

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.54(282.243.3:261.26)

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИЛИВОВ И ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В УСТЬЕ Р. ЭЛЬБЫ¹

© 2011 г. М. В. Михайлова

Институт водных проблем Российской академии наук

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 10.02.2010 г.

Рассмотрены основные закономерности взаимодействия приливов и штормовых нагонов в устьях рек. На примере устьевой области р. Эльбы описаны процессы взаимодействия эвстатического повышения уровня моря, приливов, нагонов и стока реки и особенности формирования максимальных уровней воды. Показано, что во второй половине XX в. вследствие активизации циклонической деятельности над Северной Атлантикой участились случаи экстремальных штормовых нагонов в устье р. Эльбы. Дана оценка возможных изменений режима приливов и нагонов в устье р. Эльбы в XXI в., вызванных ускорением эвстатического повышения уровня моря. Проанализировано воздействие местных гидротехнических мероприятий (защитного обвалования, углубления и выправления русла) на максимальные уровни воды в г. Гамбурге.

Ключевые слова: река, море, устье, эстуарий, приливы, нагоны, наводнения, гидротехнические мероприятия.

Устьевая область р. Эльбы относится к дельтово-эстуарному мезоприливному типу. Эстуарий Эльбы площадью ~480 км² – один из крупнейших в Европе. В последние десятилетия немецкими специалистами проведены крупномасштабные исследования устья Эльбы и происходящих здесь гидрологических процессов [11, 14, 16–22]. Интерес к изучению устья Эльбы был продиктован следующими причинами. Во-первых, в устье р. Эльбы находится Гамбург – крупный промышленный центр и главный морской порт ФРГ. Обеспечение бесперебойного функционирования порта и обоснование мер по улучшению судоходных условий в эстуарии Эльбы – важные технические и научные задачи. Во-вторых, Гамбург и его окрестности уже в течение многих веков подвергались воздействию сильных штормовых нагонов, многие из которых имели катастрофический характер и наносили большой ущерб хозяйству и населению города. В последнее время ситуация усугубилась тем, что штормовые нагоны стали происходить чаще. Возникла проблема прогноза этих опасных явлений, тем более в условиях повышения уровня моря.

Для российских специалистов в области изучения устьев рек результаты исследования устья Эльбы могут представлять интерес не только с познавательной точки зрения (в отечественной научной литературе сведений об этом объекте практически не

публиковалось). Эти результаты – хороший пример, во-первых, анализа еще недостаточно изученных сложных процессов взаимодействия приливов, штормовых нагонов, речного стока и изменения среднего уровня моря в устьях рек, а во-вторых, – оценки влияния комплекса защитных и дноуглубительных гидротехнических мероприятий на устьевые процессы. Аналитический обзор результатов новых гидрологических исследований в устье Эльбы – задача статьи.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИЛИВОВ, ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ И РЕЧНОГО СТОКА В УСТЬЯХ РЕК

Уровни воды в устьях рек зависят от определяющих факторов более сложным образом, чем в реках или морях. В общем случае уровень воды в любом пункте устьевой области реки H (в том числе и максимальный) определяется комплексом внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся, прежде всего, расход воды реки, средний (фоновый) уровень моря, приливы и штормовые нагоны, распространяющиеся из моря. К внутренним факторам можно отнести морфометрические и морфологические характеристики русла, воздействие местных гидротехнических мероприятий и сооружений.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-05-00061).

Часто зависимость уровня воды в устье реки H от определяющих факторов представляют в виде соотношения

$$H = H_m + H_{пр} + H_{нт} + H_{ст}, \quad (1)$$

где H_m – средний уровень моря, $H_{пр}$ – приливная составляющая уровня, $H_{нт}$ – составляющая уровня, обусловленная штормовым нагоном, $H_{ст}$ – “стоковый” уровень, зависящий от расхода воды реки.

Уравнение (1), однако, может рассматриваться лишь как иллюстрация наличия функциональной связи между уровнем H и его составляющими. В действительности, линейной зависимости вида (1) не существует, так как составляющие уровня, когда они “действуют” одновременно, связаны друг с другом нелинейно.

Объяснить соответствующие физические закономерности колебаний уровней воды в устьях рек можно на основе уравнений гидродинамики. Однако, как показано в [18], существующие гидродинамические модели не всегда полно и адекватно отражают сложные процессы, происходящие в устьях рек. Во-первых, реальные движения воды в устьях рек трехмерны, а применяемые в исследованиях уравнения в лучшем случае двумерны. Во-вторых, уравнениями гидродинамики не всегда можно описать сложные процессы одновременного распространения в противоположных направлениях обратных волн двух видов (приливов и штормовых нагонов) и прямой паводочной волны, а также влияния резонанса и отражения волн и т.д. В-третьих, во многих случаях не удается адекватно учесть влияние неустановившегося ветра, плотностных эффектов, обусловленных проникновением в устье реки морских осолоненных вод, переменного гидравлического сопротивления и других факторов.

Поэтому, как отмечено в [18], во многих случаях наиболее эффективен полуэмпирический метод анализа процессов в устьях рек, учитывающий положения гидродинамики, но базирующийся на обработке данных наблюдений, что дает возможность автоматически учесть влияние на устьевые процессы не только внешних, но и внутренних (местных) факторов.

Ниже приведены основные закономерности взаимодействия приливов, штормовых нагонов и речного стока, исследованные, в основном, в устьях рек Европы и, в частности, в прибрежной зоне Голландской бух. и эстуарии Эльбы [18–20].

Взаимодействие приливов и речного стока проявляется в существовании сложных зависимостей уровня H в любом пункте устья от расхода воды реки Q и приливного уровня $H_{пр}$ в прибрежной зоне моря. Выделяются три основные зоны: речная, где H зависит только от Q и не зависит от $H_{пр}$ (H и Q связаны между собой кривой расходов $Q = f(H)$); морская, где наоборот – H зависит только от $H_{пр}$ и не зависит от Q (здесь кривые $H = \varphi(Q, H_{пр})$ горизонталь-

ны и H – функция $H_{пр}$); переходная, где H зависит одновременно и от Q , и от $H_{пр}$. В пределах этой зоны можно выделить несколько подзон с разной степенью зависимости H от $H_{пр}$ и Q . Увеличение $H_{пр}$ приводит к выполаживанию кривых $H = \varphi(Q, H_{пр})$, увеличение Q – к более крутым кривым $H = \varphi(Q, H_{пр})$. Заметим, что аналогичные закономерности свойственны и зависимости вида

$$H = \psi(Q, H_m), \quad (2)$$

связывающей уровень в любой точке устья реки с расходом воды Q и средним уровнем моря H_m . Зависимости вида (2), как показано в [2, 3], могут быть легко получены путем построения кривых свободной поверхности на устьевом участке реки методом речной гидравлики.

В [18] сделан важный вывод о том, что в крупных эстуариях типа эстуария Эльбы влияние расхода воды на отметки уровня обычно невелико. Здесь в формировании уровня режима главную роль играют H_m , $H_{пр}$ и $H_{нт}$.

Приливная волна распространяется вверх по эстуарию и устьевому участку реки навстречу “стоковому” уклону $I_{ст}$, зависящему от расхода воды Q . Уровни воды при этом на некотором участке русла повышаются, причем тем больше, чем больше Q и $I_{ст}$. С другой стороны, увеличение Q и $I_{ст}$ способствует более быстрому распластыванию приливной волны и уменьшению дальности распространения приливов в реку.

Увеличение Q влечет за собой увеличение не только “стоковых” уровней, но и глубины. А это, в свою очередь, увеличивает скорость распространения приливной волны. Это объясняется тем, что скорость распространения любых длинных волн c , в том числе и приливных, пропорциональна корню квадратному из глубины русла h

$$c \sim \sqrt{gh}. \quad (3)$$

Обусловленные воздействием ветра на водную поверхность штормовые нагоны повышают уровни воды и увеличивают глубину в устье реки. Это, в свою очередь, влечет за собой ускорение движения приливных волн. Приливные волны при этом могут перемещаться вверх по эстуарию и устьевому участку реки быстрее нагонных, что ведет на некотором участке русла к уменьшению величины нагонного повышения уровня [19, 20].

Увеличение глубины русла во время штормового нагона приводит к уменьшению донного трения (оно обратно пропорционально глубине), что способствует ускорению перемещения вверх по эстуарию и устьевому участку реки как нагонных, так и приливных волн.

Поскольку продолжительность штормовых нагонов обычно больше периода прилива, то наложение штормового нагона на серию последовательных

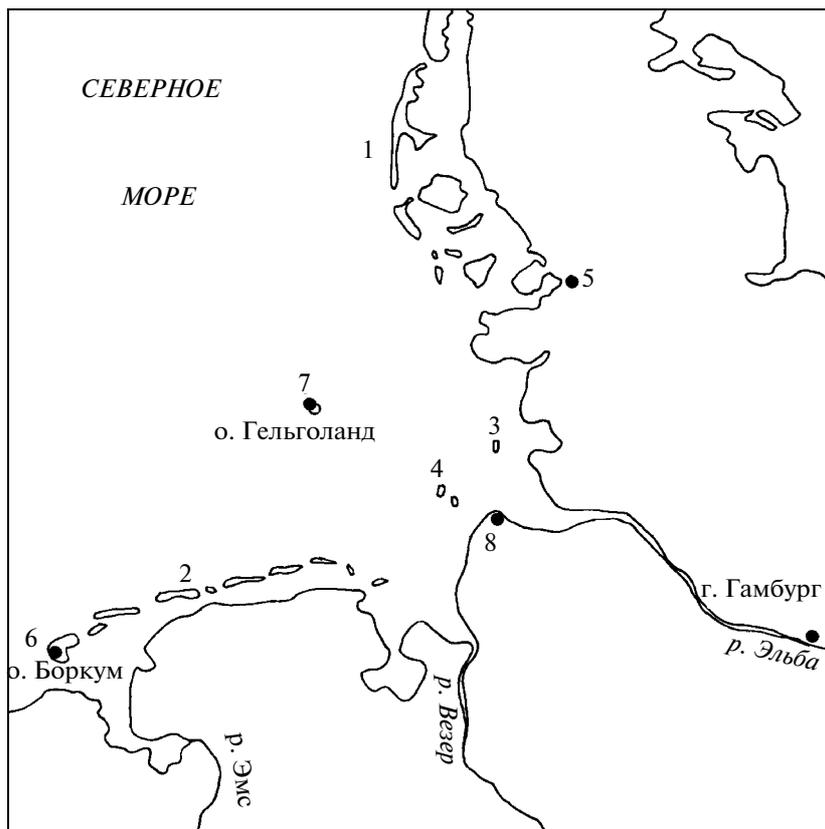


Рис. 1. Карта-схема Гельголандской бух. и устья Эльбы. Острова: 1 – Северо-Фризские, 2 – Восточно-Фризские, 3 – Тришен, 4 – Шархёрн; г/п: 5 – Хузум, 6 – Боркум, 7 – Гельголанд, 8 – Куксхафен.

приливных циклов проявляется в периодическом повышении и понижении уровня. Максимальные уровни при этом почти совпадают с полной водой (ПВ) в приливную фазу, минимальные – с малой водой (МВ) в отливную.

Нелинейное взаимодействие приливов и штормовых нагонов во многих случаях проявляется в том, что относительная величина нагона $\Delta H_{нг}$, если ее определять, вычитая из фактического уровня высоту предвычисленного астрономического прилива (т.е. прилива, который наблюдался бы в данном месте при отсутствии штормового нагона), оказывается больше при МВ и меньше при ПВ. Другими словами, в момент МВ “сложение” приливной и нагонной составляющих уровня воды близко к линейному, а в момент ПВ прирост нагонного уровня над приливным, как показано в [18], в среднем на ~10% меньше, чем при МВ.

Повышение среднего уровня моря H_m вследствие глобального потепления климата должно привести к росту уровня и глубины и, как следствие, к ускорению перемещения как приливных, так и нагонных волн. Одновременно увеличение глубины должно несколько ослабить воздействие ветра на водную поверхность, поскольку уклон, обусловленный действием ветра I_w , обычно пропорциона-

лен квадрату скорости ветра W и обратно пропорционален глубине места h .

Поскольку подъемы уровня при штормовых нагонах – явление многофакторное (зависит от H_m , приливов, ветра, глубины и т.д.), а определяющие факторы, как правило, нестационарны, то стандартные вероятностные методы оценки повторяемости экстремальных уровней воды в большинстве случаев оказываются непригодными [18].

ГИДРОГРАФИЯ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ Р. ЭЛЬБЫ

Устьевая область Эльбы относится к дельтово-эстуарному типу и включает четыре части: подверженный приливным колебаниям уровня одноканвный устьевой участок реки, небольшую внутреннюю приливную дельту, крупный эстуарий и открытое устьевое взморье (рис. 1). Вершина устьевой области Эльбы находится в 160 км от моря (на ~60 км выше г. Гамбурга), где построена плотина, ограничивающая проникновение в реку приливных и нагонных волн. В ~45 км ниже упомянутой плотины находится вершина небольшой дельты, длина которой ~20 км, а площадь ~100 км². В дельте имеются два рукава – Северная Эльба и Южная Эльба. В 632 км

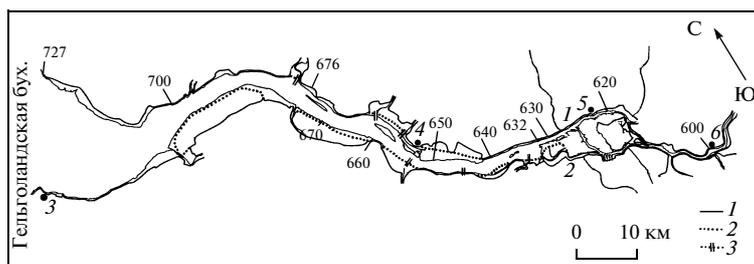


Рис. 2. Карта-схема дельты и эстуария р. Эльбы по [18]. Рукава: 1 – Северная Эльба, 2 – Южная Эльба; г/п: 3 – Куксхафен, 4 – Стадерзанд, 5 – Гамбург–Сан-Паули, 6 – Цолленспикер. 1 – дамбы до 1962 г., 2 – новые дамбы после 1962 г., 3 – шлюзованные противонагонные барьеры в устьях притоков. Километраж от чешско-германской границы.

от чешско-германской границы и 65 км от вершины устьевой области начинается главная ее часть – эстуарий Эльбы. Верхняя граница эстуария Эльбы находится в 65 км от вершины устьевой области и в 95 км от моря и выделяется как по морфологическим признакам (здесь начинается типичное для эстуариев расширение русла), так и по гидрологическим (сюда могут проникать осолоненные воды).

Эстуарий Эльбы имеет классическую воронкообразную форму (рис. 2). Его ширина (при МВ) увеличивается от 3 км в его вершине до ~18 км в устьевом створе (устье эстуария). Длина эстуария – 95 км, площадь равна 480 км².

В естественном состоянии вдоль берегов эстуария находились обширные приливные осушки. К настоящему времени они полностью обвалованы. Поэтому ширина эстуария при ПВ уменьшилась. Глубина на фарватере эстуария в последние десятилетия путем дноглубительных работ увеличена с 10 до 13.5 м [18].

Как во всех эстуариях [4–7], в эстуарии Эльбы зона динамического взаимодействия и смешения речных и морских вод периодически смещается либо в сторону моря (в половодье, в отливную фазу), либо в сторону реки (в межень, в приливную фазу). Как показали многолетние наблюдения [14], вбли-

зи устья эстуария Эльбы (гидрологический пост (г/п) Куксхафен) соленость воды в поверхностном слое изменяется от 0.5–10.53 (в среднем 4.3)‰ в половодье до 17.7–26.33 (в среднем 22.8)‰ в межень. Смешение речных и морских вод в эстуарии обычно происходит по типу умеренного перемешивания, а при повышенном речном стоке – по типу “клин осолоненных вод” [17]. При средних величинах приливов и малом стоке осолоненные воды проникают на расстояние ~65 км от устья эстуария [17]. При экстремально малом речном стоке и больших приливах это расстояние может увеличиться [14]. Как и во многих мезо- и макроприливных эстуариях [4–7], в эстуарии Эльбы в районе выклинивания осолоненных вод находится зона максимальной мутности [14]. Вместе с обратными течениями в приливную фазу вверх по эстуарию распространяются взвеси морского происхождения. Очень мелкие частицы с крупностью <2 мкм могут проникать в эстуарий на 50 км от моря, частицы с крупностью 2–20 и 20–63 мкм распространяются в эстуарий на 40 и 30 км соответственно [17]. К зонам с различной соленостью тяготеют и разные организмы (бентос, морской и речной планктон и др.) [14].

Километраж в эстуарии, дельте и на устьевом участке Эльбы отсчитывается либо от чешско-германской границы, либо от устьевом створе эстуа-

Таблица 1. Характерные пункты и г/п на Нижней Эльбе и в устьевой области реки

Пункт, г/п	Расстояние, км		
	от чешско-германской границы	от г/п Куксхафен	от устьевом створе эстуария
Г/п Ной-Дархау	536	188	191
Вершина устьевой области	567	157	160
Г/п Цолленспикер	598	126	129
Вершина дельты	612	112	115
Г/п Гамбург–Сан-Паули	623	101	104
Вершина эстуария	632	92	95
Г/п Стадерзанд	654	70	73
Г/п Куксхафен	724	0	3
Устьевом створ эстуария	727	–3	0

Таблица 2. Данные о расходах воды Эльбы на г/п Ной-Дархау за 1874–2002 гг. по [12] (в скобках – годы, в которые отмечались соответствующие максимальные и минимальные среднемесячные расходы воды)

Характеристика	Единицы измерения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{\text{ср}}$	м ³ /с	840	931	1103	1117	800	596	515	465	443	479	547	679
$Q_{\text{ср}}$	%	9.9	10.9	13.0	13.1	9.4	7.0	6.0	5.5	5.2	5.6	6.4	8.0
Q_{max}	м ³ /с	2040	1875	2906	2548	1825	1837	1947	1553	1305	1227	1591	2086
		(1920)	(2002)	(1876)	(1895)	(1965)	(1965)	(1926)	(2002)	(1890)	(1882)	(1998)	(1939)
Q_{min}	м ³ /с	249	174	354	452	365	200	181	146	143	166	199	236
		(1963)	(1954)	(1954)	(1991)	(1934)	(1934)	(1934)	(1904)	(1904)	(1947)	(1847)	(1933)

рия (а иногда от г/п Куксхафен) (табл. 1). В таблице указано также местоположение основных постов в устьевой области Эльбы.

Реки Эльба, Везер и Эмс в Северном море образуют общее устьевое взморье – прибрежную часть Гельголандской бух. (рис. 1). В Гельголандской бух. имеется много отмелей и островов. Основные острова: Восточно-Фризские (среди них о. Боркум, где находится одноименный г/п), Гельголанд, а также острова Шархерн и Тришен около выхода эстуария Эльбы в море.

В вершине эстуария Эльбы и на берегах дельты расположен Гамбург – второй по численности населения город Германии, второй по грузообороту (60–80 млн. т/год) морской порт в Европе, крупный промышленный, финансовый и культурный центр.

КРАТКАЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА Р. ЭЛЬБЫ

Название р. Эльбы (нем. Elbe, чеш. Labe, лат. Al-bis) происходит от старогерманского Albia – река.

Эльба протекает в Чехии и ФРГ: через чешские края Краловеградский, Пардубицкий, Среднечешский, Устецкий и германские земли Саксония, Саксония-Анхальт, Бранденбург, Нижняя Саксония, Макленбург–Передняя Померания, Гамбург и Шлезвиг-Гольштейн. Помимо Чехии (33.7%) и Германии (65.5%) небольшие части бассейна Эльбы находятся в пределах Австрии (0.6%) и Польши (0.2%). Длина реки 1165 км, площадь бассейна 148 тыс. км² [2].

Эльба берет начало в горах Крконоше (Судеты) на северо-западной границе Чехии на высоте 1390 м. Река образуется из нескольких горных водотоков, главный из которых – Биле Лаба (Белая Эльба). Ниже Эльбского водопада высотой 50 м и после впадения ряда притоков река выходит из гор, протекает через Чешско-Моравскую возвышенность, а затем по Северо-Германской низменности. Эльба впадает в Гельголандскую бух. Северного моря, образуя крупный эстуарий. Основные притоки Эльбы: Цидлина, Йизера, Шварце-Эльстер, Хафель, Эльде

(правые), Влтава, Огрже, Мульде, Зале, Аланд, Ильменау (левые).

Климат в бассейне Эльбы умеренный, с теплой зимой и неустойчивой погодой летом. Увлажнение достаточное, годовая сумма осадков изменяется в пределах бассейна от 500 до 1000 мм (их количество уменьшается с юга на север). На декабрь–февраль приходится ~30% годовой суммы осадков, на март–май – 20, на июнь–август – 30, на сентябрь–ноябрь – 20%.

Для бассейна реки характерны смешанные и широколиственные леса, большие площади используются в сельском хозяйстве.

Средние составляющие годового водного баланса в бассейне Эльбы следующие [2]: осадки 628 мм, слой стока 173 мм, испарение 455 мм; коэффициент стока 0.28.

Сведения о стоке воды в низовьях Эльбы в литературе противоречивы. В разных источниках указаны, например, величины среднемноголетнего стока воды 24 км³/год [15], 770 м³/с, или 24.3 км³/год [18], 26.3 [2], 27.0 км³/год [10].

Более достоверные данные могут быть получены путем обработки ряда наблюдений на г/п Ной-Дархау (табл. 2). Этот г/п находится в 536 км от чешско-германской границы, 191 км от устья эстуария и 87 км выше Гамбурга. Площадь бассейна для рассматриваемого г/п – 132 тыс. км² (89.2% всей площади бассейна реки, равной по [2] 148 тыс. км²). Расчет автора дал среднюю величину расхода воды на этом г/п, равную 710 м³/с, а годового стока – 22.4 км³/год. Если принять, что боковая приточность на участке от рассматриваемого г/п до устья эстуария пропорциональна соответствующему приросту площади бассейна (10.8%), то расход воды Эльбы при впадении в Северное море составит 787 м³/с, а водный сток – 24.8 км³/год, т.е. величину, близкую данным [15, 16, 18].

Анализ многолетних колебаний годового стока на г/п Ной-Дархау явных трендов не выявил. За 1874–2002 гг. наиболее многоводными были годы 1941 ($Q_{\text{ср}} = 1375$ м³/с), 1981 (1132), 1987 (1096), 1940 (1078) и 2002 (1058 м³/с), а самыми маловодными –

Таблица 3. Изменение характеристик приливов, осредненное по г/п в Гельголандской бух. за 1855–1990 гг. по [22]

Характеристики приливов	Увеличение за период	
	см	мм/год
Отметки		
ПВ	31	2.3
МВ	12	0.9
СПУ	20	1.5
Величина приливов	18	1.3

1934 ($Q_{cp} = 380 \text{ м}^3/\text{с}$), 1991 (381), 1964 (422), 1943 (424) и 1933 ($423 \text{ м}^3/\text{с}$).

Внутригодовое распределение стока воды в низовьях Эльбы (табл. 2) относительно равномерно: водность самого многоводного месяца (апрель) всего в 2.5 раза больше водности самого маловодного (сентябрь).

Тем не менее, в режиме стока хорошо выделяются три многоводных месяца (весеннее половодье с февраля по апрель, 37.0% годового стока) и три маловодных (осенняя межень в августе–октябре, 16.3%). Также можно выделить многоводную половину года (с декабря по май, 64.3% годового стока) и маловодную (с июня по ноябрь, 35.7%).

Максимальные среднемесячные расходы воды на г/п Ной-Дархау в марте и апреле в период половодья могут достигать ~ 2900 и $2550 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно (табл. 2). Абсолютный максимум достигает $3690 \text{ м}^3/\text{с}$ (1 апреля 1940 г.) [18]. Большие расходы воды нередко отмечаются и во время летних дождей паводков. В последние годы такой паводок (повторяемостью 1 раз в ~ 100 лет) произошел в августе 2002 г. Этот паводок вызвал катастрофическое наводнение как на притоках Эльбы (например, в Праге на Влтаве), так и на самой реке. Большой ущерб был нанесен Дрездену [13].

Минимальные среднемесячные расходы воды могут отмечаться в любые месяцы года, но чаще в августе и сентябре (табл. 2). Наименьший из них составил $143 \text{ м}^3/\text{с}$ в 1964 г. Экстремально низкие расходы воды в низовьях реки по [16] составляют $\sim 140 \text{ м}^3/\text{с}$.

При модельных расчетах в качестве среднегодового расхода воды в вершине эстуария Эльбы используют величину 770, а среднего максимального — $2200 \text{ м}^3/\text{с}$ [18]. В период года, когда наиболее высока вероятность значительных штормовых нагонов, т.е. в осенне-зимние месяцы с ноября по февраль, среднемесячные расходы воды Эльбы составляют 550–930, а минимальные 200–250 $\text{м}^3/\text{с}$ (табл. 2).

Сток наносов Эльбы невелик и по [15] равен 0.84 млн. т/год.

В бассейне Эльбы много небольших плотин и водохранилищ, предназначенных для водоснабже-

ния хозяйственных объектов и населения. Заметного регулирующего воздействия на сток реки они не оказывают. Речная система Эльбы соединена через правый приток Хафель и Одер-Шпре-канал, а также через Одер-Хафель-канал с р. Одер (Одра). Через Среднегерманский канал Эльба связана с реками Везер, Эмс и Рейн. Канал Эльба-Траве соединяет Эльбу с Любекской бух. и портом Любек, а Кильский канал — с Кильской бух. Балтийского моря.

ПРИЛИВЫ И ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Общая характеристика Гельголандской бухты

Эстуарий Эльбы открыт в сторону юго-восточной части Северного моря, носящей название Гельголандская бух. Воздействие морского режима на процессы в эстуарии Эльбы (прежде всего приливов и штормовых нагонов) намного сильнее речного влияния. Поэтому закономерности гидрологических процессов в эстуарии Эльбы нельзя проанализировать без учета особенностей гидрологического режима Гельголандской бух.

Прибрежная зона Гельголандской бух. — одновременно общее устьевое взморье рек Эльбы, Везера и Эмса и морской шельф, прорезанный древними руслами упомянутых рек (реликтами последней ледниковой эпохи, когда уровень океана был намного ниже современного).

Северная мористая граница устьевое взморья ограничивает зону опресняющего влияния речного стока и приблизительно совпадает с изогалинами 30–32‰ в летнее время. Соленость самого Северного моря довольно велика и составляет $\sim 35‰$ [1, 8].

Прибрежные течения в Гельголандской бух. направлены с ЮЗ на СВ. Волнение в прибрежной зоне умеренное, во время осенне-зимних штормов — сильное.

Наиболее важное в особенностях режима прибрежной зоны — это колебания уровня, подразделяющиеся на многолетние, сезонные, приливные и сгонно-нагонные.

Многолетние и сезонные колебания уровня

Как и во всем Мировом океане, в Атлантическом океане и связанных с ним морях в XIX–XX вв. наблюдалось медленное эвстатическое повышение уровня моря (ЭПУМ) с интенсивностью 1–2 мм/год. Однако в конце XX — начале XXI в. средний уровень моря стал повышаться значительно быстрее, что связывают с глобальным потеплением климата. Если в 1961–2003 гг. уровень океана повышался со скоростью 1.8 ± 0.5 , то в 1993–2003 гг. интенсивность роста уровня возросла до 3.1 ± 0.7 мм/год [9]. По прогнозам [9] к концу XXI в. уровень океана может подняться на величину ~ 1 м.

Анализ данных многолетних наблюдений [20] показал, что за 1855–1990 гг. уровни воды в Гельголандской бух. повышались, причем по-разному для различных характеристик приливов (табл. 3). Рост среднего приливного уровня (СПУ) с интенсивностью 1.5 мм/год можно интерпретировать как ЭПУМ в рассматриваемый период.

Прогностические оценки интенсивности повышения среднего уровня в Гельголандской бух. в XXI в. дают величину от 0.3 до 1.1 м [18]. В работах [19, 20] все прогнозы возможных изменений режима Гельголандской бух. сделаны с учетом повышения среднего уровня в будущем на 1 м.

Сезонные колебания уровня в Гельголандской бух. невелики и составляют ~0.2–0.3 м; при этом максимальный уровень наблюдается в мае, минимальный – в декабре [1].

Приливы

Приливы в Северном море правильные полусуточные, величиной ~3 м.

По состоянию на 1980-е гг. расчетные (типовые) характеристики приливов в устье эстуария Эльбы (г/п Куксхафен) по данным В. Сиферта [18] следующие: средняя ПВ составляет +1.50 м над NN (NN – это ординар в Амстердамской системе высот, принятой и для Северного моря), средняя МВ –1.55 м относительно NN, СПУ равен –0.05 м относительно NN, средняя величина приливов равна 3.05 м; средние время роста, время падения уровня и период прилива равны 5 ч 40 мин, 6 ч 45 мин и 12 ч 25 мин соответственно. Указанные характеристики прилива приняты в [18] в качестве “входных” для эстуария Эльбы.

Согласно [16] средние величины сизигийного и квадратурного приливов в устьевом створе эстуария Эльбы составляют 4.1 и 2.7 м соответственно.

Характеристики приливов в Гельголандской бух. не остаются постоянными. Как показывают данные табл. 3, ЭПУМ в XIX–XX вв. сопровождалось некоторым ростом величины приливов. При этом отметки ПВ росли немного быстрее ЭПУМ, а отметки МВ – медленнее [20].

Сходные данные, но для отдельных г/п в Гельголандской бух., получил В. Сиферт [18]. Отметки ПВ за 1930–1980 гг. на г/п Гельголанд и Боркум возросли соответственно на 8 и 14 см. На входе в эстуарий Эльбы (г/п Куксхафен) за 1930–1960 гг. высоты ПВ повысились с 1.35 до 1.40 м NN (всего на 5 см), а отметки МВ не изменились, оставаясь равными –1.50 м NN. Соответственно на 5 см увеличилась и величина приливов $\Delta H_{\text{пр}}$ (с 2.85 до 2.90 м). Но за 1960–1990 гг. высоты ПВ и МВ изменились более заметно: ПВ с 1.40 до 1.55 м (повышение на 15 см) и МВ с –1.50 до –1.60 м (понижение на 10 см), а $\Delta H_{\text{ср}}$ увеличилась с 2.90 до 3.15 м (на 25 см). Произошедшие изменения характеристик прили-

вов в [18] объясняются ЭПУМ, но в большей мере – гидротехническими работами в эстуарии Эльбы.

Согласно другим данным того же автора [18] отметки ПВ на г/п Куксхафен с 1890 по 1980 г. поднялись на 25 см (тренд за 90 лет составил 2.8 мм/год и оказался немного больше, чем для всей Гельголандской бух. по [22] (табл. 3)).

Изменения характеристик приливов в Гельголандской бух. следует ожидать и в будущем по мере дальнейшего ЭПУМ. Расчеты ожидаемых изменений характеристик приливов сделаны в [17, 19, 20] с помощью двумерной гидродинамической “шельфовой” модели, основанной на решении уравнений мелкой воды. Расчет сделан для различных г/п в Гельголандской бух. и в устье Эльбы для случая, когда ЭПУМ составит 1 м. При этом приняты следующие допущения: характеристики приливов на внешних границах шельфа (на глубинах >1000 м), метеорологические и морфологические условия сохраняются такими же, как в настоящее время.

Результаты расчетов показали, что при фоновых уровнях воды в бухте, превышающих современные на 1 м, отметки ПВ и МВ повысятся, но первые из них – больше, а вторые – меньше, чем на 1 м. В результате величина приливов возрастет по сравнению с современной, например, на г/п Гельголанд, Боркум, Куксхафен и Гамбург–Сан-Паули на 5, 14, 30 и 60 см соответственно [19, 20]. Расчеты также показали, что скорости приливных и отливных течений в бухте возрастут [18].

Штормовые нагоны

Штормовые нагоны оказывают на режим Гельголандской бух., эстуарий Эльбы и берега бульшее воздействие, чем приливы.

Согласно [18–20] штормовые нагоны в Северном море, в том числе Гельголандской бух., связаны с глубокими циклонами, распространяющимися над морем в осенне-зимний период. Авторы [18] выделили три типа циклонов: ютландские,двигающиеся от Великобритании к Ютландии между 55 и 57° с.ш.; скандинавские, возникающие над Гренландией или Исландией и пересекающие Скандинавию между 60 и 65° с.ш.; скагерракские, траектории которых находятся между путями движения циклонов предыдущих двух типов.

Циклоны первого (ютландского) типа имеют большую скорость перемещения и вызывают на южных берегах Северного моря непродолжительные, но очень сильные штормовые нагоны. Наибольшую величину в устье Эльбы имеют обычно именно такие штормовые нагоны (например, нагон 2–4 января 1976 г.) (рис. 3а).

Циклоны второго (скандинавского) типа сопровождаются длительными сильными западными ветрами, “нагоняющими” большие массы воды в восточную часть Северного моря, включая Гель-

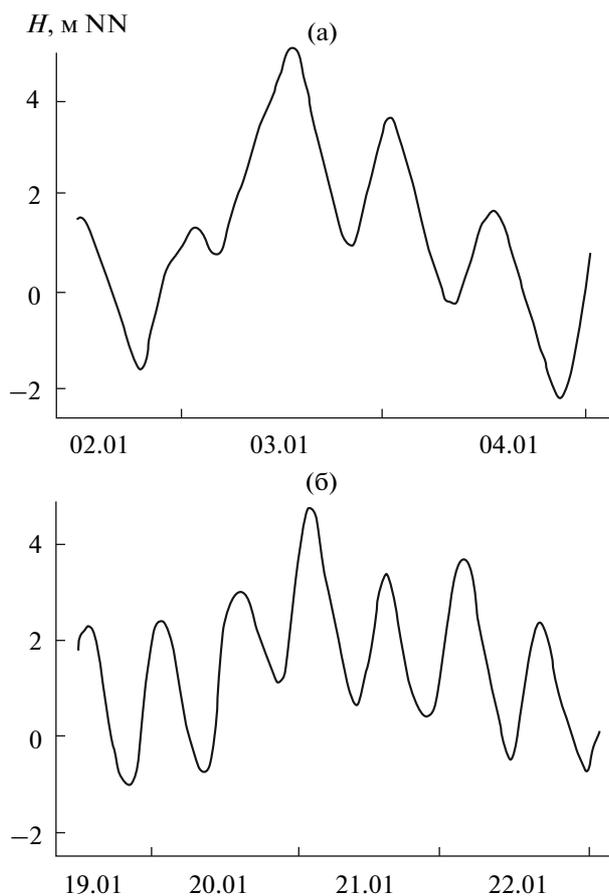


Рис. 3. Колебания уровней воды на г/п Куксхафен во время штормовых нагонов 2–4 января 1976 (а) и 19–22 января 1976 (б) гг. по [19].

голандскую бух. Штормовые нагоны, формирующиеся в бухте на фоне повышенных уровней воды (например, нагон 19–22 января 1976 г.) (рис. 3б), обычно более продолжительны, чем в предыдущем случае.

Циклоны третьего (скагерракского) типа похожи на циклоны скандинавского типа. Они могут вызывать продолжительные нагоны в юго-восточной части Северного моря (например, нагон 24 ноября 1981 г.).

По аналогии с расчетным (типовым) приливом В. Сиферт [18] приводит данные о “расчетном” нагоне на входе в эстуарий Эльбы (г/п Куксхафен). В качестве исходных взяты данные о штормовом нагоне 16–17 февраля 1962 г., экстремальном в этом пункте за предыдущие 60 лет. Для этого нагона приняты следующие характеристики: относительная величина нагона $\Delta H_{\text{нр}}$ над МВ равна 4.30 м, над ПВ (ее отметка +1.50 м NN) – 3.75 м. Таким образом, вследствие нелинейного взаимодействия прилива и нагона величина $\Delta H_{\text{нр}}$ над ПВ оказалась на 0.55, или 13%, меньше, чем над МВ. Абсолютно максимальный уровень при этом нагоне H_{max} составил 3.75 +

+ 1.50 = 5.25 м NN. Для двух других наибольших за весь период наблюдений нагонов на г/п Куксхафен получены такие данные: при нагоне 3 января 1976 г. $\Delta H_{\text{нр}}$ над ПВ равно 3.65 м, $H_{\text{max}} = 5.15$ м NN (рис. 3а); при нагоне 3–4 февраля 1825 г. $\Delta H_{\text{нр}}$ над ПВ равно 3.6 м, $H_{\text{max}} = 5.10$ м NN.

Режим штормовых нагонов в Гельголандской бух. во второй половине XX в. заметно изменился. Крупные нагоны стали отмечаться чаще, максимальные уровни H_{max} и продолжительность нагонов τ увеличились [11]. При этом увеличение τ оказалось пропорциональным росту величин H_{max} . Особенно заметно H_{max} и τ увеличились в Гельголандской бух. после 1960 г. В этот период случились самые крупные и катастрофические нагоны в XX в. – в 1962, 1976 (дважды), 1981 и 1990 гг. Величины H_{max} оказались на 30–50 см больше, чем в предыдущий период. Как указано в [11], это не может быть объяснено ЭПУМ, которое за 1900–1990 гг. составило всего 14 см.

Причиной отмеченных аномалий в режиме штормовых нагонов после 1960 г. считают климатический фактор [11], причем подчеркивается, что метеорологические условия изменились не только в Северном море, но и в целом в Северной Атлантике. В [9] также отмечено, что начиная с 1970 г. над Северной Атлантикой активизировалась циклоническая деятельность, что привело к более частым нагонным повышению уровня моря.

В [11] полагают, что возможная причина активизации циклонической деятельности – в увеличении термических градиентов между полярным и тропическим регионами и в изменении связанного с этим характера крупномасштабной атмосферной циркуляции, изменении путей циклонов и влиянии парникового эффекта. Кроме того, Северное море представляет собой весьма чувствительную систему, интегрирующую разнообразные внешние воздействия. В [11] высказана экзотическая гипотеза о том, что на атмосферу над Северной Атлантикой, через которую проходят самые оживленные авиамаршруты (>120 тыс. рейсов в год), воздействуют миллионы тонн керосина, сбрасываемого самолетами, а загрязнение воздуха может способствовать образованию облаков и штормов.

Как может измениться характер штормовых нагонов в Гельголандской бух. и на входе в эстуарий Эльбы в дальнейшем, при прогнозируемом значительном ЭПУМ? Модельные расчеты возможных изменений H_{max} при нагонах в Гельголандской бух. в будущем при ЭПУМ, равном 1 м, сделаны в [20]. Методика и условия расчетов были теми же, что и при расчетах ожидаемых изменений характера приливов.

С помощью уже упомянутой “шельфовой” гидродинамической модели для ряда г/п в Гельголандской бух. проведены расчеты возможного увеличе-

ния отметок максимальных уровней воды во время сильных нагонов в случае, если ЭПУМ составит 1 м (это в целом соответствует прогнозам на XXI в.). Расчеты проведены на примере нескольких крупных нагонов, произошедших в недалеком прошлом, но при условии, что средний уровень в Гельголандской бух. будет стоять на 1 м выше, чем прежде (табл. 4).

Расчеты показали, что H_{\max} во время нагонов в условиях повышения среднего уровня моря на 1 м на всех г/п в Гельголандской бух. должны повыситься, однако, в отличие от ПВ при приливах, которые повысятся более чем на 1 м (табл. 3), при нагонах рост H_{\max} может быть как больше, так и меньше ЭПУМ, равного 1 м (табл. 4). Как указано в [18], это связано с типом циклона, вызывающего штормовой нагон. При циклонах “скандинавского” (как 22–23 января 1976 г.) или “скагерракского” (как 24 ноября 1981 г.) типов рост H_{\max} будет, как правило, превышать ЭПУМ, а при циклонах “ютландского” типа (как 3 января 1976 г.) – будет меньше ЭПУМ (табл. 4). В [18] такие закономерности объяснены следующим образом.

При “скандинавских” и “скагерракских” циклонах сильные и продолжительные западные ветры вызывают поступление больших объемов морских вод в восточную часть Северного моря и приводят к устойчивому повышению уровня, особенно сильному – у юго-восточных берегов Гельголандской бух. В условиях ЭПУМ это создает эффект дополнительного повышения среднего уровня моря, на фоне которого формируются штормовые нагоны. Поэтому во время циклонов этих типов в условиях ожидаемого ЭПУМ величины H_{\max} во время нагонов должны превышать ЭПУМ (табл. 4). Циклоны “скандинавского” и “скагерракского” типов в условиях ожидаемого существенного ЭПУМ увеличат H_{\max} , причем наиболее заметно – у юго-восточных берегов Гельголандской бух. и при входе в эстуарий Эльбы.

При циклонах “ютландского” типа развиваются сильные, но кратковременные штормовые нагоны без общего длительного подъема фоновый уровень в бухте. В условиях ожидаемого ЭПУМ на 1 м соответствующее увеличение глубины должно ослабить воздействие ветра на водную толщу и немного уменьшить относительную величину нагона над средним уровнем моря. Поэтому рост H_{\max} во время таких циклонов должен оказаться меньше величины ЭПУМ (табл. 4).

ПРИЛИВЫ И ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ В ЭСТУАРИИ ЭЛЬБЫ И В ГАМБУРГЕ

Приливы

Проблема изучения приливов и штормовых нагонов в эстуарии Эльбы имеет особое значение,

Таблица 4. Результаты расчета возможного изменения H_{\max} на примере нагонов, вызванных циклонами разного типа, в случае ЭПУМ на 1 м по [20]

Г/п	Дата нагона	Повышение H_{\max} с учетом ЭПУМ, см	Изменение H_{\max} по сравнению с ЭПУМ, см
Гельголанд	03.01.1976	92	–8
	22–23.01.1976	106	+6
	24.11.1981	104	+4
Боркум	03.01.1976	92	–8
	22–23.01.1976	100	0
	24.11.1981	101	+1
Хузум	03.01.1976	93	–7
	22–23.01.1976	102	+2
	24.11.1981	100	0
Куксхафен	03.01.1976	86	–14
	22–23.01.1976	106	+6
	24.11.1981	106	+6
Гамбург– Сан-Паули	03.01.1976	91	–9
	22–23.01.1976	121	+21
	24.11.1981	109	+9

прежде всего, в связи с воздействием этих явлений на уровни воды в районе города и порта Гамбург.

Приливные колебания уровня в эстуарии Эльбы регулярны, в целом невелики и поэтому особого негативного влияния на функционирование порта Гамбург не оказывают.

О характеристиках приливов в Гамбурге (на г/п Сан-Паули) хорошее представление дают данные табл. 5. В 1980-х гг. средняя величина приливов здесь составляла 3.35 м, т.е. была на 0.30 м больше, чем на г/п Куксхафен.

В Гамбурге период прилива, как и в Куксхафене, составляет типичную для полусуточных приливов величину – 12 ч 25 мин, а время роста τ_p и падения уровня τ_n равны в среднем 5 ч 25 мин и 7 ч 00 мин соответственно. В Гамбурге τ_p на 15 мин меньше, а τ_n – на 15 мин больше, чем в Куксхафене, что свидетельствует о перекосе приливной волны при ее движении между упомянутыми пунктами.

Как видно из табл. 5, характеристики приливов существенно изменились, особенно в 1960–1990 гг. За 1930–1960 гг. отметки ПВ повысились с 1.55 до 1.70 м NN, т.е. на 15 см (больше, чем на г/п Куксхафен). Отметки МВ не изменились, оставаясь равными –1.70 м NN. Соответственно на 15 см возросла и величина приливов $\Delta H_{\text{пр}}$ (с 2.25 до 2.40 м). Но после 1960 г. отмечено заметное увеличение отметок ПВ – с 1.70 до 2.10 м NN (на 40 см) и существенное снижение отметок МВ – с –0.70 до –1.35 м NN (на 65 см). Намного возросли и величины $\Delta H_{\text{пр}}$ – с 2.40

Таблица 5. Осредненные характеристики приливов (ПВ и МВ, м NN, величина прилива $\Delta H_{\text{пр}}$, м) на г/п Куксхафен и Гамбург и их изменение между этими постами. Исходные данные по [18]

Год	Куксхафен			Гамбург			Изменение между постами, м		
	ПВ	МВ	$\Delta H_{\text{пр}}$	ПВ	МВ	$\Delta H_{\text{пр}}$	ПВ	МВ	$\Delta H_{\text{пр}}$
1930	1.35	-1.50	2.85	1.55	-0.70	2.25	+0.20	+0.80	-0.60
1940	1.37	-1.50	2.87	1.60	-0.70	2.30	+0.23	+0.80	-0.57
1950	1.39	-1.45	2.84	1.65	-0.70	2.35	+0.26	+0.75	-0.49
1960	1.40	-1.50	2.90	1.70	-0.70	2.40	+0.30	+0.80	-0.50
1970	1.42	-1.50	2.92	1.80	-1.00	2.80	+0.38	+0.50	-0.12
1980	1.50	-1.55	3.05	2.05	-1.30	3.35	+0.55	+0.25	+0.30
1990	1.55	-1.60	3.15	2.10	-1.35	3.45	+0.55	+0.25	+0.30

до 3.45 м (на 1.05 м). Эти изменения характеристик приливов в [18] объясняются, прежде всего, обвалованием приливных осушек, строительством защитных дамб после наводнения в феврале 1962 г., а также углублением русла эстуария для навигационных целей.

Интересно отметить, как изменились перепады приливных уровней на участке Куксхафен–Гамбург протяженностью 101 км (табл. 5). Если до 1960 г. геометрическое место полных вод (ГМПВ), т.е. линия, огибающая сверху отметки наибольших приливных уровней воды, повышалась на рассматриваемом участке на 0.20–0.30 м, то после 1960 г. повышение ГМПВ увеличилось до 0.55 м. Заметно изменилась и крутизна геометрического места малых вод (ГММВ): до 1960 г. ГММВ на рассматриваемом участке повышалась на 0.75–0.80 м, а после 1960 г. – лишь на 0.25 м. Эти изменения также связаны с гидротехническими работами в эстуарии Эльбы. Важно отметить, что вследствие этих работ величина приливов вдоль участка Куксхафен – Гамбург до 1970 г. уменьшалась, а в последующий период стала увеличиваться.

Штормовые нагоны

Несравнимо большую угрозу для хозяйства Гамбурга и его населения представляют крупные штормовые нагоны.

Таблица 6. Максимальные уровни воды на г/п Гамбург–Сан-Паули во время штормовых нагонов с 1751 по 1983 г. по [21]

Дата	H_{max} , м NN	Дата	H_{max} , м NN
11.09.1751	5.1	07.12.1973	5.33
08.10.1756	5.2	03.01.1976	6.45
10.12.1792	5.2	21.01.1976	5.58
04.02.1825	5.2	24.11.1981	5.81
02.01.1855	5.18	26.11.1981	5.53
17.02.1962	5.70	02.02.1983	5.15

мальные нагоны. Вся история Гамбурга и его развития связана с периодическими наводнениями, вызванными штормовыми нагонами и борьбой с ними. Такие наводнения зафиксированы здесь еще в XIII в. Согласно историческим сведениям [21] крупные наводнения, вызванные штормовыми нагонами, случались в Гамбурге 28 декабря 1248 г., 16 января 1362 г., 21 ноября 1412 г., 1 ноября 1570 г., 26 февраля 1625 г., 25 января 1634 г., 24–25 декабря 1717 г. Эти наводнения наносили городу и его окрестностям огромный ущерб (человеческие жертвы, гибель скота, разрушение строений).

Начиная с середины XVIII в. начали фиксировать высоты максимальных подъемов уровня воды во время нагонов (табл. 6). В течение >200 лет до 1962 г. в Гамбурге не произошло ни одного нагона, превысившего отметку 5.2 м NN. Но с 1962 по 1983 г. таких нагонов было уже шесть, при этом три из них (в 1976, 1981 и 1962 гг.) были наиболее крупными.

Из крупных нагонов второй половины XX в. наиболее неожиданным и разрушительным стал нагон в ночь с 16 на 17 февраля 1962 г. Город оказался не готовым принять удар стихии. В Гамбурге было затоплено 12.5 тыс. га земель (1/6 площади города), погибли 315 жителей, 20 тыс. строений пострадало [21]. После этой катастрофы начались крупномасштабные работы по защите Гамбурга и берегов эстуария от наводнений.

Как показывает анализ колебаний уровня воды в Гамбурге во время крупных нагонов, наблюдаемые уровни воды – результат нелинейного сложения нагонной и приливной волн. Например, 16–17 февраля 1962 г. (рис. 4) на г/п Гамбург–Сан-Паули в изменениях уровня отмечены три пика (4.00, 5.70 и 4.10 м NN), соответствующие ПВ приливных колебаний (в 16.00 16 февраля, 03.00 и 16.30 17 февраля). Между пиками зафиксированы два понижения уровня до отметки 2.80 м NN (в 21.30 16 февраля и 11.00 17 февраля), соответствующие МВ в приливных колебаниях. Кривая прилива, показанная на рис. 4 и полученная путем предвычисления, типична для района Гамбурга и характеризует те

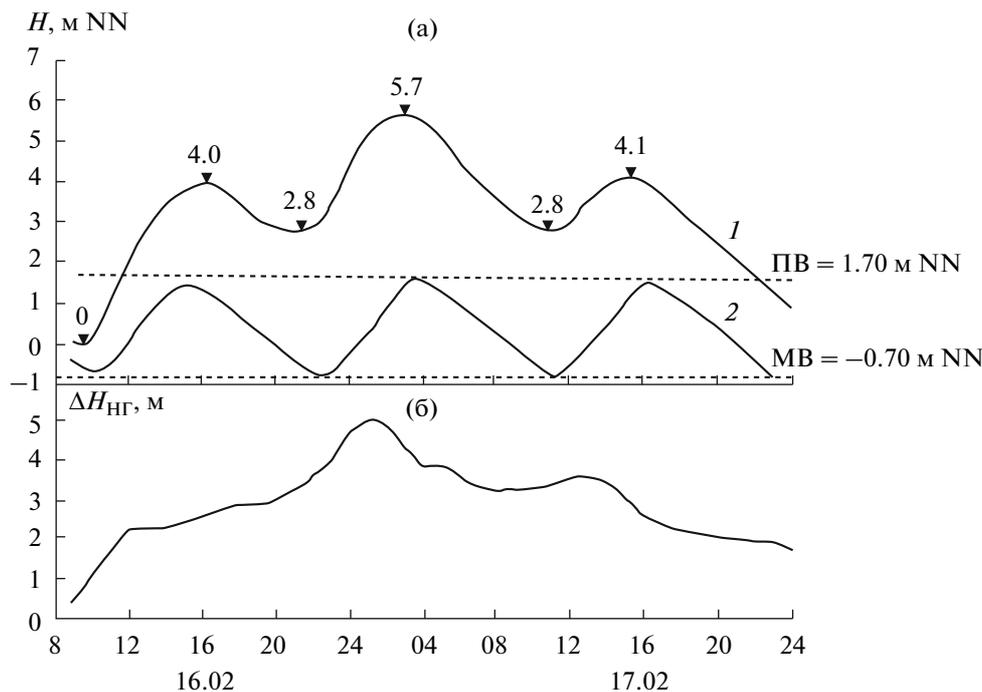


Рис. 4. Изменения во время штормового нагона 16–17 февраля 1962 г. на г/п Гамбург–Сан-Паули. а – наблюдаемого суммарного (1) и предвычисленного приливного (2) уровня воды, б – относительной величины нагонного повышения уровня по [21].

приливные колебания уровня, которые наблюдались бы здесь при отсутствии нагона. Параметры этой кривой: ПВ составляет +1.70 м NN, МВ равна -0.7 м NN, величина прилива 2.40 м, время роста уровня 5 ч 25 мин, время падения 7 ч 00 мин, период прилива 12 ч 25 мин.

Как видно из рис. 4, продолжительность нагона 16–17 февраля 1962 г. составила ~35 ч. Наибольшая относительная величина нагона (разность между фактическими и предвычисленными приливными уровнями) оказалась равной 5.1 м, что больше $\Delta H_{нг}$ в моменты H_{max} и ПВ (рис. 4). Несовпадение величин H_{max} , ПВ и максимума $\Delta H_{нг}$ и времени их наступления свидетельствует о сложном нелинейном взаимодействии штормовых нагонов и приливов.

В. Сиферт [18] приводит интересные данные по сравнению отметок максимальных уровней при нагонах ΔH_{max} на г/п Куксхафен и Гамбург–Сан-Паули (табл. 7) В начале XX в. разница в ΔH_{max} на упомянутых г/п составляла 0.20–0.25 м. В 1970–1990 гг. она выросла до 0.90 м. Одновременно существенно уменьшилось время распространения волн нагонов вдоль участка Куксхафен – Гамбург длиной 101 км: с 4 ч 30 мин до 3 ч 30 мин. Соответственно возросла и скорость перемещения нагонных волн с 6.2 до 8.0 м/с (табл. 7), что объясняется значительным углублением фарватера в конце XX в.

Изменение характеристик штормовых нагонов в Гамбурге и их трансформация на участке Куксха-

фен–Гамбург может быть проиллюстрирована на примере пяти экстремальных нагонов в XIX–XX вв. (табл. 8). Обращают на себя внимание факты заметного возрастания максимальных высот ΔH_{max} и относительных величин нагонов $\Delta H_{нг}$ в Гамбурге и увеличения разницы в этих характеристиках между г/п Куксхафен и Гамбург в конце XX в. Все отмеченные изменения характеристик штормовых нагонов

Таблица 7. Осредненные характеристики трансформации волн штормовых нагонов на участке Куксхафен–Гамбург длиной 101 км. Исходные данные по [18]

Годы	Средняя разница в отметках	Время распространения волны нагона, ч–мин	Скорость распространения волны нагона	
			км/ч	м/с
1900	+0.20	4–30	22.4	6.2
1910	+0.20	4–30	22.4	6.2
1920	+0.25	4–30	22.4	6.2
1930	+0.25	4–30	22.4	6.2
1940	+0.25	4–30	22.4	6.2
1950	+0.40	4–25	22.9	6.4
1960	+0.40	4–15	23.8	6.6
1970	+0.45	4–00	25.2	7.0
1980	+0.90	3–30	28.8	8.0
1990	+0.90	3–30	28.8	8.0

Таблица 8. Сравнение характеристик экстремальных штормовых нагонов на г/п Куксхафен и Гамбург. Исходные данные по [18] (в скобках – приближенные данные)

Дата нагона в Гамбурге	Куксхафен			Гамбург			Изменение между постами		
	H_{\max} при ПВ	ПВ	$\Delta H_{\text{нг}}$ при ПВ	H_{\max} при ПВ	ПВ	$\Delta H_{\text{нг}}$ при ПВ	H_{\max} при ПВ	ПВ	$\Delta H_{\text{нг}}$ при ПВ
04.02.1825	5.00	(1.40)	(3.60)	5.20	(1.50)	(3.70)	+0.20	+0.10	+0.10
17.02.1962	5.20	1.40	3.75	5.70	1.70	4.00	+0.50	+0.30	+0.25
03.01.1976	5.15	1.50	3.65	6.45	1.90	4.55	+1.30	+0.40	+0.90
21.01.1976	4.60	1.50	3.10	5.58	1.90	3.68	+0.98	+0.40	+0.53
24.01.1981	4.80	1.50	3.25	5.81	2.05	3.76	+1.01	+0.55	+0.51

в [18] объясняются воздействием крупномасштабных гидротехнических работ в эстуарии Эльбы.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ В ЭСТУАРИИ ЭЛЬБЫ

Проблема оценки воздействия местных гидротехнических мероприятий (обвалования берегов, углубления и выправления русла и др.) на режим как приливов, так и нагонов в устьях рек приобрела большую актуальность еще в XIX в. в связи с необходимостью улучшения судоходных условий. Однако надежных оценок и тем более обобщений в этом вопросе в научной литературе не было. Первые результаты были получены лишь в XX в. после дноуглубительных и русловыправительных работ в ряде эстуариев мира. Обзор таких оценок по эстуариям Сены, Жиронды, Колумбии сделан в работах [5–7].

Аналогичный обзор влияния местных гидротехнических работ на приливы и нагоны в эстуарии Эльбы представляет особый интерес, во-первых, в связи с тем, что в этом эстуарии осуществлен целый комплекс защитных и дноуглубительных мероприятий, а во-вторых, в этом эстуарии были проведены надежные наблюдения. Кроме того, выполнен ряд расчетов. Опыт таких оценок может представлять большой практический интерес в связи с освоением водных ресурсов эстуариев рек как в России, так и в других странах.

Анализ данных наблюдений за колебаниями уровней воды при приливах и нагонах в г. Гамбурге, проведенный в предыдущем разделе и отраженный в табл. 5–8, позволяет сделать вывод: существенное повышение уровней воды в эстуарии Эльбы и Гамбурге, произошедшее в последние десятилетия XX в., нельзя объяснить изменениями ни среднего уровня моря, ни параметров приливов и штормовых нагонов в прибрежной зоне моря и в устье эстуария (г/п Куксхафен). Выявленные особенности режима приливных и нагонных повышений уровня в Гамбурге в [18] объяснены в основном комплексом гидротехнических мероприятий в эстуарии Эльбы.

Углубление фарватера в эстуарии с 10 до 13.5 м началось еще в 1950-е гг. и было продолжено в по-

следние десятилетия XX в. Хотя защитные дамбы вдоль берегов эстуария начали строить давно, наиболее крупные защитные мероприятия были проведены после наводнения в феврале 1962 г. На многих берегах, приливных осушках и островах были построены новые современные дамбы, а старые реконструированы. Отметки большинства гребней защитных дамб были доведены до +7.20 м NN [21]. Специальными регулируемыми нагонными барьерами были также перекрыты устья небольших притоков, впадающих в эстуарии Эльбы.

В [18] проведен отдельный анализ гидрологических последствий различных гидротехнических мероприятий, осуществленных в эстуарии Эльбы. Анализ был сделан по данным наблюдений и с помощью одномерной гидродинамической модели MIKE-11 Датского гидравлического института.

Основным гидротехническим мероприятием, оказавшим наибольшее влияние на режим приливов и нагонов в эстуарии Эльбы, признано обвалование берегов и приливных осушек (рис. 2). На максимальные уровни воды при нагонах H_{\max} обвалование в разных местах эстуария повлияло по-разному. Так, новое обвалование левобережной приливной осушки Нордкхединген площадью 56 км² вблизи устья эстуария привело к понижению H_{\max} в Гамбурге на величину от 2–3 см (при H_{\max} от 4 до 5 м NN) до 8 см (при $H_{\max}=7$ м NN). Понижение H_{\max} в результате этого обвалования, по-видимому, связано с тем, что в результате существенного сужения русла при высоких уровнях во время нагонов сократилось поступление вод из моря в эстуарий.

Наоборот, обвалование других участков берегов привело к более ожидаемому росту величин H_{\max} . Так, обвалование поймы Хасельдорф площадью 12 км² привело к увеличению H_{\max} в Гамбурге при уровнях выше 4 м NN на ~5 см.

Повышение H_{\max} в подобных случаях объясняется тем, что один и тот же расход воды при нагоне в условиях обвалованного русла должен проходить при более высоком уровне. Это обычная закономерность, свойственная речным руслам [4].

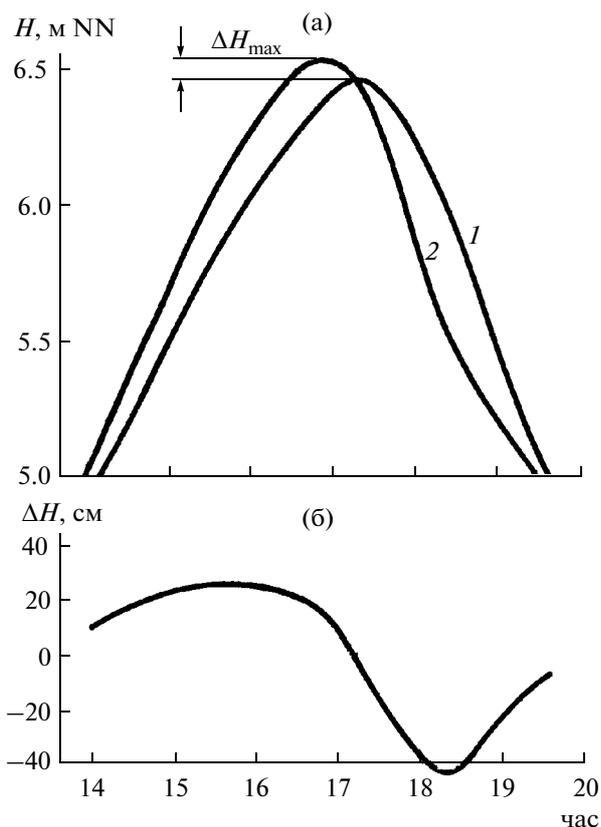


Рис. 5. Трансформация кривой изменения уровня воды на г/п Гамбург–Сан-Паули при типичном нагоне до (1) и после (2) сооружения защитных дамб (а) и соответствующая разница в уровнях (б) по [18].

Согласно [18] нагонная волна в обвалованном русле перемещается быстрее, чем в необвалованном (рис. 5). В фазу подъема типичного нагона уровни в новых условиях стали выше на 10–30 см, а в фазу спада нагона – на 10–40 см ниже. Величина H_{\max} в новых условиях стала больше на ~10 см (рис. 5).

Перекрытие устьев трех небольших притоков Крюкау, Пиннау, Штёр на берегах эстуария привело к повышению уровней воды на г/п Стадерзанд, Гамбург–Сан-Паули и Цолленспикер (рис. 2) соответственно на 5, 5 и 10 см при уровнях ниже 4 м NN и 10, 10 и 15 см при уровнях выше 5.5 м NN.

Углубление фарватера с 10 до 13.5 м вызвало повышение H_{\max} на г/п Стадерзанд, Гамбург–Сан-Паули и Цолленспикер на 5–10, 15 и 15 см соответственно и привело к существенному понижению МВ при приливах, о чем свидетельствуют данные табл. 5.

Обобщив оценки воздействия комплекса гидротехнических мероприятий на максимальные уровни во время нагонов в Гамбурге, В. Сиферт [18] установил, что с 1950 по 1980 г. вследствие сооружения новых защитных дамб и противонагонных барьеров на притоках, углубления и выправления фарватера

величины максимальных уровней H_{\max} на г/п Гамбург–Сан-Паули при средних и крупных нагонах возросли соответственно на 0.2–0.4 и 0.5–0.6 м (табл. 7 и 8).

Можно добавить, что суммарным итогом роста H_{\max} и углубления русла стало ускорение перемещения волн нагонов вдоль эстуария Эльбы. Это объясняется, в основном, увеличением глубины русла. Приблизительно примем, что глубина возросла на ~4 м (на 0.5 м вследствие роста H_{\max} и на 3.5 м в результате углубления фарватера). В этом случае суммарное увеличение глубины в 1.4 раза (с 10 до 14 м) в соответствии с формулой (4) должно было привести к увеличению скорости распространения волн нагона в 1.2 раза, что близко к результатам наблюдений (табл. 7).

ВЫВОДЫ

Взаимодействие в устьях рек речного стока, приливов, происходящего в условиях глобального потепления эвстатического повышения уровня моря и участвовавших и усилившихся в последние десятилетия штормовых нагонов – сложно, нелинейно и еще недостаточно изучено. Гидродинамические модели пока не позволяют полно и адекватно описать эти процессы.

Результаты наблюдений показали, что вблизи устья Эльбы в XX в. заметно повысился средний уровень Северного моря и несколько изменились параметры приливов. Во второй половине XX в. существенно участились и усилились штормовые нагоны в Северном море и устье Эльбы. В эстуарии Эльбы возросли максимальные уровни при нагонах, относительная величина нагонов и скорость распространения нагонных волн. Изучение этих процессов очень актуально в связи с проблемой защиты Гамбурга от наводнений.

Значительные изменения режима нагонов в эстуарии Эльбы и Гамбурге не могут быть объяснены только изменениями среднего уровня моря, приливов и нагонов в прибрежной зоне моря. Наиболее существенные изменения режима приливов и нагонов в Гамбурге объясняются воздействием местных гидротехнических мероприятий, в частности, защитного обвалования берегов эстуария, дноуглубительных и русловыправительных работ.

Анализ опыта изучения упомянутых процессов может представлять интерес при разработке гидротехнических, водохозяйственных и природоохранных мероприятий в устьях рек России и мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
2. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 638 с.

3. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливых устьях рек. М.: Гидрометеоздат, 1971. 260 с.
4. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
5. Михайлова М.В. Гидролого-морфологические процессы в устьевой области р. Колумбии (США) и их изменения под воздействием крупномасштабных гидротехнических мероприятий // Вод. ресурсы. 2008. Т. 33. № 2. С. 147–165.
6. Михайлова М.В., Исупова М.В. Циркуляция вод, динамика наносов и эрозионно-аккумулятивные процессы в эстуарии Жиронда (Франция) // Вод. ресурсы. 2006 Т. 33. № 1. С. 14–28.
7. Михайлова М.В., Исупова М.В. Динамика вод и наносов в эстуарии и на устьевом участке р. Сены // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 1. С. 41–55.
8. Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 631 с.
9. Climate Change 2007. Synthesis Report. Summary for Policymakers // www.ipcc.ch
10. Dai A., Trenberth K.E. Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations // J. Hydrometeorology. 2002. V. 3. P. 661–687.
11. Führböter A., Töppe A. Duration of storm tides at high water levels // Storm surges, river flow and combined effects. Int. Workshop. Hamburg: UNESCO, 1991. P. 45–54.
12. <http://grdc.bafg.de>
13. http://en.wikipedia.org/wiki/2002_European_floods
14. Kühl H. Hydrography and biology of the Elbe estuary // Oceanogr. Mar Biol. Ann. Rev. 1972. № 10. P. 225–309.
15. Milliman J.D., Rutkowski Ch., Meybeck M. River discharge to the sea. A Global River Index (GLORI) // LOICZ Reports and Studies. 1995. 125 p.
16. Pfeiffer K.D., Dume K.C. Three-dimensional modeling of tides, storm surges and river flow in the Elbe, Tapi and Pearl estuaries // Storm surges, river flow and combined effects. Intern. Workshop. Hamburg: UNESCO, 1991. P. 65–74.
17. Salomons W., Schwedhalm E.E., Schoer J., Knauth H. Natural traces to determine the origin of sediments and suspended matter from the Elbe estuary // Water Sci. Technol. 1988. V. 20. № 67. P. 89–102.
18. Siefert W., Murty T.S. Storm surges, river flow and combined effects. State of the Art Report. Koblenz, 1991. 151 p.
19. Stengel T., Zielke W. Dynamic reaction of the North Sea to the storm tides under present conditions and following a rise in mean sea level // Storm surges, river flow and combined effects. Int. Workshop. Hamburg: UNESCO, 1991. P. 99–110.
20. Stengel T., Zielke W. Recent and expected variations of the tide dynamics in the German Bight // Sea level changes and their consequences for hydrology and water management. Intern. Workshop. Nordwijkerhout: UNESCO, 1993. P. 83–92
21. Sturmfluten und Hochwasserschutz in Hamburg. Hamburg, 1990. 60 s.
22. Töppe A. Longtime cycles in mean tidal levels // Sea level changes and their consequences for hydrology and water management. Intern. Workshop. Nordwijkerhout: UNESCO, 1993. P. 133–143.