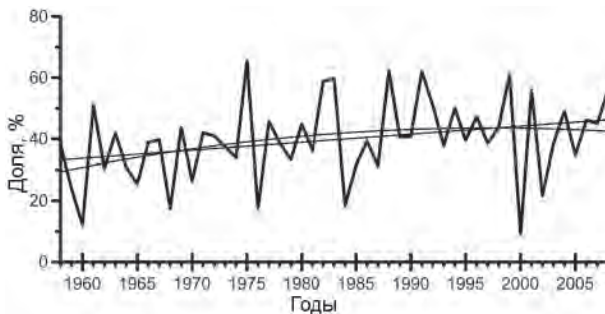


Рис. 5. Доля (%) глубоких атмосферных циклонов $N_{990}(t)$ с давлением в центре ≤ 990 гПа от их общего числа в период с сентября по февраль.

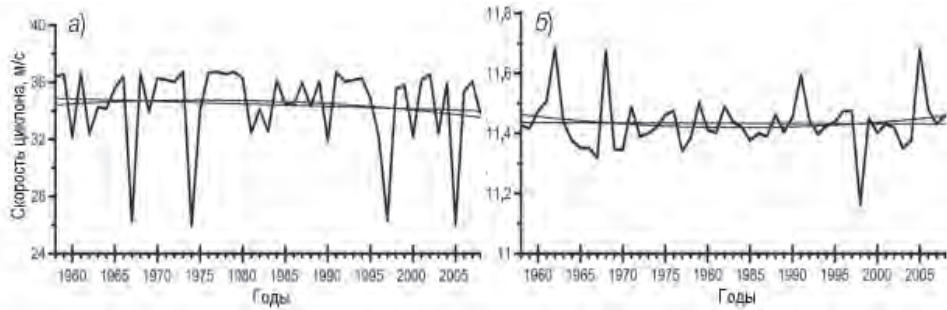


Рис. 6. Результаты квантильного анализа скорости движения атмосферных циклонов: а) максимальные значения $MaxV_{zn}(t)$, б) медиана $MeV_{zn}(t)$.

36,5 м/с, а медианные варьируют от 11,2 до 11,7 м/с. Долгопериодные тенденции в изменчивости этой характеристики не выявляют значительных изменений: линейные и квадратичные тренды в оценках скорости движения циклонов не являются значимыми.

В нашей работе на основе фурье-анализа измерений уровня на материковых и островных станциях в Финском заливе было показано, что в периоды формирования опасных подъемов уровня моря скорости распространения волн наводнений варьируют от 4,5 до 11,2 м/с (Захарчук, Тихонова, 2011). В связи с этим представляется полезным оценить количество случаев, когда возможен резонанс между анемобарическими силами в перемещающихся над Балтикой циклонами и свободными длинными волнами в поле уровня моря. Такой резонанс возможен, когда скорости движения атмосферных циклонов близки к фазовым скоростям распространения волн наводнений (Лабзовский, 1971; Захарчук, Тихонова, 2011). На рис. 7 представлен график изменения во времени количества случаев $NV_{Rez}(t)$ в осенне-зимние периоды, когда атмосферные циклоны двигались со скоростями 4,5–11,2 м/с. В этих оценках отмечается слабый положительный линейный тренд, который не является значимым, в то время как значимый квадратичный тренд показывает, что до начала 1990-х гг. количество случаев увеличивалось, а после этого периода наметилась тенденция к уменьшению их количества.

На рис. 8 приведены результаты оценок характеристик ветра на востоке Финского залива, свидетельствующие, что в последние десятилетия не отмечается тренда в долгопериодных изменениях средних ветров западных и юго-западных направлений (рис. 8а), однако наблюдается значимый отрицательный линейный тренд в изменениях максимумов этих ветров (рис. 8б), который подтверждается инструментальными

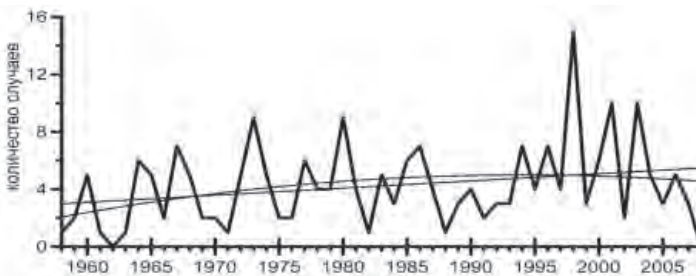


Рис. 7. Количество случаев $NV_{Rez}(t)$ в сентябре–феврале, когда атмосферные циклоны двигались со скоростями 4,5–11,2 м/с.

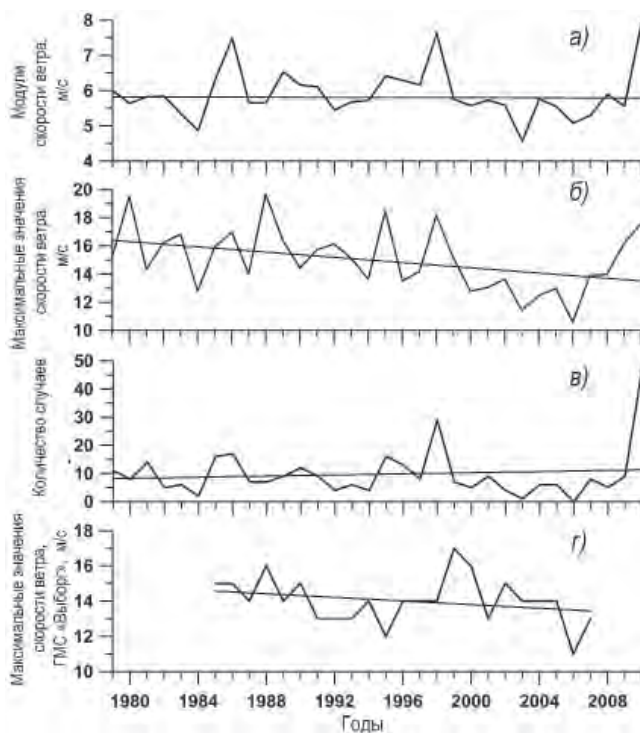


Рис. 8. Среднегодовые значения модуля скорости западных и юго-западных ветров на востоке Финского залива в точке 60° с.ш., 27° в.д. (а), максимальные значения этих ветров (б), количество случаев ветров этих направлений со скоростями > 11 м/с (в) и максимальные значения ветра на ГМС «Выборг» в период 1985–2007 гг. (г).

Таблица 1

Результаты взаимного корреляционного анализа между изменениями количества наводнений в устье Невы $\eta(t)$ и различными метеорологическими предикторами

$\eta(t) \times$ метеорологический предиктор	Максимальный коэффициент корреляции
$\eta(t) \times I_1(t)_{\text{gradPa}}$	0,004
$\eta(t) \times MeC_{Zn}(t)$	0,341
$\eta(t) \times MeD_{Zn}(t)$	0,317
$\eta(t) \times MinD_{Zn}(t)$	0,314
$\eta(t) \times N_{990}(t)$	0,390
$\eta(t) \times MaxV_{Zn}(t)$	0,061
$\eta(t) \times MeV_{Zn}(t)$	0,170
$\eta(t) \times NV_{Rez}(t)$	0,025
$\eta(t) \times MaxW(t)$	0,055
$\eta(t) \times N_w(t)$	0,335

Примечания: $I_1(t)_{\text{gradPa}}$ — линейный инвариант градиента атм. давления, $MeC_{Zn}(t)$ — медиана оценок положений центров циклонов; $MeD_{Zn}(t)$ — медиана оценок глубины циклонов; $MinD_{Zn}(t)$ — оценки минимумов атм. давления в центрах циклонов; $N_{990}(t)$ — количество циклонов с давлением в центре менее 990 мб; $MaxV_{Zn}(t)$ — изменчивость максимумов в скоростях движения циклонов; $MeV_{Zn}(t)$ — изменения медианы скорости движения циклонов; $NV_{Rez}(t)$ — количество случаев движения циклонов со скоростями от 4,5 до 11,2 м/с; $MaxW(t)$ — изменения максимумов скорости западных и юго-западных ветров; $N_w(t)$ — количество случаев, когда скорость западных и юго-западных ветров была ≥ 11 м/с.

измерениями ветра на ГМС «Выборг» (рис. 8з). В межгодовой изменчивости количества случаев западных и юго-западных ветров, имеющих скорости более 11 м/с, наблюдается слабый положительный тренд, который не является значимым.

Для дальнейшего исследования взаимосвязи характеристик атмосферных циклонов с межгодовой изменчивостью численности невских наводнений между ними был проведен взаимный корреляционный анализ. В табл. 1 представлены коэффициенты максимальной корреляции между количеством наводнений в устье Невы и выбранными метеорологическими предикторами. Они показывают, что не отмечается взаимосвязи между частотой опасных подъемов уровня моря на востоке Финского залива и различными характеристиками атмосферных циклонов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты статистического анализа метеорологической информации не подтверждают гипотезы о влиянии межгодовой изменчивости разнообразных характеристик атмосферных циклонов на увеличение частоты наводнений в устье Невы в последние десятилетия. Если бы рост количества опасных подъемов уровня на востоке Финского залива был связан только с оцененными нами метеорологическими параметрами, мы наблюдали бы подобную тенденцию и в их изменчивости. Однако проведенный нами анализ метеорологических характеристик показывает отсутствие значимых линейных трендов в изменениях глубины циклонов, их количества, траекторий и скоростей их движения, числе случаев сильных ветров западных и юго-западных направлений, а также наличие значимого отрицательного тренда в межгодовой изменчивости максимумов этих ветров.

Опровержением только «метеорологической» природы отмечающихся долгопериодных тенденций в изменениях количества невских наводнений служат и представленные в табл. 1 результаты взаимного корреляционного анализа между количеством наводнений и различными характеристиками динамики циклонов, оцененными для региона Балтийского моря, которые свидетельствуют об отсутствии связи между указанными процессами.

Полученные выше результаты свидетельствуют о том, что только интенсивности анемобарических сил в глубоких циклонах и изменчивости других их параметров недостаточно для возбуждения опасных подъемов уровня моря. По-видимому, здесь также большое значение имеют условия морской среды, в которых генерируются и эволюционируют волны невских наводнений.

В предыдущих наших работах на основе теоретических и эмпирических исследований было показано, что волны невских наводнений идентифицируются как бароклинные топографические волны (Захарчук, Тихонова, 2011; Захарчук, Сухачев, 2013). Поэтому можно предположить, что межгодовая изменчивость бароклинных условий Балтийского моря оказывает заметное влияние на частоту опасных подъемов уровня на востоке Финского залива. Силы тангенциального напряжения ветра и горизонтального градиента атмосферного давления в глубоких циклонах выводят термодинамическую систему Балтики из равновесного состояния на частоте ее собственных колебаний, формируя возмущение уровня моря, релаксация которого в низкочастотном диапазоне частот происходит в виде бароклинных топографических волн, распространяющихся на восток в Финский залив. Однако для аномального роста их амплитуды, влияющего в конечном счете на опасный подъем уровня в Невской губе, необходимы благоприятные бароклинные условия бассейна.

Не вызывает сомнения, что наблюдающееся в последние десятилетия в результате глобального потепления климата увеличение температуры Балтийского моря влияет и на изменение бароклинных условий его бассейна, которые стали, по-видимому, более благоприятными для генерации бароклинных топографических волн, формирующих наводнения на востоке Финского залива. Эта гипотеза требует дополнительных, более подробных исследований.

Работа выполнена при поддержке грантов СПбГУ № 18.37.140.2014, № 18.50.2101.2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М., Голицын Г.С., Мохов И. И. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа и модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. ФАО. 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.

Антонов А.Е. Климатология экстраординарных невских наводнений и их прогнозирование. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 96 с.

Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. 2005. Т. 41. № 2. С. 3–13.

Гордеева С.М., Малинин В.Н. О типизации траекторий циклонов, приводящих к невским наводнениям // Общество. Среда. Развитие (Тerra Humana). 2012. № 2. С. 187–193.

Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 54–64.

Захарчук Е.А., Сухачев В.Н. К вопросу об идентификации волн невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 66–73.

Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 238 с.

Макринова О.В. Природа ленинградских наводнений // Труды ГГИ. 1954. Вып. 23. С. 5–36.

Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов скоростей течений и ветра / Под ред. В.А. Рожкова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 61 с.

Померанец К.С. Несчастья невских берегов. Из истории петербургских наводнений. М.: Центр-полиграф, 2009. 430 с.

NCEP/NCAR Reanalysis. NOAA National Center for Environmental Prediction. Data Management NOAA/ESRL/PSD. 325 Broadway. Boulder. CO 80305–3328.

NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2). NOAA's National Centers for Environmental Prediction. URL: http://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/cmd_pgbh [дата обращения 01.03.2014].

Northern Hemisphere Cyclone Locations and Characteristics from NCEP/NCAR Reanalysis Data/ Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. URL: <http://nsidc.org/data/nsidc-0423> [дата обращения 01.03.2014].

Sepp M. Changes in frequency of Baltic sea cyclones and their relationships with NAO and climate in Estonia // Boreal Environment Research. 2009. Vol. 14. P. 143–151.

Serreze M.C., Carse F., Barry R.G., Rogers J.C. Icelandic Low Cyclone Activity: Climatological Features, Linkages with the NAO, and Relationships with Recent Changes in the Northern Hemisphere Circulation // Journal of Climate. 1997. Vol. 10. P. 453–464.