

УДК 551.482.6

ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ р. ОДРЫ¹

©2025 г. М. В. Михайлова*

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

**e-mail: mv.mikhailova@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.

После доработки 29.08.2024 г.

Принята к публикации 02.09.2024 г.

Дана общая географическая характеристика бассейна Одры и ее устьевой области, включающей устьевой участок реки, лагуну и устьевое взморье, приведены краткие сведения о современном гидрологическом режиме реки и гидрологических особенностях Щецинской лагуны и Поморской бухты. Показано, что во второй половине XX в. вследствие активизации циклонической деятельности над Балтийским морем на побережье Поморской бухты и в устье реки участились случаи штормовых нагонов. Описаны особенности штормовых нагонов в Щецинской лагуне и на устьевом участке Одры.

Ключевые слова: река, море, устьевая область, устьевой участок, Щецинская лагуна, Поморская бухта, уровень моря, штормовой нагон.

DOI: 10.31857/S0321059625020048 **EDN:** UCQAMN

Продолжающееся и усиливающееся глобальное потепление климата сопровождается существенными изменениями всех компонентов гидроклиматической системы Земли, в том числе изменениями морских факторов, воздействующих на режим, строение и экологические условия устьев рек [20]. В 1901–2020 гг. уровень Мирового океана повысился на 21 см. Из-за увеличения температурных контрастов над океанами и над сушей усилилась циклоническая активность. Возросла частота и сила штормовых ветров в устьях рек и вызываемых ими штормовых нагонов и морского волнения [4].

В научной литературе, как зарубежной, так и отечественной, нет четкой дефиниции штормового нагона; его определяют по-разному в зависимости от принятых критериев. По [13], “штормовой нагон — это повышение уровня воды на побережье океана, вызванное проходящим штормом (циклоном), превышающее уровень астрономического прилива...”. В [19] “штормовой нагон — поднятие уровня в море или эстуарии, вызванное прохождением центра низкого давления”. Согласно [11], “нагон — повышение уровня воды у берега водоема, в устье реки или берега моря, сопровождающееся на-

воднением, под действием сильного ветра, дующего в направлении одного из берегов, что вызывает волну большого периода, или (в основном в море) движением тропического циклона или штормового циклона в средних широтах, когда в дополнение к ветру на водную поверхность воздействует разность атмосферного давления”.

В [30] дается такое определение: “Штормовые нагоны — это колебания уровня воды в прибрежном или внутреннем водоеме в диапазоне от нескольких минут до нескольких дней в результате воздействия атмосферных погодных систем”. Согласно этому определению, исключаются так называемые ветровые волны и волны зыби, периоды которых порядка нескольких секунд. Термин “штормовой нагон” начал широко использоваться в европейской литературе в работах, посвященных изменениям уровня в Северном море. В североамериканской литературе для обозначения этого же явления также применяются термины “ветровой прилив” и “штормовой прилив” [30].

Итак, нагонные волны возникают в океане под влиянием синоптических процессов (изменяющихся горизонтальных градиентов атмосферного давления и скоростей ветра). Во время сильного и устойчивого нагонного ветра в приглубой прибрежной зоне приемного водоема

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2025-0001).

уровень воды повышается на величину, зависящую от наклона водной поверхности на устьевом взморье, длины разгона ветра, направленной к берегу проекции скорости ветра, коэффициента трения ветра о воду и глубины.

Наблюдения показывают, что нагоны обычно приобретают максимальные величины в районе морского края дельты и в прилегающих частях устьевого взморья, откуда их величины уменьшаются как в сторону реки, так и открытого приемного водоема. Проникая в ограниченные морские акватории и, тем более, в узкие заливы и эстуарии рек, нагонные волны теряют связь с вынуждающими их силами и превращаются в свободные инерционные волны, движущиеся вверх по устьевым участкам рек и рукавам дельты. Формулы для определения величины и дальности распространения нагона приведены в [6].

Воздействию сильных штормовых нагонов подвергается и устьевая область Одры (лагуна, устьевой участок реки и устьевое взморье). Положение Балтийского моря на пути передвижения систем низкого давления в восточном направлении благоприятствует возникновению штормовых нагонов. Наиболее опасные штормовые нагоны отмечаются вдоль юго-западного и восточного побережья Балтики, в частности — на побережье Поморской бухты и в Щецинской лагуне.

Интересно, что в [33] поднимается вопрос: можно ли считать Щецинскую лагуну эстуарием. По мнению авторов, в период Литориновой трансгрессии Пре-Одра, впадающая в Балтийское море, могла иметь эстуарий, однако в дальнейшем в результате постепенного формирования берегового барьера возник водоем, для которого характерны низкая соленость, отсутствие приливов и беспрепятственного водообмена между рекой и морем, что должно быть типичным для эстуариев. Опираясь на разные классификации, авторы относят Щецинскую лагуну к “ограниченным лагунам” по [23] или “полузакрытым лагунам” по [32].

За рубежом есть множество классификаций эстуариев, основанных на различных признаках, часто противоречащих друг другу. Обзор этих ти-

пизаций эстуариев приведен в [1]. В современной российской гидрологии устьев рек принято уточненное классическое определение этого объекта Д. Притчарда: “Эстуарий — это полузамкнутая система водоемов и водотоков в пределах устьевой области реки, которая постоянно или периодически сообщается с приемным водоемом (океаном, морем, озером), внутри которой в результате смешения пресных речных и солоноватых или соленых морских (или озерных) водных масс формируется барьерная зона с соленостью от 1 до 8‰”. Согласно этому определению и на основе сведений о морфологических и гидрологических особенностях лагуны относим Щецинскую лагуну к эстуариям лагунного типа, а всю устьевую область — к эстуарной [2, 6].

В последние десятилетия польскими и немецкими специалистами проведены крупномасштабные исследования устья Одры и происходящих здесь гидрологических процессов [12, 14–16, 21, 22, 24–31, 33–39].

Для российских специалистов в области изучения устьев рек результаты исследования устьевой области Одры могут представлять познавательный интерес: в отечественной научной литературе сведений об этом объекте нет. Задача статьи — аналитический обзор результатов новых гидрологических исследований в устье Одры. Эта статья продолжает серию публикаций, организованную В.Н. Михайловым по гидрологии устьев зарубежных рек, недостаточно известных в России. В этих статьях, написанных по единой методике, но с акцентом на гидролого-морфологических процессах конкретного устья, уже обсуждались особенности гидрологического режима и дельтоформирования в устьях балтийских рек Нямунас и Висла [8, 9], а также процессы взаимодействия приливов и штормовых нагонов в эстуариях Темзы и Эльбы [5, 7].

ОДРА И ЕЕ УСТЬЕВАЯ ОБЛАСТЬ

Одра (чешск. и польск. Odra, нем. Oder) — река в Европе, в Чехии, Польше и ФРГ (на значительном протяжении пограничная между ними). Из 250 рек, впадающих в Балтийское море, Одра занимает третье место по площади бассейна и четвертое — по длине (табл. 1).

Таблица 1. Некоторые характеристики крупных рек, впадающих в Балтийское море, по [8–10, 17, 25, 34, 35]. Прочерк — отсутствие данных

Река	Площадь бассейна, тыс. км ²	Длина, км	Расход воды, м ³ /с	Сток воды, км ³ /год	Сток взвешенных наносов, млн т/год
Нева	281.6	74	2490	78.6	0.622
Висла	198.5	1047	1020	32.2	1.5–2.2
Одра	118.8	854	512	16,2	0.380
Нямунас /Неман	98.2	937	532	16.8	0.164
Даугава/Западная Двина	87.9	1020	694	21.9	—

Одра берет начало в горах Одерске-Врхи (отроги Восточных Судет) в Чехии. В верховье имеет характер горной реки, течет в направлении на СВ; при выходе на Среднеевропейскую равнину следует на СЗ в террасированной долине. Ниже устья р. Ныса-Лужицка течет в северном направлении. Основные притоки: Мала-Панев, Видава, Барыч, Обжица, Варта (правые); Опава, Ныса-Клодзка, Олава, Сленжа, Быстшица, Качава, Бубр, Ныса-Лужицка (Нейсе) (левые).

Река судоходна до места впадения притока Опава (Чехия), для крупных судов — до г. Кендзежин-Козле (Польша), где река канализована и шлюзована. Одра соединена каналами Одер—Шпре и Одер—Хафель с бассейном Эльбы; Быдгошским (Бромбергским) каналом через реки Нотець (приток р. Варта) и Брда (приток р. Висла) — с бассейном Вислы. По Гливицкому каналу воды Одры поступают в Верхнесилезский каменноугольный бассейн. Крупнейшие порты в Щецинской лагуне — Щецин и Свиноуйсьце. На реке расположены крупные города: Острава (Чехия), Ополе, Вроцлав, Щецин (Польша), Франкфурт-на-Одере (Германия).

В соответствии с принятыми в российской гидрологии типизацией и районированием устьевых областей рек [3], обширная устьевая область Одры относится к эстуарному типу и включает в себя устьевую участок реки от г. Тшебез до г. Гоздовице (0 и 118 км от лагуны соответственно), водоем эстуарного типа (Щецинскую лагуну) и устьевое взморье (часть Поморской бухты Балтийского моря) (рис. 1а).

Гидрографическая сеть устьевой области довольно сложна. Ниже г. Видухова Одра разделяется на два рукава: Восточную Одру и Западную

Одру, — соединенных протоками и каналами. Восточная Одра, в свою очередь, делится на правый рукав — Регалицу, протекающий через дельтовое оз. Домбе (площадь 56.5 км²) [25], и левый, соединяющийся с Западной Одрой. Около г. Полице Восточная Одра и Западная Одра сливаются, и далее Одра впадает в Щецинскую лагуну около г. Тшебез.

Щецинская лагуна (на российских картах Щецинский залив) имеет площадь 686.9 км² [25, 34], объем 2.58 км³ [16], длину 20 км, ширину ~ 52 км [22], длину береговой линии 243 км [16]. Щецинскую лагуну (рис. 1б) делят на две части: восточную — Большую лагуну (польск. Wielki Zalew) в пределах Польши (площадь 409.7 км², максимальная глубина ~ 6 м), западную, более мелкую — Малую лагуну (нем. Kleines Haff) в пределах ФРГ (277.2 км²) [25] (рис. 2). Средняя глубина лагуны 3.8 м, максимальная естественная глубина в сужении между Большой лагуной и Малой лагуной составляет 8.5 м [22]. Дно в центральной части Щецинской лагуны (глубина 4.5–5.5 м) покрыто илом; илистые части лагуны окружены песчаными отмелями на глубине 1–1.5 м [22].

Лагуна отделена от Поморской бухты двумя большими островами — Узедом (польск. Узнам) и Волин. Водообмен лагуны с Поморской бухтой осуществляется через три узких пролива: Пенештром, Свину и Дзивну. Пролив Пенештром (длина 46 км) соединяет Малую лагуну с Поморской бухтой, на входе в которую ширина пролива достигает 350 м [25]. Дзивна (длина 30 км) соединяет Большую лагуну с Поморской бухтой; на входе в бухту ширина Дзивны 100–150 м [25]. Свина (длина 16.3 км), главный пролив между лагуной и Поморской бухтой, вместе с каналом

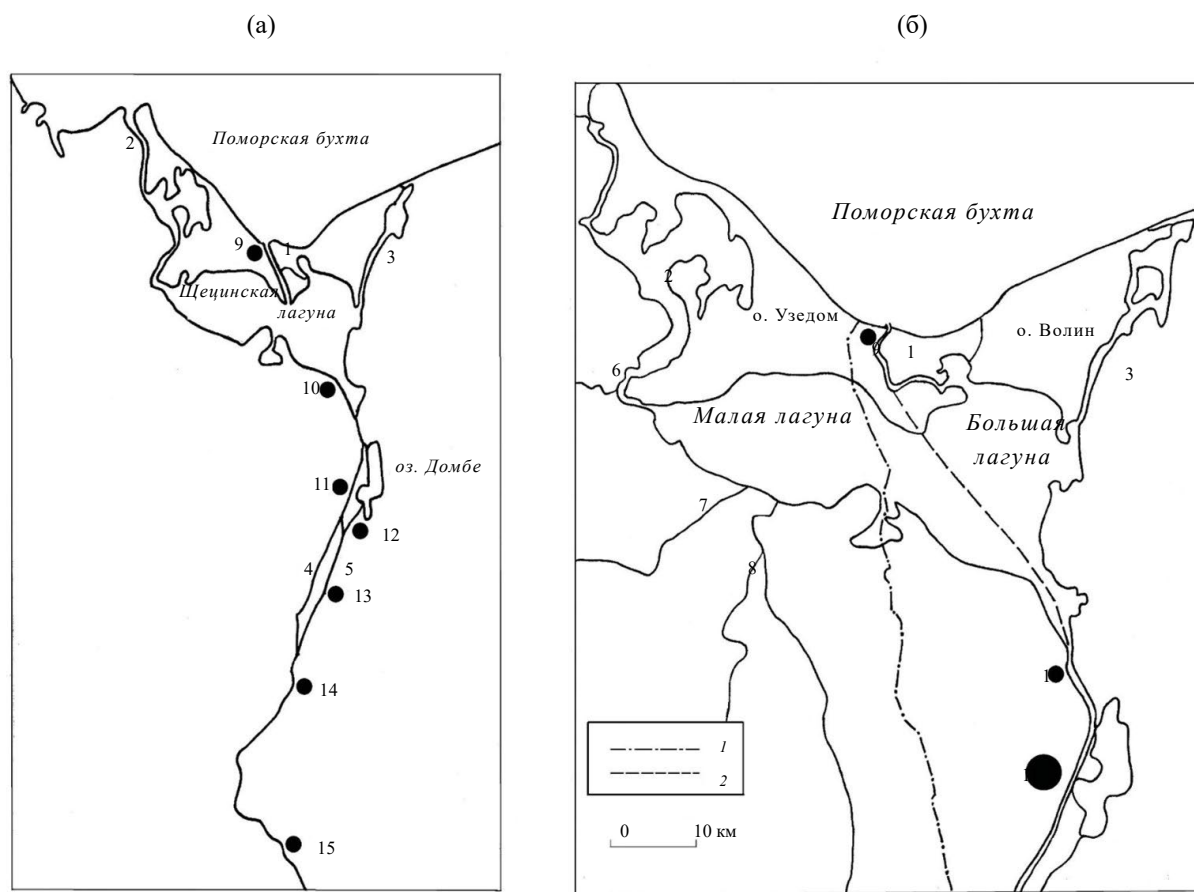


Рис. 1. Картохема устьевой области р. Одры (а) и Щецинской лагуны (б). Проливы: 1 – Свина, 2 – Пенештрот, 3 – Дзивна; рукава: 4 – Западная Одра, 5 – Восточная Одра; реки: 6 – Пене, 7 – Зарев, 8 – Иккер; города и г/п: 9 – Свиноуйсьце, 10 – Тшебез, 11 – Щецин, 12 – Подючи, 13 – Грыфино, 14 – Видухова, 15 – Гоздовице. 1 – граница Польши и ФРГ, 2 – судоходный канал Свиноуйсьце – Щецин.

Пястовского служит частью судоходного канала Свиноуйсьце–Щецин длиной ~ 66 км, шириной 250 м и глубиной 10.5 м.

Отделение Щецинской лагуны от прямого сообщения с Балтийским морем началось в поздний голоцен. Из продуктов абразии берегов моренного плато (ныне острова Узедом и Волин) возникли две песчаные вдольбереговые косы, или вдольбереговой барьер, который теперь называют Свина-Гейт. После образования барьера в его внутренней части сравнительно быстро стала формироваться так называемая тыловая (штормовая) дельта Свины; ее хорошо видно на космических снимках (рис. 2). Ее подводная часть – Кжецкий Высок – песчаное мелководье глубиной 2 м, простирающееся в настоящее время на несколько километров в глубь лагуны [12].

В Щецинскую лагуну помимо Одры впадают реки Пене, Заров и Иккер.

Поморская бухта (польск: Zatoka Pomorska, нем. Pommersche Bucht) находится в юго-западной части Балтийского моря. Северной границей бухты служит изобата 20 м условно от м. Аркона на о. Рюген до маяка в дер. Гонски восточнее г. Колобжег. Площадь бухты 5580 км², средняя глубина ~ 13 м, максимальная глубина 20 м [31].

СОВРЕМЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ОДРЫ

Водное питание Одры – смешанное (преобладает подземное с участием снегового и дождевого). Среднегололетний расход воды на гидрологическом посту (г/п) Хоэнзатен-Финов

(a)



(б)



Рис. 2. Космические снимки устьевой области Одры (а) и пролива Свина (б). Фото из открытых источников.

(площадь водосбора 109.6 тыс. км²) за 1920–2021 гг. составил 512 м³/с (объем годового стока 16.2 км³) [18]. Водный режим характеризуется весенним половодьем, меженью в остальную часть года, прерываемую летними дождевыми паводками. Самые многоводные месяцы — март и апрель, маловодные — июль–октябрь.

Летние дождевые паводки могут стать причиной катастрофических наводнений в верхнем и среднем течении реки; в нижнем течении волны паводков расплываются. В XX в. катастрофический характер имели стоковые наводнения 1902, 1903, 1977, 1997, 1985 гг. Наводнение на Одре в июле–августе 1997 г. было крупнейшим за всю историю наблюдений — так называемое наводнение тысячелетия (польск. Powódź tysiąclecia). По [27], за период с 7 июля по 14 августа 1997 г. сток воды Одры на г/п Гоздовице составил 6.64 км³. Паводок был исключительных масштабов, что привело к прорыву дамб и затоплению огромных территорий. Наводнение в мае–июне 2010 г. также было одним из крупнейших, но противопаводковые меры, принятые тремя прибрежными государствами после разрушительного наводнения 1997 г., минимизировали ущерб. Пока готовилась настоящая статья, во второй половине сентября 2024 г. верхняя и средняя части бассейна Одры приняли мощный удар осеннего дождевого паводка, приведшего к разрушительным наводнениям.

Объем стока рек Пене, Заров и Иккер, впадающих в Щецинскую лагуну, составляет соответственно 0.76, 0.11 и 0.19 км³ [14].

Водообмен между лагуной и Поморской бухтой зависит от метеоусловий (ветра и атмосферного давления), уровня моря и стока воды Одры. Через Свину проходит 60–70% воды, через Пенештром и Дзивну — по 15–20% [25]. Водообмен через Свину определяется ветром. Северный ветер блокирует отток речных вод и способствует проникновению осолоненных вод Балтики в лагуну. Южные ветры благоприятствуют оттоку в бухту.

Соленость воды в лагуне, по разным данным, составляет 1–3‰ [15], 0.81 [16], 0.6–0.9 [33], 0.6–1.8‰ [29]. По [34], соленость в центральной

части лагуны 0.5–2‰, но в периоды интрузии осолоненных вод из Поморской бухты (средняя соленость воды которой 5–7.5‰ в поверхностном слое и 6–9‰ — в придонном [34]) через Свину эти воды не только повышают соленость в самом проливе, но могут распространяться в придонном слое в лагуну на несколько километров.

Сезонные изменения солености связаны с внутригодовым характером речного стока. В начале года, после таяния льда и увеличения стока реки, вода в лагуне быстро распресняется. Наименьшая средняя соленость (0.2–0.5‰) обычно бывает в мае и июне. Летом соленость постепенно увеличивается и достигает максимального значения 0.8–1.3‰ во время ноябрьских штормов, когда отмечаются усиленные вторжения морских осолоненных вод в лагуну.

По данным наблюдений за 1956–2015 гг., период с ледовыми явлениями на устьевом участке реки на г/п Гоздовице и Видухова в среднем начинается 18 и 26 декабря соответственно, заканчивается 20 февраля. Период ледостава на г/п Гоздовице длится с 8 января по 7 февраля, на г/п Видухова — с 2 января по 12 февраля [28].

Средняя продолжительность периода с ледовыми явлениями в Щецинской лагуне 64 дня, ледостав в среднем 51 день [16]. Свободным ото льда остается судоходный канал из лагуны в Поморскую бухту.

ИССЛЕДОВАНИЯ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ОДРЫ

Первый уровнемер (мареограф) на побережье Балтийского моря был установлен в Стокгольме в 1774 г. По состоянию на 15 мая 2023 г. Службой мониторинга морской среды программы “Коперникус” насчитано 150 мареографов [21]. По обобщенным данным этих мареографов установлено, что в XX в. уровень Балтийского моря повышался на 1.3–1.6 мм/год. В XXI в. рост уровня моря ускорился в ~ 2 раза. По данным спутниковой альтиметрии повышение уровня моря с 1991 по 2020 г. составило от 3.3 до 4.1 мм/год, по данным мареографов за тот же период ~ 3 мм/год [21].

По данным Р.Б. Зайдлера и др. (цитируется по [26]), самый сильный штормовой нагон, наблюдавшийся на южном побережье Балтийского моря, был в 1872 г., когда уровень моря на побережье земли Шлезвиг-Гольштейн повысился на 3.2–3.7 м. Самый высокий уровень моря на польском побережье во время штормового нагона зафиксирован 13 ноября 1872 г. в Колобжеге и составил 7.22 м NN (NN – ординар в Амстердамской системе высот) [37]. Исторические сведения об экстремальных уровнях моря во время штормовых нагонов на польском побережье Балтики обобщены и подробно описаны в польской научной литературе; перечень этих работ приведен в [37].

Синоптическая обстановка над Поморской бухтой и в устьевой области Одры в основном определяется движением воздушных масс с запада на восток и преобладающими западными ветрами. На циркуляцию воздуха здесь больше всего влияет низкая температура воздуха в Исландии (в основном зимой) и высокая температура на Азорских о-вах (в основном летом). Фронты, связанные с прохождением циклонов, вызывают частые и резкие изменения погоды. Весной преобладают восточные и северо-восточные ветры, летом – чаще юго-западные и северо-западные. Лишь изредка в этот период дуют юго-восточные и южные ветры. Спокойные дни редки, составляя 2–7% в году [22].

Щецинская лагуна и устьевой участок Одры подвержены сильному влиянию колебаний уровня моря во время штормовых нагонов. Этому способствуют небольшие уклоны водной поверхности на устьевом участке: 0.13–0.07‰ между Гоздовице и Видухова; 0.003‰ – между Видухова и Щецином и < 0.002‰ между Щецином и Тшебежом [26]. Из-за малой пропускной способности проливов, соединяющих Щецинскую лагуну с Поморской бухтой, изменения уровня воды в лагуне при штормовых нагонах случаются с некоторым запозданием. Колебания уровня во время штормового нагона достигают Гоздовице. Дальность нагонных колебаний уровня и интенсивность нагона зависят не только от атмосферных условий (скорости и направления ветра, изменения атмосферного давления), но и расхода воды самой реки. Чем он выше, тем меньше высота нагона. Дополнительным факто-

ром, влияющим на повышение уровня воды во время штормовых нагонов, служат ледовые явления в устье реки [25].

Уровни воды в устьевой области р. Одры измеряются на следующих постах: в Поморской бухте – на г/п Свиноуйсьце, в Щецинской лагуне – на г/п Тшебеж; на устьевом участке – на г/п Щецин (23 км от лагуны), Подючи (на рук. Регалица), Грыфино (44 км), Видухова (60.8 км) и Гоздовице (118 км). Уровни воды на этих гидропостах в польской литературе или даны в (см NN), или привязаны к средней отметке уровня моря –5.00 м NN. В данной статье все уровни даны в (м NN).

В [38] приведен график изменения уровня на г/п Свиноуйсьце за 1811–2010 гг.: столетний тренд повышения уровня моря здесь составил 0.48 мм/год. За период с 1947 по 2010 г. повышение уровня на г/п Свиноуйсьце и Щецин составило 1.2 и 0.8 мм/год соответственно.

Самый сильный штормовой нагон на побережье Поморской бухты в Свиноуйсьце был 10 февраля 1874 г., когда уровень составил 6.96 м [25]; в Щецинской лагуне, в Тшебеже, самый высокий нагон зафиксирован в 1913 г. – 6.37 м [26]. В Щецине максимальный уровень отмечен 7 марта 1850 г. – 6.80 м [24].

Для немецкого побережья Балтийского моря штормовым нагоном обычно считают повышение уровня моря на ≥ 1 м выше среднего уровня (5.00 м), т. е. 6.00 м. Польские службы береговой охраны штормовыми неблагоприятными (“warning levels”) и опасными (“alarm levels”) считают нагонные уровни 5.70 и 6.00 м соответственно. Б. Вишневски (1997 г.) (цитируется по [39]) считал штормовым нагоном повышение уровня воды выше 5.70 м на любом участке польского побережья [39].

На г/п Свиноуйсьце и Щецин неблагоприятными и опасными приняты уровни выше 5.60 и 5.80 м соответственно; на г/п Тшебеж – превышающие 5.40 м и 5.60 м [24].

Анализ штормовых нагонов и повышения уровня воды в бухте, лагуне и на устьевом

участке Одры почти за четвертьвековой период (с 1993/1994 по 2016/2017 г.) дан в [24]. Самые высокие за эти годы уровни в Свиноуйсьце зарегистрированы 3–4 ноября 1995 г. (6.83 м) и 4–6 января 2017 г. (6.53 м). В Щецинской лагуне на г/п Тшебеж – 15 октября 2009 г. (6.25 м), 15 января 2012 г. (6.10 м), 4 ноября 1995 г. (6.08 м), 5 января 2017 г. (6.04 м). На устьевом участке на г/п Щецин (рук. Западная Одра), Подючи (рук. Регалица) и Грыфино (рук. Восточная Одра) самые высокие уровни были 15 октября 2009 г. – 6.31, 6.44 и 6.38 м соответственно. Распространение нагонных колебаний уровня вдоль устьевого участка Одры во время штормового нагона в начале января 2017 г. показано на рис. 3.

Штормовые нагоны на побережье Поморской бухты за период с 1997 по 2006 г. подробно исследованы в [26]. За этот период выявлено 114 случаев штормовых нагонов, при которых уровни были неблагоприятными или опасными. На г/п Свиноуйсьце неблагоприятные уровни были достигнуты во время 23 штормовых нагонов; в течение шести из них уровень превысил 6.00 м. Самый высокий уровень (6.49 м) был 1 ноября 2006 г. На г/п Тшебеж неблагоприятные уровни

достигнуты во время 34 штормовых нагонов. Самый высокий уровень (5.96 м) отмечен 21 февраля 2002 г. На г/п Щецин самый высокий уровень (6.0 м) также был 21 февраля 2002 г. [26].

За исследованный в [26] период количество штормовых нагонов сильно различалось от года к году: от восьми в 2003 г. до 16 в 2001 г. Обычно штормовые нагоны случались с конца сентября по апрель, однако большая их часть приходилась на ноябрь–февраль. Период с мая по август обычно был без штормовых нагонов.

На основе анализа штормовых нагонов в 1997–2006 гг. авторы [26] выявили, что для устьевой области Одры характерны нагоны, вызванные изменением атмосферного давления (1), ветром (2) и совместным воздействием низкого атмосферного давления и ветра (3).

Штормовые нагоны, вызванные в основном изменением атмосферного давления. В 1997–2006 гг. на побережье Поморской бухты было зафиксировано 11 кратковременных штормовых нагонов. Они возникли главным образом в результате глубоких циклонов (с давлением ниже

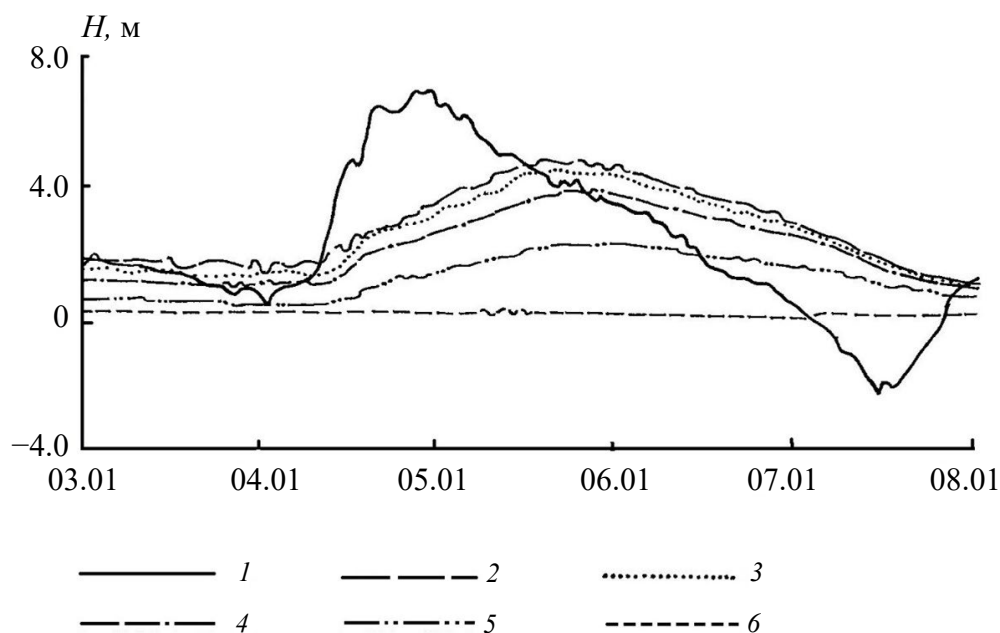


Рис. 3. Изменения уровня воды вдоль устьевого участка во время штормового нагона 3–7 января 2017 г., связанного с продвижением над Балтийским морем глубокого и обширного циклона Аксель [24]. 1 – 6 – г/п Свиноуйсьце, Тшебеж, Подючи, Грыфино, Видухова, Гоздовице соответственно.

980 гПа в центре), движущихся над Балтийским морем с большой скоростью. Эти штормовые нагоны, как правило, приводили на побережье Поморской бухты к значительным изменениям уровня моря (± 1.5 м) длительностью в несколько часов. Воздействие ветров было менее выражено из-за относительной кратковременности их действия и смены направлений. Подобные штормовые нагоны не оказывали влияния на изменения уровня в Щецинской лагуне и на устьевом участке Одры из-за низкой пропускной способности проливов, соединяющих бухту с лагуной. В качестве примера подобного события в [26] приведен штормовой нагон 15–17 ноября 2001 г., когда циклон, образовавшийся над Норвежским морем, быстро переместился над Скандинавским п-овом на восток через Финский залив, вызвав штормовой нагон на южном побережье Балтики. В Щецинскую лагуну и на устьевой участок Одры нагонное повышение уровня воды распространилось слабо. Если на г/п Свиноуйсьце максимальный уровень составил 5.99 м (08:00 16 ноября), то уровни на г/п Тшебеж и Щецин изменились незначительно и составили на обоих постах ~ 5.55 м (20:00 16 ноября и 00:00 17 ноября).

Штормовые нагоны, вызванные преимущественно ветром. Так, в 1997–2006 гг. 62.3% всех штормовых нагонов произошли в основном из-за сильного ветра. Такие нагоны были вызваны прохождением над Балтийским морем неглубоких (> 980 гПа в центре) и медленных (скорость < 8 м/с) циклонов. Изменение давления не сказывалось, и в зависимости от скорости, продолжительности и направления ветра колебания уровня воды в Поморской бухте были в пределах ± 0.8 м. Подъем и падение уровня были медленными и плавными (от нескольких дней до недели), нагонное повышение уровня воды распространялось в Щецинскую лагуну и на устьевой участок Одры. Подобная ситуация в [26] проиллюстрирована штормовым нагоном 4–10 апреля 2003 г. На г/п Свиноуйсьце уровень моря достиг 5.88 м (04:00 6 апреля). Нагон распространился в Щецинскую лагуну: на г/п Тшебеж уровень воды достиг максимума (~ 5.70 м) в 08:00 7 апреля (спустя 28 ч после максимума в Свиноуйсьце); опасные уровни сохранялись до 10 апреля. На г/п Щецин опасный уровень был превышен 6 апреля, а максимума (5.89 м) достиг

в 08:00 7 апреля в результате сильного (6 баллов по шкале Бофорта) северного ветра. На других гидропостах на устьевом участке Одры уровень поднялся до ~ 5.6 м. На г/п Подючи и Грыфино уровни были превышены на 0.3 м. К Гоздовице колебания уровня затухли. Во время штормового нагона 5 апреля уровень в Поморской бухте был на 0.5 м выше, чем в Щецинской лагуне.

Штормовые нагоны, образующиеся при совместном воздействии циклонов и ветра. В 1997–2006 гг. во время прохождения глубоких циклонов над Балтикой, сопровождающихся сильным ветром, произошло 32 штормовых нагона [26]. Повышение уровня моря отмечалось сначала на побережье Поморской бухты, потом в Щецинской лагуне и, наконец, на устьевом участке Одры. Во время весеннего таяния льда штормовой нагон иногда приводил к затоплениям прибрежных территорий в устьевой области, польдеров, к абразии берегов и пляжей, разрушению портовых сооружений и нарушению судоходства. Самый сильный штормовой нагон за это десятилетие произошел в начале ноября 2006 г. На г/п Свиноуйсьце уровень достиг максимума в 16:00 1 ноября и составил 6.55 м. Уровень воды в Щецинской лагуне тоже начал повышаться 1 ноября, сначала преодолев неблагоприятный уровень, а затем и опасный. На г/п Тшебеж уровень достиг 5.71 м в полдень 3 ноября и держался еще два дня. В течение трех дней дул северный ветер, неблагоприятные уровни были более трех дней, опасные — более суток. На г/п Щецин неблагоприятный уровень держался в течение трех дней, а максимум уровня пришелся на 16:00 3 ноября и составил 5.78 м. На г/п Подючи и Видухова подъем уровня 2 ноября составил 5.8 м [26]. На г/п Гоздовице влияние штормового нагона уже было незначительным.

Штормовой нагон, попадающий в период половодья и паводков, затрудняет отток речных вод в море, создавая подпор, и приводит к долгому сохранению высоких уровней воды в устьевой области Одры, а в некоторых случаях может вызывать затопление низменных территории вокруг Щецинской лагуны и оз. Домбе и пойм рукавов Восточная Одра и Западная Одра.

Особая угроза наводнений при штормовых нагонах возникает в период ледовых явлений.

Одно из таких опасных гидрологических событий случилось во время паводка на устьевом участке Одры зимой 2010/2011 г. Наводнение было вызвано ледяным затором и подъемом уровня в реке в результате таяния снега на водосборе реки. В этот же зимний период было пять штормовых нагонов. Самый сильный зарегистрирован 11–13 февраля 2011 г., когда уровень моря на г/п Свиноуйсьце достиг 6.32 м [24], создав дополнительный вклад в повышение уровня воды в Щецинской лагуне и на устьевом участке реки, составившее почти 0.5 м.

ВЫВОДЫ

Продолжающееся и усиливающееся глобальное потепление климата сопровождается существенными изменениями всех компонентов гидроклиматической системы Земли, в том числе изменениями морских факторов, воздействующих на режим, строение и экологические условия устьев рек. Уровень Мирового океана с 1900 по 2020 г. повысился на 21 см при средней скорости 1.7 мм/год. Темпы повышения уровня увеличились: в 1993–2018 гг. до 3.3 мм/год и в 2006–2018 гг. до 3.7 мм/год. Усилилась активность тропических и внетропических циклонов и вызываемых ими штормовых нагонов и морского волнения.

По данным мареографов в Балтийском море установлено, что в XX в. уровень моря повышался на 1.3–1.6 мм/год. В XXI в. рост уровня моря ускорился в ~2 раза. Повышение уровня моря с 1991 по 2020 г. составило по данным спутниковой альтиметрии от 3.3 до 4.1 мм/год, по данным мареографов ~ 3 мм/год.

Самый сильный штормовой нагон на побережье Поморской бухты в Свиноуйсьце был 10 февраля 1874 г. (6.96 м); в Тшебеже в Щецинской лагуне – в 1913 г. (6.37 м), в Щецине – 7 марта 1850 г. (6.80 м).

Исследование штормовых нагонов и повышения уровня воды в устьевой области Одры с 1993/1994 по 2016/2017 г. выявило, что максимальные уровни на устьевом взморье на г/п Свиноуйсьце за эти годы были зарегистрированы 3–4 ноября 1995 г. (6.83 м), в лагуне на г/п Тше-

беж – 15 октября 2009 г. (6.25 м), на устьевом участке реки на г/п Подючи – 15 октября 2009 г. (6.44 м). На г/п Свиноуйсьце и Щецин неблагоприятными и опасными приняты уровни выше 5.60 и 5.80 м соответственно; на г/п Тшебеж – превышающие 5.40 м и 5.60 м. Превышение опасного уровня указывает на угрозу наводнения.

Штормовой нагон, попадающий в период половодья и паводков, создает подпор и приводит к затоплению низменных территорий вокруг Щецинской лагуны и оз. Домбе и пойм рукавов Восточная Одра и Западная Одра. Особая угроза наводнений при штормовых нагонах возникает в период ледовых явлений, например при совпадении ледяного затора и подъема уровня в реке в результате таяния снега на водосборе. Иными словами, для устьевой области Одры, согласно типизации опасных гидрологических событий, принятой в отечественной гидрологии устьев рек, угрозу представляют наводнения стоково-нагонного или стоково-заторно-нагонного типа.

Исследование устьевой области Одры – пример анализа недостаточно изученных сложных процессов взаимодействия штормовых нагонов, речного стока и изменения среднего уровня моря в устьях рек.

Изучение экстремальных штормовых нагонов и определение опасных уровней во время их прохождения важны не только в научных, но и в практических целях: в частности, для организации служб оповещения населения, для разработки мер по защите населенных пунктов и промышленных объектов от затоплений, а также для безопасности судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 175 с.
2. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 176 с.
3. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.

4. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.
5. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Приливы и штормовые нагоны в эстуарии Темзы // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 4. С. 351–366.
6. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. М.: Триумф, 2018. 313 с.
7. Михайлова М.В. Взаимодействие приливов и штормовых нагонов в устье р. Эльбы // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 283–296.
8. Михайлова М.В. Наводнения в устьевой области Вислы и их влияние на изменения гидрографической сети дельты // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 6. С. 674–685.
9. Михайлова М.В., Жаромскис Р. Гидрологические процессы в устьевой области р. Нямунас (Неман) // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 2. С. 115–129.
10. Реки и озера мира. Энциклопедия. М.: Энциклопедия, 2012. 924 с.
11. Экологическая энциклопедия. Т. 4. М.: Энциклопедия, 2011. С. 45.
12. Borówka R. K., Osadczuk A., Osadczuk K., Witkowski A., Skowronek A., Latałowa M., Mianowicz K. Postglacial evolution of the Odra River mouth, Poland-Germany // Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Past and Future Projection. Springer. 2017. P. 193–218. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49894-2>
13. Encyclopaedia of Coastal Science. Dordrecht: Springer, 2005. 1211 p.
14. Fenske C., Westphal H., Bachor A., Breitenbach E., Buchholz W., Jülich W.-D., Hensel P. The consequences of the Odra flood (summer 1997) for the Odra lagoon and the beaches of Usedom: what can be expected under extreme conditions? // Int. J. Hyg. Environ. Health. 2001. V. 203. № 5–6. P. 417–433.
15. Friedland R., Schernewski G., Gräwe U., Greipsland I., Palazzo D., Pastuszek M. Managing eutrophication in the Szczecin (Oder) Lagoon – development, present state and future perspectives // Front. Mar. Sci. 2019. V. 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00521>
16. Girjatowicz J.P., Świątek M. Relationship between air temperature change and Southern Baltic coastal lagoons ice conditions // Atmosphere. 2021. V. 12. № 8. 931. <https://doi.org/10.3390/atmos12080931>
17. <https://bigenc.ru/c/neva-73c64a>
18. https://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/13_dtbse/database_node.html
19. International Glossary of Hydrology (WMO-No. 385). 2012. P. 331.
20. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 p.
21. Kapsi I., Kall T., Liibus A. Sea Level Rise and Future Projections in the Baltic Sea // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. № 8. 1514. <https://doi.org/10.3390/jmse11081514>
22. Kasyk L., Pleskacz K., Kapuściński T. Analysis of wind and drifter movement parameters in terms of navigation safety: the example of Szczecin Lagoon // European Res. Studies J. 2021. V. XXIV. № 3. P. 541–559.
23. Kjerfve B., Magill K.E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons // Mar. Geol. 1989. V. 88. №№ 3–4. P. 187–199.
24. Kowalewska-Kalkowska H. Frequency and strength of storm surges in the Oder River mouth area // Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectionis. 2018. V. 17. № 3. P. 55–65.
25. Kowalewska-Kalkowska H. Storm-surge induced water level changes in the Odra River mouth area (Southern Baltic coast) // Atmosphere. 2021. V. 12. № 12. 1559. <https://doi.org/10.3390/atmos12121559>
26. Kowalewska-Kalkowska H., Wiśniewski B. Storm surges in the Odra mouth area during the 1997–2006 decade // Boreal Env. Res. 2009. V. 4. № 1. P. 183–192.
27. Kundzewicz Z. W., Szamałek K., Kowalczak P. The Great Flood of 1997 in Poland // Hydrol. Sci. J. 1999. V. 44. № 6. P. 855–870.
28. Marszelewski W., Pawłowski B. Long-Term changes in the course of ice phenomena on the Oder River along the Polish–German border // Water Resour. Management. 2019. V. 33. № 15. P. 5107–5120.
29. Mohrholz V., Lass H.U. Transports between Oderhaff and Pomeranian Bight – a simple barotropic box model // German J. Hydrogr. 1998. V. 50. № 4. P. 371–383.
30. Murty T.S. Storm surges – meteorological ocean tides. Can. Bull. of Fisheries and Aquatic Sci. Bull. 212. Ottawa, 1984. 897 p.
31. Müller-Navarra S. H., Huber K., Komo H. Model Simulations of the transport of Odra flood water through the Szczecin Lagoon into the Pomeranian Bight in July/August 1997 // Acta hydrochim. Hydrobiol. 1999. V. 27. № 5. P. 364–373.
32. Nichols M., Allen G. Sedimentary processes in coastal lagoons // Coastal lagoon research, present and future. UNESCO Technical Papers in Marine Science 33.

- Proc. UNESCO/IABO Seminar. UNESCO. 1981. P. 27–80.
33. *Osadczyk A., Musielak S., Borówka R.K.* Why should the Odra River mouth area not be regarded as an estuary? A geologist's point of view // *Oceanol. Hydrobiol. Studies*. 2007. V. XXXVI. № 2. P. 87–99.
 34. *Radziejewska T., Schernewski G.* The Szczecin (Oder-) Lagoon // *Ecology of Baltic Waters. Ecological Studies* 197. Verlag Berlin-Heidelberg: Springer, 2008. P. 115–130.
 35. *Schmidt A.* Morphological investigations in the River Odra // *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. 1999. V. 27. № 5. P. 268–273.
 36. *Siefert W., Murty T.S.* Storm surges, river flow and combined effects. State of the Art Report. Koblenz, 1991. 151 p.
 37. *Wiśniewski B., Wolski T.* Physical aspects of extreme storm surges and falls on the Polish coast. // *Oceanologia*. 2011. № 53 (1-TI). P. 373–390.
 38. *Wolski T., Wiśniewski B.* Long-term, seasonal and short-term fluctuations in the water level of the Southern Baltic Sea // *Quaestiones Geographicae*. 2014. V. 33. № 3. P. 181–197.
 39. *Wolski T., Wiśniewski B., Giza A., Kowalewska-Kalkowska H., Boman H., Grabbi-Kaiv S., Hammarklint T., Holfort J., Lydeikaitė Ž.* Extreme sea levels at selected stations on the Baltic Sea coast // *Oceanologia*. 2014. V. 56. № 2. P. 259–290.

Storm surges in the Odra mouth area

M. V. Mikhailova

Water Problems Institute of RAS, Gubkina, str., 3, Moscow, 119333 Russia

e-mail: mv.mikhailova@gmail.com

The article provides a general geographical description of the Odra River basin and its mouth area, including the mouth reach of the river, lagoon and nearshore zone, and provides brief information on the current hydrological regime of the river and the hydrological features of the Szczecin Lagoon and Pomeranian Bay. It is shown that in the second half of the 20th century, due to the intensification of cyclonic activity over the Baltic Sea, storm surges became more frequent on the coast of the Pomeranian Bay and at the mouth of the river. The features of storm surges in the Szczecin Lagoon and the mouth reach of the Odra River are described.

Keywords: river, sea, mouth area, mouth reach of the river, Szczecin Lagoon, Pomeranian Bay, sea level, storm surge.