

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54(282.242.4:261.26)

ПРИЛИВЫ И ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ В ЭСТУАРИИ ТЕМЗЫ¹

© 2012 г. В. Н. Михайлов*, М. В. Михайлова**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

E-mail: vn.mikhailov@mail.ru

**Институт водных проблем РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 3

E-mail: mv.mikhailova@gmail.com

Поступила в редакцию 28.10.2010 г.

Рассмотрены процессы взаимодействия речного стока, приливов и штормовых нагонов в эстуарии Темзы. Выявлены основные закономерности динамики вод при приливах и нагонах. Установлены особенности изменения характеристик приливов и нагонов вдоль эстуария. Отмечено заметное многолетнее увеличение характеристик приливов и нагонов в XX в. Описана история наводнений в эстуарии Темзы и в районе Лондона, вызванных штормовыми нагонами. Рассмотрены гидротехнические меры для защиты Лондона от наводнений.

Ключевые слова: Темза, эстуарий, приливы, штормовые нагоны, динамика вод, наводнения, проникновение морских вод, защита от наводнений.

Исследования гидрологического режима эстуария Темзы в течение многих десятилетий для английских специалистов представляли не только научный, но и большой практический интерес. На берегах эстуария находится Лондон – столица Великобритании, один из крупнейших мегаполисов Европы с населением ~7.5 млн чел., крупный морской порт, важный промышленный, финансовый и культурный центр. Обеспечение судоходства по трассе Лондон – Северное море, водоснабжение Лондона и его окрестностей, предотвращение загрязнения вод, защита населения и хозяйства от речных и, особенно, морских (нагонных) наводнений требовало проведения широкомасштабных гидрологических исследований. В результате таких исследований накоплен большой опыт в анализе сложного взаимодействия речного стока, приливов и штормовых нагонов, разработана стратегия защиты находящихся на берегах эстуария объектов от наводнений и т.д. Эти знания и опыт, касающиеся не только самого объекта – эстуария Темзы, но и теории устьевых процессов в приливных устьях рек, в России известны плохо. Задача настоящей статьи – обзор и обобщение основных результатов исследований в эстуарии Темзы.

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

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭСТУАРИИ ТЕМЗЫ

Эстуарий Темзы длиной 72 км – часть устьевой области этой реки, которая включает также приливный устьевой участок длиной 30 км, ограниченный сверху плотиной у г. Тиддингтон, и устьевое взморье шириной 60 км – прибрежную зону Северного моря.

Вершиной эстуария считают Лондонский мост, от которого отсчитываются расстояния вверх и вниз по течению. Эстуарий Темзы имеет типичную для таких объектов воронкообразную форму (рис. 1). Его ширина возрастает от Лондонского моста до выхода в море от 265 м до 8 км. Глубина русла эстуария при среднем приливном уровне составляет от 7 до 10 м (в среднем ~8 м). Площадь эстуария ~117 км².

Сток р. Темзы, поступающий в эстуарий, невелик [3]. Среднемноголетние величины расхода воды и объема стока на плотине Тиддингтон составляют 78.5 м³/с и 2.48 км³/год [3]. Во время дождевых паводков расход воды может достигать 600–700 м³/с. Сток взвешенных наносов реки составляет всего 0.1–0.3 млн т /год [3].

Эстуарий Темзы макроприливный. На его морском входе (в устье эстуария) средние величины сизигийных и квадратурных приливов равны 5.3 и 3.3 м соответственно [3, 21]. В прибрежной зоне Северного моря и в эстуарии Темзы часто происходят штормовые нагоны. Величина нагона

Для количественной оценки режима эстуариев часто применяют приливный параметр Симмонса $\alpha = W_p/P_t$, т.е. отношение объема речного стока за приливный цикл к объему приливной призмы [11]. Приливная призма P_t – это объем морских вод, входящих в эстуарий в течение приливной фазы и вытекающих обратно в море в отливную фазу. Приливная призма приблизительно равна $F_3\Delta H_{пр}$, где F_3 – площадь эстуария, а $\Delta H_{пр}$ – средняя для всего эстуария величина прилива. При этом установлено, что при $\alpha < 0.1$ в режиме эстуария преобладает морское воздействие и происходит полное перемешивание вод по глубине, при значениях α от 0.1 до 1.0 для эстуария характерно умеренное перемешивание, при $\alpha > 1.0$ в эстуарии формируется клин осолоненных вод (слабое вертикальное перемешивание и сильная стратификация) [1, 11, 22]. Принимая для эстуария Темзы в качестве грубых оценок $F_3 \sim 117 \text{ км}^2$ и $\Delta H_{пр} \sim 5 \text{ м}$ [3], получим $P_t = 585 \text{ млн м}^3$.

Сравнение рассчитанных выше величин W_p и объема приливной призмы P_t показывает, что для всех четырех характерных расходов воды реки α оказывается намного меньше 0.1 (4.3×10^{-4} , 3.1×10^{-3} , 0.01 и 0.03 соответственно).

Проведенные оценки количественно подтверждают, что ведущий и постоянно действующий фактор в режиме эстуария Темзы – приливы и этот эстуарий характеризуется сильным вертикальным перемешиванием вод и очень слабой стратификацией вод.

О ведущей роли приливов в режиме эстуария Темзы также свидетельствует то, что максимальные расходы воды Q_{max} во время приливов во много раз превышают не только средние, но и наибольшие расходы воды реки Q_p . При этом оказывается, что чем створ измерений находится ближе к устью эстуария, тем Q_{max} больше (табл. 1). Это объясняется быстрым возрастанием по направлению к морю объема той части приливной призмы, которая расположена выше по течению от данного гидроствора.

Расходы в приливную фазу ($-Q_{\text{max}}$) и в отливную ($+Q_{\text{max}}$) имеют разный знак, но по величине близки друг другу. Определить по их разности речной расход воды Q_p нельзя по причине его малости в сравнении с большими приливными и отливными расходами.

Как следует из табл. 1, величины Q_{max} увеличиваются по направлению к морю по зависимости, близкой к экспоненциальной, что объясняется ростом и ширины и площади поперечного сечения эстуария в этом же направлении по аналогичному закону [3].

Таблица 1. Максимальные расходы воды Q_{max} во время приливного цикла на разных створах эстуария Темзы по [12]

Створ	Расстояние, км, от		Q_{max} , тыс. м ³ /с
	вершины эстуария (Лондонского моста)	устья эстуария	
Саутенд	69.2	2.8	42.5
Тилбери	41.4	30.6	12.7
Баркинг	20.0	52.0	4.25
Норт-Вулидж	17.0	55.0	3.68
Лондонский мост	0	72.0	1.42

Приливы в эстуарии Темзы

Изменения приливов вдоль эстуария. В устье эстуария Темзы величина приливов $\Delta H_{пр}$ составляет 4.5–5.5 м [3]. Вверх по эстуарию приливные колебания уровня распространяются до плотины Тиддингтон, т.е. на расстояние >100 км.

Распространяясь вверх по эстуарию, приливная волна трансформируется (рис. 2). Ее форма становится асимметричной: время роста приливного уровня немного уменьшается (приблизительно с 6 до 5.5 ч), а время его падения увеличивается (с 6 до 6.5 ч). $\Delta H_{пр}$, вычисляемая как разность отметок полной воды (ПВ) и малой воды (МВ), увеличивается вверх по эстуарию (на рис. 2 – с 5.7 м на г/п Саутенд вблизи устья эстуария до 6.9 м на г/п Причал Тауэр в 0.8 км ниже Лондонского моста).

Возрастание величины $\Delta H_{пр}$ вверх по эстуарию – характерная особенность многих приливных устьев (такое явление типично для эстуариев Мезени, Жиронды, Сены, Св. Лаврентия и др.). Причина этого – уменьшение ширины и площади поперечного сечения эстуария в сторону реки, приводящее на некотором протяжении эстуария к концентрации приливной энергии и росту $\Delta H_{пр}$. Далее в сторону реки уменьшение размеров русла (а главное – его глубины) ведет к увеличению потерь энергии потока на трение, что обычно вызывает быстрое уменьшение величины $\Delta H_{пр}$.

Характерный график затухания приливов вверх по эстуарию и устьевому участку Темзы получен Дж.Н. Хантом и приведен в [22]. Из этого графика следует, что вдоль эстуария от его устья до Лондонского моста (расстояния L ниже моста положительные, выше – отрицательные) $\Delta H_{пр}$ увеличивается с 5.5 до 6.7 м, а далее в сторону реки быстро уменьшается до 4.6 м у плотины Тиддингтон:

L , км	70	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30
$\Delta H_{пр}$, м	5.5	5.6	5.8	6.1	6.3	6.6	6.7	6.7	6.1	5.2	4.6

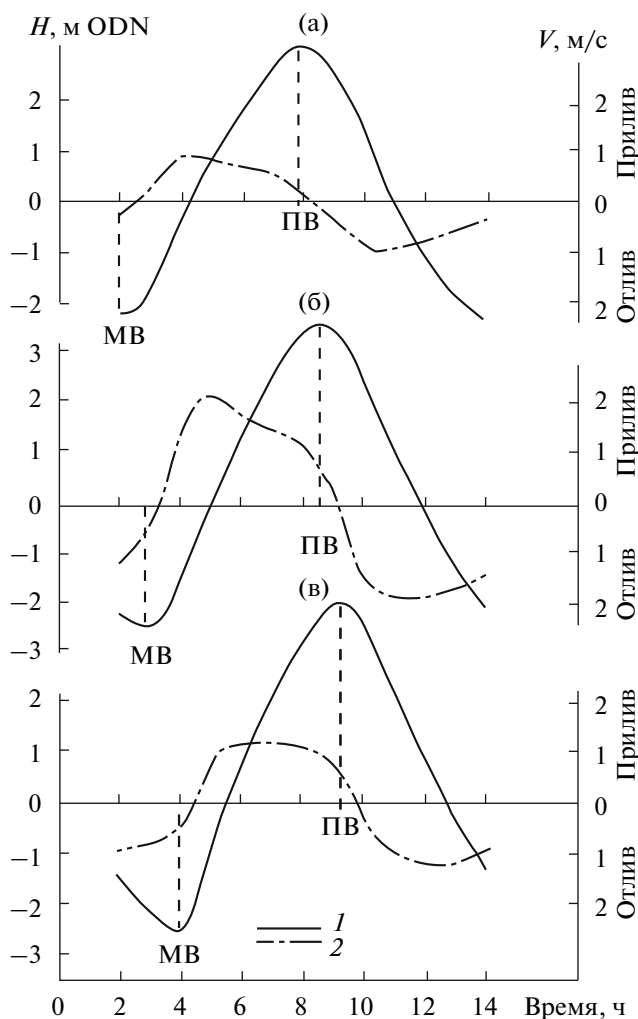


Рис. 2. Схема трансформации приливной волны при ее распространении по эстуарию Темзы. Гидрологические посты: Саутенд (а), Лонг-Рич (б) и Причал Тауэр (в) по [21]. Приливные колебания уровня воды (1) и средней скорости течения (2).

Приведенные данные об изменении величины $\Delta H_{\text{пр}}$ в эстуарии Темзы получены по измерениям в феврале 1948 г. и, возможно, уже сильно изменились после проведения дноуглубительных и других гидротехнических работ. Однако качественная картина трансформации приливов вдоль эстуария, безусловно, сохранилась.

Согласно расчетам Дж. Н. Ханта (цитировано по [22]), время движения пика приливной волны на участке от устья эстуария до Лондонского моста длиной 72 км составляло ранее 1.8 ч (скорость движения 40 км/ч). На протяжении устьевое участка от Лондонского моста до плотины Тиддингтон (30 км) время движения пика приливной волны составляет ~1.0 ч (скорость движения 30 км/ч). Отмеченное изменение скорости перемещения приливной волны объясняется уменьшением глубины русла и увеличением его шеро-

ховатости. В настоящее время скорость распространения приливов вдоль эстуария, возможно, несколько увеличилась.

Приведенные выше данные о распространении приливов вверх по эстуарию подтверждаются результатами более нового и детального анализа этого процесса (табл. 2). Согласно данным табл. 2 и исследованиям [4], на входе в эстуарий (г/п Ширнесс и Саутенд) приливы имеют близкие характеристики. По [4], на г/п Саутенд отметки ПВ на несколько сантиметров выше, а отметки МВ на несколько сантиметров ниже, чем на г/п Ширнесс. Сдвиг по фазе между колебаниями приливного уровня на этих постах составляет ~5 мин. Далее вдоль эстуария быстро увеличиваются отметки ПВ и МВ, причем первые больше, чем вторые. В результате величины прилива $\Delta H_{\text{пр}}$ с расстоянием от моря увеличиваются, по крайней мере, до Лондонского моста.

Интересный график линейной связи отметок максимальных уровней во время приливов или штормовых нагонов на г/п Саутенд ($H_{\text{max,С}}$) и Причал Тауэр ($H_{\text{max,П.Т}}$) приведен в [7]. Авторами настоящей статьи рассчитано уравнение этой связи: $H_{\text{max,П.Т}} = 1.2(H_{\text{max,С}}) + 0.5$, которое означает, что на участке Саутенд – Причал Тауэр (длиной ~68 км) отметки максимальных уровней возрастают на 20%.

Многолетние изменения характеристик приливов. Данные табл. 2, 3, 4 позволяют убедиться в том, что характеристики приливов в эстуарии Темзы испытали существенные многолетние изменения.

Такие изменения выявлены на всех постах в пределах эстуария Темзы, причем, чем дальше расположен пост от моря, тем больше становится интенсивность роста отметок ПВ. Наиболее наглядно это видно из табл. 4. Отметки МВ в верхней части эстуария, наоборот, понизились. В итоге, величина прилива $\Delta H_{\text{пр}}$ заметно возросла, особенно в сизигию. На г/п Причал Тауэр величина $\Delta H_{\text{пр}}$, например, возросла в сизигию с интенсивностью 7.3 мм/год (в квадратуру – 6.3 мм/год).

Как отмечено в [7], в течение XX в. возросла и скорость движения приливных волн вдоль эстуария.

Объяснить эти существенные изменения характеристик приливов только их возрастанием в устье эстуария, т.е. причинами за его пределами, нельзя. По [4, 7, 12], главная роль в увеличении параметров приливов в эстуарии Темзы принадлежит гидротехническим (дноуглубительным, выправительным, берегозащитным) работам в самом эстуарии. Крупные защитные мероприятия проведены на берегах эстуария после катастрофического наводнения 31 января–1 февраля 1953 г. С 1983 г. в эстуарии Темзы существует Барьер Тем-

Таблица 2. Характеристики приливов на разных постах в эстуарии Темзы в сизигию (С), квадратуру (К) и средние (Ср) по [4]

Пост	Период, годы	Отметки, м ODN						Величина прилива, м		
		ПВ*			МВ*			С	К	Ср
		С	К	Ср	С	К	Ср			
Ширнесс	1833–1843			2.01			–2.16			4.17
	1873–1876	2.48	1.33	1.95	–1.82	–2.53	–2.21	5.01	3.15	4.16
Саутенд	1833–1843									4.29
	1873–1876									4.31
	1956–1974	2.86	1.89	2.42	–1.52	–2.37	–2.00	5.23	3.41	4.42
Лондонские доки	1833–1843			3.09		–	–2.19			5.28
	1873–1876	3.75	2.41	3.13	–1.90	–2.57	–2.31	6.32	4.31	5.44
Лондонский мост	1833–1843									5.36
	1873–1876									5.36
	1956–1974	3.88	2.71	3.36	–1.90	–2.73	–2.41	6.61	4.61	5.77

* Приведены экстремальные отметки ПВ и МВ в сизигию и квадратуру, поэтому их разность не совпадает с соответствующими измеренными величинами приливов.

за, который также воздействует на режим приливов.

Примеры влияния гидротехнических мероприятий на величину и скорость распространения приливных волн приведены в [12]. В 1823–1831 гг. старый Лондонский мост был заменен новым мостом, построенным чуть выше по течению. В период отсутствия моста его “тормозящая” роль в движении приливной волны не проявлялась и амплитуда прилива и расходы приливного и отливного потоков возросли на 20%. В результате крупномасштабных дноуглубительных работ в 1909–1928 гг. для улучшения условий судоходства отметки ПВ заметно возросли, а отметки МВ немного понизились, величины приливов возросли, скорость их распространения увеличилась.

Сооружение защитных дамб отсекает от русла прибрежные пойменные массивы, что также ведет к увеличению отметок ПВ. Кроме того, выправление русла и сооружение дамб уменьшает гидравлические сопротивления, что также облегчает распространение приливов. Строительство мостов через Темзу в районе Лондона и разборка старых мостов также повлияли на режим приливов. Заметим, что описанное влияние гидротехнических мероприятий на режим эстуариев – явление типичное для многих эстуариев мира. Аналогичные изменения подробно изучены, например, в эстуарии Эльбы [2, 26].

Приливные течения

Одновременно с распространением вверх по эстуарию приливной волны изменяются и скоро-

сти течения (причем, как по величине, так и по направлению (рис. 2 и 3а).

Как показывает рис. 2, приливные (обратные, направленные в сторону реки) течения приобретают максимальные значения приблизительно на середине приливного роста уровня. Отливные (прямые, направленные в сторону моря) течения имеют максимальные значения приблизительно на середине отливной фазы. Скорости и тех и других течений достигают 1–2 м/с. Обычно максимальные скорости приливных течений немного больше максимальных скоростей отливных течений, особенно в придонной области потока (рис. 2, 3а).

Момент максимального приливного (обратного) течения наступает через ~3 ч после МВ и за 3–4 ч до ПВ. Момент максимального отливного (прямого) течения наступает через 2.5–3 ч после ПВ.

Моменты смены течений немного запаздывают по отношению к моментам МВ и ПВ. Поворот отливного течения на приливное, т.е. с прямого на обратное, происходит менее чем на 1 ч позже

Таблица 3. Многолетние тренды, мм/год, в изменениях средних отметок ПВ и МВ на постах вдоль эстуария Темзы за 1933–1968 гг. по [7]

Пост	Расстояние от Лондонского моста, км	ПВ	МВ
Саутенд	69.2	3.5	2.5
Тилбери	41.4	3.8	2.8
Норт-Вулидж	17.0	6.3	–0.5
Причал Тауэр	0.8	6.8	0.4
Челси	–4.5	5.9	–0.9

Таблица 4. Интенсивность изменения, мм/год, характеристик приливов на г/п Причал Тауэр за 1933–1968 гг. по [7]

Характеристика приливов	Сизигия	Квадратура
Средняя ПВ	7.6	6.5
Средняя МВ	0.3	0.2
Средняя величина	7.3	6.3

МВ, а поворот приливного течения на отливное, т.е. с обратного на прямое, наступает менее чем на 0.5 ч позже ПВ.

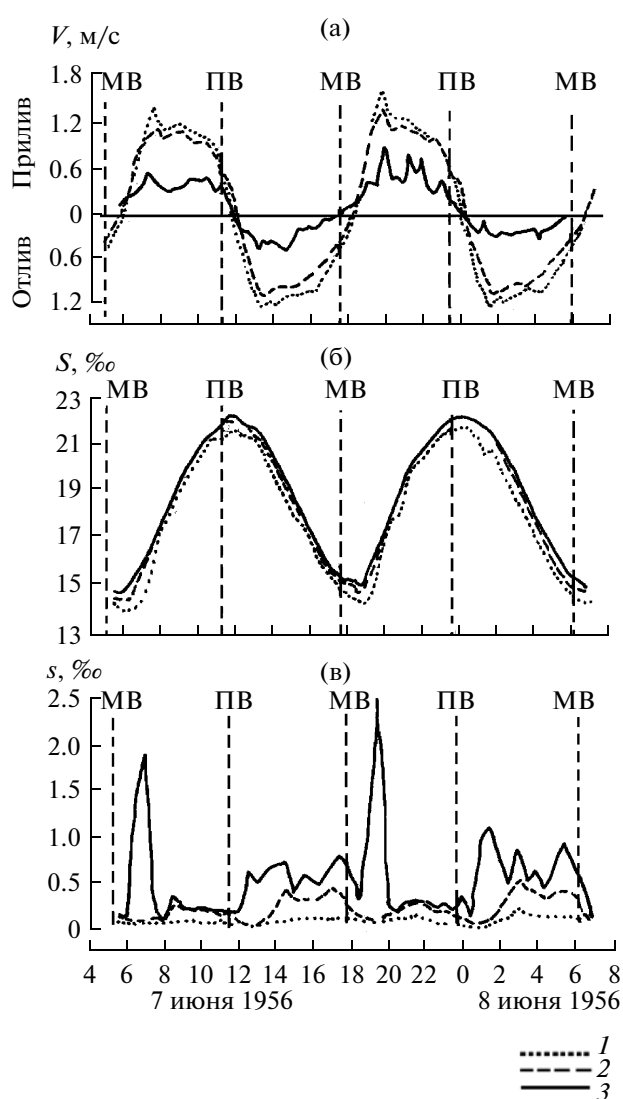


Рис. 3. Изменения скоростей течения V (а), солёности воды S (б) и содержания взвешенных наносов s (в) во время приливных циклов 7–8 июня 1956 г. по [12]. Горизонты: 1 – 1.8 м ниже поверхности, 2 – на середине глубины, 3 – в 0.3 м от дна. ПВ – полная вода, МВ – малая вода.

Последовательность наступления моментов МВ, ПВ, максимальных прямых и обратных течений, а также смены течений с прямого на обратное и наоборот в эстуарии Темзы полностью совпадает с теоретической схемой, полученной в [1] в результате анализа на экстремумы уравнений неустановившегося движения воды для случая обратной волны.

Для приближенного расчета приливных колебаний уровня H и средней скорости V в эстуарии Темзы в [21] предложен ряд формул, основанных на предположениях об экспоненциальном уменьшении амплитуды прилива и скорости течения вдоль эстуария в сторону реки, гармоническом характере колебаний H и V , постоянстве глубины в эстуарии и отсутствии влияния речного стока.

Важная особенность эстуария Темзы – отсутствие здесь характерной для многих устьев рек так называемой эстуарной циркуляции, проявляющейся в том, что результирующие течения (остаточные, осредненные за приливный цикл) в поперечном слое направлены в сторону моря, а в придонном – наоборот, в сторону реки. Отсутствие эстуарной циркуляции в эстуарии Темзы объясняется тем, что в этом эстуарии на динамику вод приливы влияют значительно сильнее, чем сток реки.

Для эстуария Темзы характерны хорошо выраженные реверсивные течения: в приливную фазу вода почти по всему сечению движется в сторону реки, в отливную – к морю (рис. 3а). Смена приливного течения на отливное происходит на всех горизонтах практически одновременно и немного позже ПВ. Поворот течения у дна с отливного на приливное наблюдается немного раньше, чем на других горизонтах и практически одновременно с моментом МВ (рис. 3а).

Процессы вертикального перемешивания

В эстуарии Темзы (в условиях явного преобладания воздействия на его режим приливов над влиянием речного стока) вертикальное перемешивание вод отвечает случаю полного (хорошего) перемешивания и слабой стратификации. Это подтверждается данными наблюдений (рис. 3б): вертикальные градиенты солёности воды S во все фазы приливного цикла очень малы.

Для характеристики степени стратификации и типа вертикального перемешивания вод в эстуариях обычно применяют так называемый параметр стратификации [1, 11] $n = \Delta S / S_{\text{ср}}$, где $\Delta S = S_{\text{дно}} - S_{\text{пов}}$, $S_{\text{ср}} = 0.5(S_{\text{дно}} + S_{\text{пов}})$, $S_{\text{дно}}$ и $S_{\text{пов}}$ – солёность воды соответственно у дна и на поверхности. Условию хорошего (полного) перемешивания и слабой стратификации соответствует соотношение $n < 0.1$.

В эстуарии Темзы максимальные величины S отмечаются в наступающий немного позже ПВ момент смены течений с приливного на отливное. В это время разность S у дна и на поверхности $\leq 1\text{‰}$. При $S_{\text{cp}} \sim 22\text{‰}$ это дает величину параметра стратификации $n < 0.05$. Минимальные величины S отмечаются при смене отливного течения на приливное, т.е. немного позже МВ. В этот момент для примера, приведенного на рис. 3б, $\Delta S \sim 1\text{‰}$, $S_{\text{cp}} \sim 14.5\text{‰}$ и $n \sim 0.07$. Таким образом, и в прилив и в отлив эстуарий Темзы оказываются хорошо перемешанным по глубине ($n < 0.1$).

Процессы интрузии морских вод в эстуарий

В монографии [22] приведены графики У.С. Предди, иллюстрирующие продольное изменение вдоль эстуария Темзы осредненной по вертикали и за приливный цикл концентрации Cl (рис. 4). Эти графики показывают, что ведущий фактор в распределении вдоль эстуария осредненной за приливный цикл концентрации Cl (и, следовательно, солёности воды S) — сток воды реки.

За верхнюю границу зоны проникновения осолоненных вод в эстуарий можно принять содержание Cl , равное 1‰ . При пониженном речном стоке эта граница находится на расстоянии ~ 5 км ниже Лондонского моста (рис. 4). Концентрация Cl увеличивается в сторону моря до $\sim 15\text{‰}$ на расстояние 60 км от Лондонского моста. При повышенном речном стоке верхняя граница зоны осолонения смещается на ~ 20 км в сторону моря и находится в среднем на расстоянии 25 км ниже Лондонского моста (рис. 4).

В приливную фазу и сизигию зона осолонения смещается от ее среднего положения при данной величине стока в сторону реки, а в отливную фазу и квадратуру — в сторону моря. Более подробные данные о проникновении осолоненных вод в эстуарий Темзы в литературе отсутствуют.

Динамика наносов

В течение приливного цикла содержание взвешенных наносов в воде эстуария Темзы (или мутность воды) s изменяется одновременно с изменением скоростей течения V (рис. 3в). На рис. 3в содержание в воде наносов s имеет размерность ‰ , т.е. г/кг. Численное значение s в ‰ близко к величине s в г/л или кг/м³.

Приливные изменения мутности воды у дна и в средней части потока происходят по-разному. Как видно на рис. 3в, в данном месте эстуария содержание s у дна имеет два хорошо выраженных максимума: один ($1.5\text{--}2.0\text{‰}$) — приблизительно в момент смены течений с отливного на приливное после МВ и другой ($1.0\text{--}1.5\text{‰}$) — приблизительно в момент смены течений с приливного на отлив-

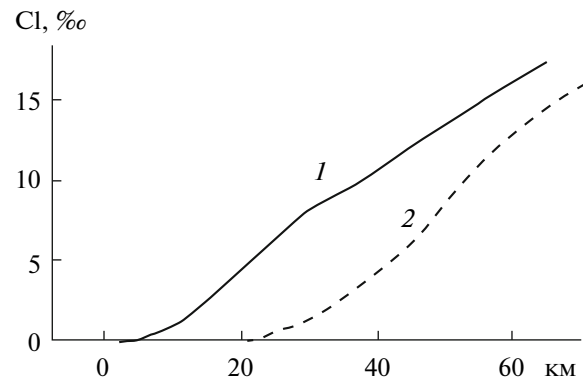


Рис. 4. Распределение вдоль эстуария Темзы осредненной по глубине и за приливный цикл концентрации Cl до паводка (1) и во время его (2) по данным У.С. Предди (ссылка в [22]). Расстояния — от Лондонского моста.

ное после ПВ. В эти периоды у дна в условиях остановки течений накапливаются ранее двигавшиеся в потоке наносы. Большая концентрация наносов после МВ свидетельствует о том, что в отложении наносов основная роль принадлежит взвесям речного происхождения.

Наибольшая средняя по сечению мутность воды наблюдается во время приливного цикла также дважды, но уже не в моменты остановки течений, а, наоборот, во время максимальных приливных и отливных течений (рис. 3в). При этом взмучивание наносов, ранее отложившихся в приливную фазу, происходит более интенсивно в период отливных течений. Поэтому средние по глубине величины s при отливных течениях больше, чем при приливных (рис. 3в).

Наносы, поступающие в эстуарий Темзы, имеют не только речное и морское происхождение, но также попадают в него вместе с промышленными и коммунальными сточными водами и в результате дноуглубительных работ.

Согласно приближенным оценкам баланса наносов в эстуарии Темзы за 1970–1990 гг. [25], ежегодно в эстуарий извне поступало 170 тыс. т наносов реки и впадающих в эстуарий водотоков, 58 тыс. т наносов — с промышленными и коммунальными сточными водами, 108 тыс. т морских наносов — с приливными течениями (возможно, это количество включало “возврат” продуктов размыва отвалов ранее дрегированного грунта, находящихся на устьевом взморье). Приходная часть баланса наносов в эстуарии, таким образом, составляла 336 тыс. т/год. Расходная часть баланса наносов включала среднюю величину ежегодного землечерпания в пределах эстуария (95 тыс. т) и величину ежегодной аккумуляции наносов в эстуарии (120 тыс. т). Результирующая составляющая баланса наносов ($336 - 215 = 121$ тыс. т/год), по-видимому, дает вынос наносов из эстуария в море.

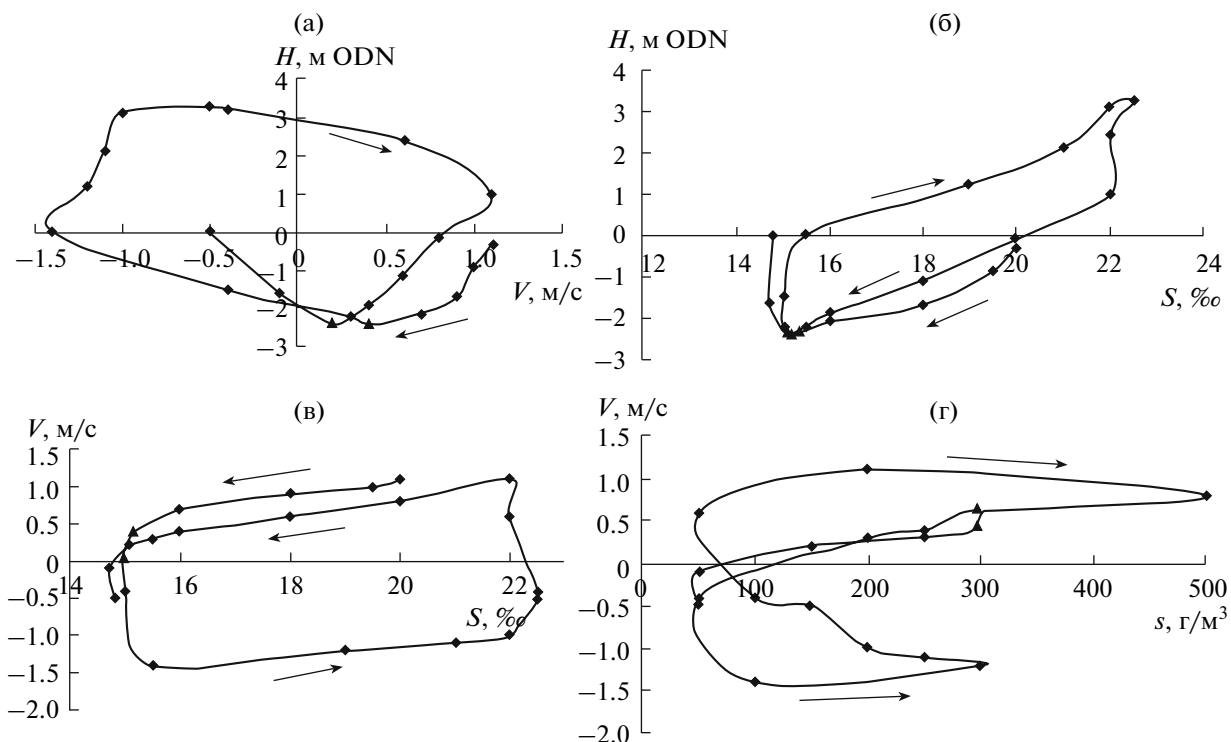


Рис. 5. Графики типичных зависимостей между гидрологическими характеристиками в эстуарии Темзы: уровнем воды H и V (а), H и S (б), V и S в (в), V и s (г).

Устьевую область Темзы подразделяют на три зоны седиментации [20, 24]. Первая зона (практически совпадающая с устьевым участком реки) находится между Тиддингтоном и Тауэрским мостом в Лондоне, здесь река несет главным образом наносы, сформировавшиеся в ее бассейне, сток взвешенных наносов мал, отложение наносов на дне и берегах слабое.

Вторая зона находится в пределах эстуария от Вулиджа до Грейвзенда и называется “илистым участком”, или Мад-Рич. “Ил” на 10–80% состоит из глины. В настоящее время сюда поступают наносы с верхних участков Темзы и ее притоков (рек Ли и Родинг) [24]. В пределах этого участка находится зона максимальной мутности (ММ), характерная для многих макроприливных эстуариев. Главная причина возникновения зоны ММ в эстуарии Темзы – отложение взвесей в периоды смены течений и их взмучивание сильными приливными и отливными течениями. Концентрация взвешенных наносов в зоне ММ значительно больше, чем в реке и море. Положение зоны ММ зависит от фазы прилива и колебаний стока воды реки [20]. Донные отложения здесь состоят из глины и тонкого песка со средним размером частиц 0.035 мм.

Третья зона находится ниже по течению от Мад-Рич до Си-Рич. Здесь отлагаются в основном влекомые наносы морского происхождения [24].

Приливный гистерезис в эстуарии Темзы

Рассмотренные выше особенности изменения гидрологических характеристик в эстуарии Темзы во время приливного цикла, в том числе сдвиг фаз и несовпадение во времени экстремальных величин уровня воды, скорости течения, солёности и мутности воды, типичны для приливных устьев рек [1].

Для графических связей между гидрологическими характеристиками в приливных устьях рек (и для эстуария Темзы) типичен гистерезис, т.е. неоднозначный (петлеобразный) вид. На рис. 5 в качестве примера приведены такие зависимости, построенные по ежечасным данным, снятым с рис. 3. При этом использованы данные о скорости течения, солёности и мутности воды на середине глубины русла.

Наиболее широкие петли имеют связи скорости течения с уровнем воды (рис. 5а) и солёности воды – со скоростью течения (рис. 5в). Своеобразна связь мутности воды со скоростью течения (рис. 5г), которая имеет две петли – более вытянутую при отливных и менее вытянутую при приливных течениях.

ДИНАМИКА ВОД В ЭСТУАРИИ ТЕМЗЫ
ПРИ ШТОРМОВЫХ НАГОНАХ*Распространение штормовых нагонов
вдоль эстуария*

Приливные и нагонные волны возникают в океане под влиянием соответственно приливообразующей силы и синоптических процессов (изменяющихся горизонтальных градиентов атмосферного давления и скоростей ветра). Проникая в ограниченные морские акватории и, тем более, в узкие заливы и эстуарии рек, эти волны «теряют» связь с вынуждающими их силами и превращаются в свободные инерционные волны, движущиеся вдоль русел.

По этой причине закономерности перемещения волн приливов и штормовых нагонов вдоль извилистого эстуария и устьевого участка Темзы имеют много общего; более того, волны нагонов особым образом «складываются» с приливными волнами. Волны штормовых нагонов движутся вверх по эстуарию Темзы приблизительно с той же скоростью, что и приливные. При движении нагонной волны вдоль эстуария максимальная высота волны, так же как и величина прилива, возрастает, что объясняется сужением эстуария в сторону реки.

Пример распространения нагонной волны вдоль эстуария и устьевого участка Темзы представлен на рис. 6, где показаны графики изменения уровня воды во время экстремального нагона 31 января–1 февраля 1953 г. в разных пунктах, рассчитанные путем математического моделирования на основе одномерных уравнений неустановившегося движения воды [23]. Результаты моделирования для постов, где велись наблюдения (г/п Саутенд, Лондонский мост), показали хорошее совпадение данных измерений и моделирования, что дало основание применить методы моделирования и для других пунктов. Рис. 6 показывает, что пик нагона, наступивший ранним утром 1 февраля, преодолел участок Саутенд – Лондонский мост за ~1.7 ч, двигаясь со скоростью 41.2 км/ч, т.е. почти так же, как приливы.

По мере движения волны нагона вдоль эстуария отметка максимального уровня возрастала с 4.5–4.6 м в устье эстуария до 5.4 м ODN на г/п Лондонский мост, т.е. на 0.8–0.9 м (табл. 5, 6).

На рис. 6 приведены также результаты модельных расчетов изменения характера нагона 1953 г. в случае, если бы в то время уже существовал Барьер Темза и он был закрыт в 22 ч 57.5 мин 31 января, или, что то же самое, если бы в нынешних условиях (при построенном Барьере) случился нагон аналогичный нагону 1953 г. и Барьер был бы закрыт в тот же момент. Результаты оказались очень интересными и показали следующее:

Таблица 5. Сведения об отметках уровня моря во время экстремальных штормовых нагонов в устье Темзы

Дата	Уровень моря, м ODN	
	г/п Лондонский мост	г/п Ширнесс
1791 г.	4.27 [5, 29]	–
Январь 1881 г.	4.91 [5, 29]	–
Январь 1928 г.	5.21 [5, 29]	–
Март 1949 г.	–	4.25 [27]
31 января–1 февраля 1953 г.	5.41 [5, 29]	4.60 [29], 4.67 [1953], 4.70 [27]
12 января 1978 г.	5.10 [29]	4.26 [27]
31 декабря 1978 г.	5.22 [29]	4.12 [27]

Таблица 6. Отметки максимальных уровней воды при штормовых нагонах по [29]

Расстояние ниже Лондонского моста, км	Отметки, м ODN	
	нагон в 1953 г.	нагон с обеспеченностью 0.1%
0	5.4	7.2
10	5.3	7.0
15	5.2	6.9
20	5.1	6.8
30	5.0	6.6
40	4.9	6.4
50	4.8	6.1
60	4.7	5.8
70	4.6	5.6

ниже по течению от Барьера уровни во время нагона изменились мало по сравнению с фактически наблюдавшимися или рассчитанными для условий, когда Барьер отсутствует. Отмечены лишь незначительное повышение максимальных уровней в ближних к Барьеру пунктах и более ранний подъем уровня во время нагона; эффект отражения волны от Барьера оказался несущественным [23];

выше закрытого Барьера нагонные колебания уровня, естественно, не распространились, но отмечен медленный рост уровня, вызванный накоплением выше Барьера речных вод.

Процессы взаимодействия прилива и штормового нагона нагляднее всего иллюстрирует рис. 7, где представлены реальные изменения уровня во время нагона 31 января–1 февраля 1953 г. на г/п Тауэрский мост и уровни предвычисленного прилива по [29]. Кроме того, авторами настоящей статьи вычислены относительные величины нагонных уровней, т.е. текущих величин $\Delta H_{нт}$, как

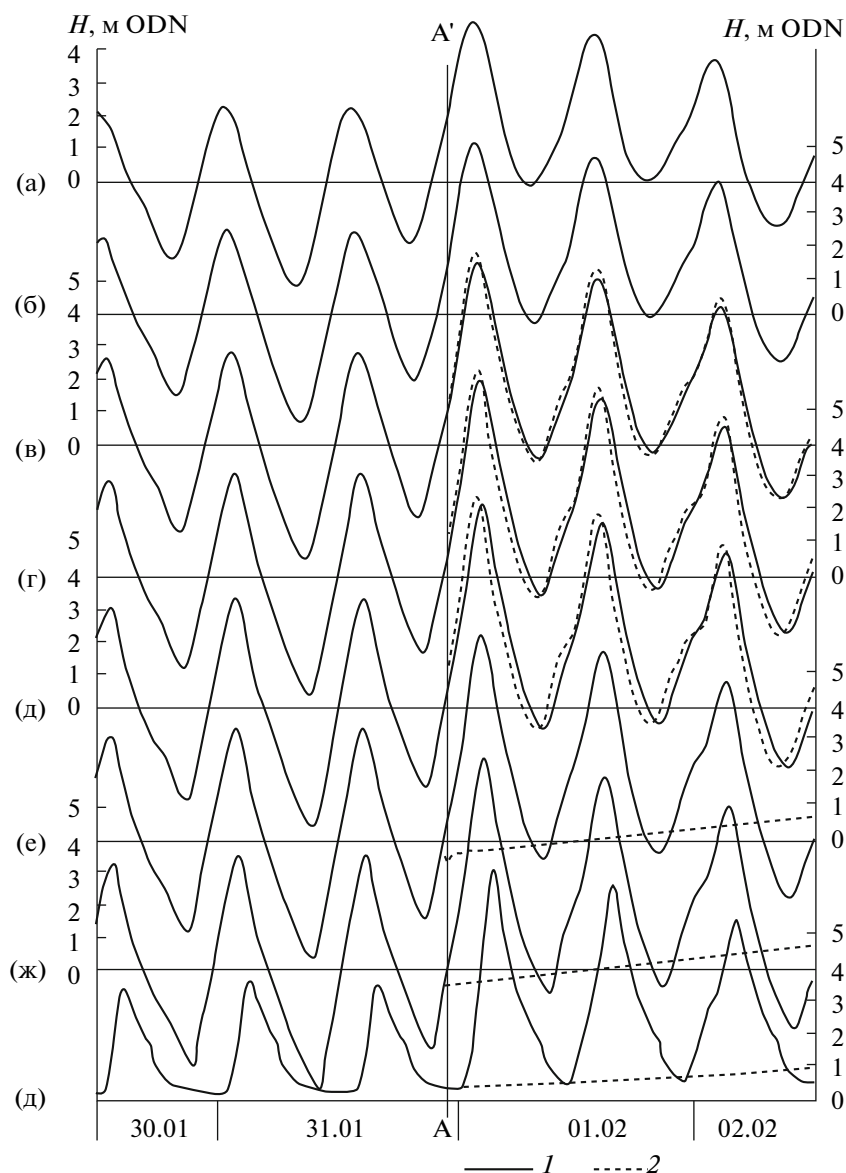


Рис. 6. Рассчитанные с помощью моделирования изменения уровня воды во время штормового нагона 31 января–1 февраля 1953 г. (1) и аналогичного нагона при закрытом Барьере Темза (2) [23]. Пункты в эстуарии Темзы: а – Саутенд, б – Коритон, в – Тилбери, г – Дженнингтри-Пойнт, д – 0.8 км ниже Барьера, е – 0.8 км выше Барьера, ж – Лондонский мост, з – Ричмонд. А – А' – линия, соответствующая моменту гипотетического закрытия Барьера в 22 ч 57.3 мин 31 января 1953 г. и перемещения его влияния вниз и вверх по течению.

разницы наблюдаемых и предвычисленных приливных уровней. Анализ рис. 7 показывает следующее:

отметки максимального уровня H во время нагона, ПВ прилива и максимальной величины нагонной составляющей $\Delta H_{\text{нг, max}}$ во времени не совпадают; момент $\Delta H_{\text{нг, max}}$ отмечается на подъеме приливного уровня и опережает H_{max} и ПВ соответственно на ~ 0.6 и 1.7 ч;

отметки H_{max} и ПВ равны в данном случае ~ 5.3 и 3.4 м ODN соответственно; разница между H_{max} и ПВ составила 1.9 м;

текущая величина $\Delta H_{\text{нг}}$ изменялась во время нагона в пределах от 2.9 (точка А на рис. 7, когда отмечался $\Delta H_{\text{нг, max}}$) до 1.6 – 2.0 м до и после максимума нагона.

Многолетние изменения характеристик штормовых нагонов

Как было отмечено выше, в связи с повышением среднего у.м. некоторые параметры приливов на входе в эстуарий (г/п Саутенд) увеличились. В пределах эстуария вследствие крупномас-

штабных гидротехнических работ отметки ПВ и величины приливов $\Delta H_{\text{пр}}$ еще больше возросли.

Данные наблюдений показывают, что характеристики штормовых нагонов в эстуарии Темзы возросли еще больше, чем характеристики приливов. Рис. 8 показывает, что с 1791 по 1953 г. максимальные отметки уровня на г/п Лондонский мост во время штормовых нагонов неуклонно повышались, причем почти линейно. За указанный период отметки H_{max} во время нагонов возросли приблизительно с 4.2 до 5.4 м ODN, т.е. на ~1.2 м [5]. Интенсивность роста максимального уровня составила 7.4 мм/год, что почти совпадает со скоростью увеличения отметок ПВ при приливах (табл. 2–4). Несколько иные данные приведены в [7]. За 1830–1953 гг. максимальные отметки при нагонах на г/п Причал Тауэр увеличились с 4.4 до 5.4 м, т.е. на 1.0 м (интенсивность равна 8.1 мм/год), что больше, чем рост ПВ за это же время.

Проблемам существенного увеличения подъемов уровня во время штормовых нагонов и возрастающей опасности наводнений в районе Лондона в научной литературе, посвященной устью Темзы, уделяется большое внимание [6–9, 24, 29–31]. Объяснение фактов заметного роста H_{max} при нагонах сводится к двум обстоятельствам. Отмечаются, во-первых, рост и частоты и величины нагонов в прибрежной зоне Северного моря и, во-вторых, изменения условий проникновения нагонных волн в сам эстуарий Темзы из-за проведенных здесь гидротехнических работ.

Увеличение высоты нагонов в прибрежной зоне моря объясняют, в свою очередь, ростом среднего у.м. и изменением процессов в атмосфере. Повышение среднего у.м. с интенсивностью 2–3 мм/год могло увеличить характеристики нагонов, но не намного. Более сильное воздействие на морские нагоны вблизи устья Темзы, безусловно, оказала активизация в XX в. циклонической деятельности. Особенно усилились циклоны во второй половине XX в., и, как следствие, увеличились частота и высота нагонов во всем Северном море. Например, в Гельголандской бух. и эстуарии Эльбы нагоны особенно усилились после 1962 г. (обзор исследования этого вопроса дан в [2, 26]). Устье Темзы находится в похожих условиях. После катастрофического нагона в 1953 г. отмечены значительные нагоны и в другие годы. После 1983 г. построенный к этому времени Барьер Темза много раз защищал Лондон от нагонных наводнений.

Другая причина увеличения нагонных подъемов уровня в эстуарии и на устьевом участке Темзы – та же, что и увеличения характеристик приливов, т.е. углубление русла, обвалование берегов и другие гидротехнические мероприятия. Аналогичные процессы отмечены и в эстуарии Эльбы [2, 26]. Углубление русла и обвалование

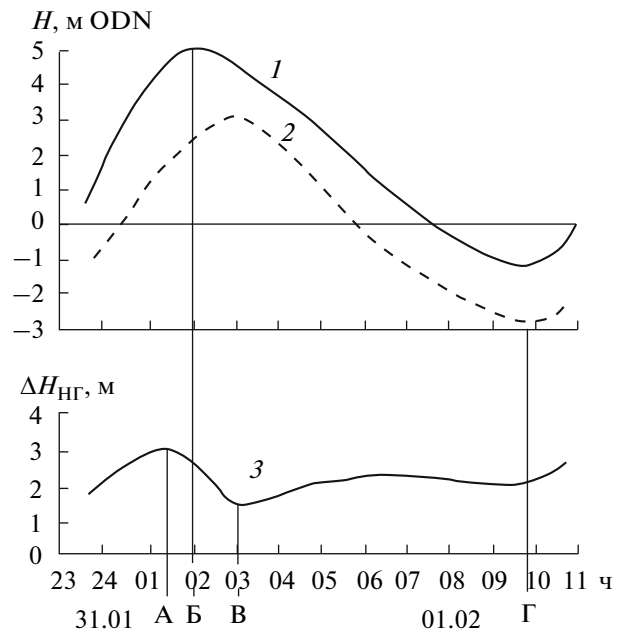


Рис. 7. Изменения уровня воды на г/п Тауэрский мост во время штормового нагона 31 января – 1 февраля 1953 г. по [29]: 1 – измеренный уровень, 2 – предвычисленный приливный уровень, 3 – текущая величина нагона. Моменты: максимальной относительной величины нагона (А), максимального уровня, ПВ (В), МВ (Г).

прибрежной поймы увеличивают как скорость перемещения волн нагонов, так и максимальные уровни.

НАВОДНЕНИЯ В ЭСТУАРИИ ТЕМЗЫ, ВЫЗВАННЫЕ ШТОРМОВЫМИ НАГОНАМИ, И МЕРЫ ПО БОРЬБЕ С НИМИ

Исторические сведения о штормовых нагонах в эстуарии Темзы и вызванных ими наводнениях

Самое раннее письменное упоминание о наводнении в эстуарии Темзы, вызванном штормовым нагоном, обнаружено в англосаксонских хрониках 1099 г. [16]. В них отмечалось, что невиданное до тех пор наводнение пришлось на День Св. Мартина и совпало с первым днем новолуния (т.е. с сизигийным приливом). С тех пор в исторических документах было зафиксировано множество нагонных наводнений. Английский историк Джон Стоу в хрониках Англии “Сервей оф Лондон” писал: “В 1236 г. Темза, выйдя из берегов, затопила все болота около Вулиджа, потоком были унесены лодки и другие корабли, не говоря о скоте, утонуло много жителей, а до Вестминстерского дворца люди добирались на гребных лодках” [16].

В XVII–XIX вв. произошло, по крайней мере, восемь катастрофических наводнений, вызванных штормовыми нагонами: в 1663, 1791, 1834,

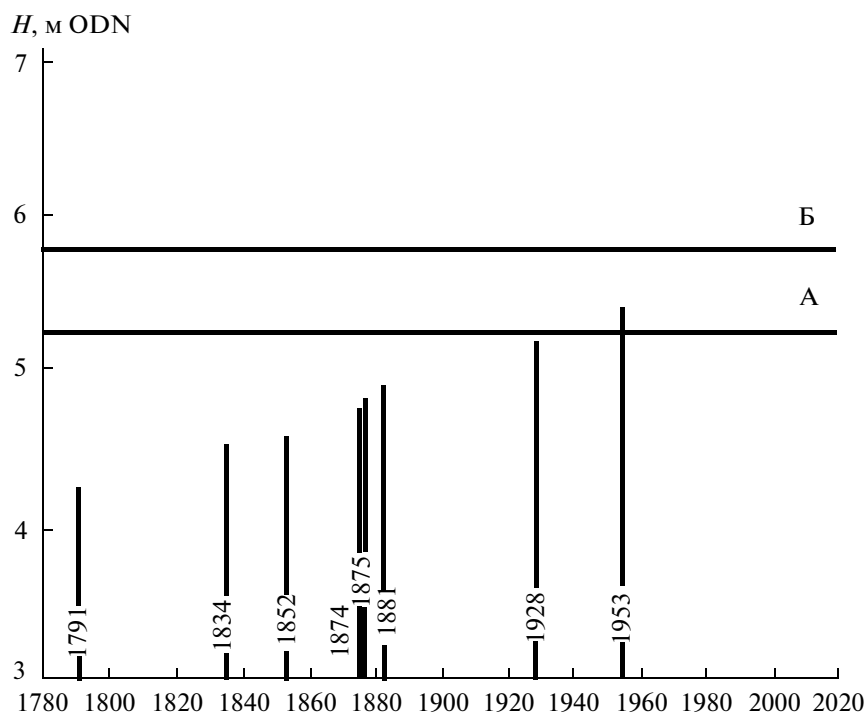


Рис. 8. Отметки уровня при максимальных штормовых нагонах на г/п Лондонский мост за 1780–1953 гг. по [5]. Отметки защитных дамб: А – проекта 1930–1935 гг. (5.28 м ODN), Б – проекта 1972 г. (5.80 м ODN).

1874, 1852, 1875, 1881, 1897 гг. [5, 29]. Сэмюэл Пипс, английский чиновник морского ведомства, автор знаменитого дневника о повседневной жизни лондонцев периода Стюартовской Реставрации, записал 7 декабря 1663 г.: “Я слышал, что прошлой ночью на реке был самый большой прилив, когда-либо виденный в Англии: был затоплен весь дворец Уайт-Холл” [16]. В 1874 г. уровень на Темзе поднялся на 1.3 м, были затоплены Ламбет, Бэнксайд и Ротерхит на южном берегу Темзы, а также Вулидж [15].

18 января 1881 г. во время сильнейшего шторма и экстраординарного прилива (табл. 5) были смыты ~5000 м защитных дамб на южном берегу о. Канви [28]. Во время катастрофического нагона в 1897 г. было разрушено более 800 м северных защитных дамб на о. Канви [15].

В XX в. во время наводнения в январе 1928 г. (табл. 5) погибло 14 чел. [29]. При нагоне 7–8 апреля 1943 г. на подъеме прилива нагон привел к повышению уровня у Тауэрского моста до 5.18 м [29]. Штормовой нагон в начале марта 1949 г. (табл. 5) распространился вверх по течению Темзы на 24 км, затопил части населенных пунктов Чатем, Рочестер, Струд, Апнор, Грейвзэнд, Ширнесс, Ситтингборн, Фавершем, Херн-Бей, Уитстабл, Дувр и Маргит. Наибольший ущерб был нанесен г. Маргит и побережью графства Кент [13].

Однако самым разрушительным остается нагонное наводнение в 1953 г., получившее назва-

ние Большое наводнение (Big Flood) [6]. Такой силы нагона не было в предшествующие, по крайней мере, 250 лет [31]. Этот экстремальный штормовой нагон (юго-восточного типа [3]) и вызванное им наводнение заслуживают подробного описания.

31 января 1953 г. сильнейший в XX в. шторм в Северном море вызвал самый высокий штормовой нагон, когда-либо зарегистрированный на восточном побережье Англии. Шторм начал развиваться около полудня в четверг 29 января в области низкого давления, расположенной на юго-западе Исландии, с давлением в центре 1003 гПа. В последующие 30 ч циклон продолжал двигаться на северо-восток и в пятницу 30 января в 18 ч 00 мин находился на северо-западе Шотландии [19].

Вместо того чтобы двигаться дальше, циклон стал перемещаться вокруг области высокого давления, расположенной на западе Ирландии, и повернул на юго-восток. Утром 31 января циклон находился над Северным морем, давление упало до ~966 гПа [19]. Разница в давлении между циклоном и антициклоном вызвала очень сильные юго-западные ветры; на холме Коста-Хилл (на высоте 15 м) на о. Оркни были зафиксированы рекордные порывы ветра со скоростью до 56 м/с [19]. Ураган нанес серьезный ущерб хозяйству и уничтожил леса на севере Шотландии, повалив больше деревьев, чем при ежегодной лесозаготовке. Во второй половине дня в субботу 31 января

ураган продолжал двигаться над Северным морем на юг, а над восточной частью Северной Атлантики продолжала формироваться область высокого давления. Вторжение антициклона увеличило градиент давления над Северным морем, “сжимающая” циклон. Сильные ветры стали “выдавлять” воду из Атлантики в Северное море в южном направлении и создали сильный нагон. Вода стала нагоняться в узкий пролив между побережьями Англии и Нидерландов, а рано утром 1 февраля циклон повернул к побережью Нидерландов и обрушился на голландское побережье с еще большей силой, чем на английское [19].

Ураган пересек Северное море через два дня после полнолуния, т.е. практически совпав с сизигийным приливом. Заметим, что подобное сочетание сизигийного прилива и штормового нагона произошло также в январе 1978 г., когда было затоплено побережье Англии от устья р. Хамбер до Кента [19].

В пятницу 30 января, как только стало ясно, что предвидится сильный шторм, Метеослужба Великобритании разослала первые штормовые предупреждения. В ночь на субботу 31 января были прорваны противонагонные защитные сооружения вдоль всего восточного побережья Англии. В субботу 31 января утром, во время шторма в Северном прол. Ирландского моря затонул паром “Принцесса Виктория”, который шел от г. Странрар в Шотландии в г. Ларн в Ирландии; погибло 133 чел. [19].

Зона бедствия в Англии охватила побережье от м. Сперн-Хэд в устье р. Хамбер на севере до побережья Кента на юге. Подъем уровня моря начался у м. Сперн-Хэд около 16 ч 00 мин 31 января, когда уже стемнело [6]. Отметка уровня воды на побережье Норфолка в 18 ч 00 мин составила 2.5 м ODN, а в течение следующего получаса уровень моря повысился еще на 1 м. Вода затопила побережье шириной до 8 км вокруг г. Клей в Норфолке [19]. Максимальной высоты уровень достиг в г. Кингс-Линн в устье р. Грейт-Уз в 19 ч 20 мин, за 45 мин до ПВ прилива [6]. Центр города был затоплен на 1.8 м.

По данным формальных расчетов [29], повторяемость нагона 1953 г. составляет ~1 раз в 200 лет. Для многих участков побережья уровень во время штормового нагона 1953 г. до сих пор остается самой высокой зарегистрированной отметкой уровня воды в Северном море. По данным [19], уровень моря вдоль восточного побережья Англии составил, м ODN, 4.51 – в г. Иммингем в эстуарии р. Хамбер, 5.76 – в г. Кингс-Линн, 3.28 – в г. Грейт-Ярмут, 4.61 – в г. Лоустофт, 4.15 – в г. Клактон-он-Си, 4.5 – в г. Бернем-он-Крауч.

В устье эстуария Темзы уровень моря на г/п Ширнесс в ночь на 1 февраля 1953 г. достиг 4.6–4.7 м ODN (табл. 5, 6), превысив на 0.4–0.5 м максимальный уровень 1949 г. (4.25 м ODN) [27,

29]. Для сравнения можно привести отметки уровня в эстуарии Темзы на г/п Ширнесс во время нагонов 11 и 12 января 1978 г. (4.26 м ODN) и 31 декабря 1978 г. (4.12 м ODN) [27]. Наиболее сильно пострадал низменный о. Канви в устье Темзы, когда 1 февраля в 1 ч 00 мин ночи на него обрушились сильнейший шторм и ветер с мокрым снегом. Остров был полностью затоплен. Жители острова не были заранее предупреждены, в стихии погибло 58 чел. В Лондоне у Лондонского моста уровень поднялся до отметки 5.41 м ODN [19]. В городе были прорваны берегозащитные сооружения вдоль южного берега, вдоль левого – наводнение достигло набережных Сити и Вестминстера [19].

Штормовой нагон вызвал катастрофические последствия: пострадали 1600 км восточного побережья Англии, берегозащитные сооружения и волноломы были разрушены почти в 2000 местах [31], затоплено 647 км² земель, 307 чел. погибло, более 32 тыс. чел. эвакуировано, повреждено 24 тыс. зданий, из которых 500 полностью разрушены, повреждено около 200 промышленных объектов, около 200 км дорог, 400 км железнодорожных путей, более 60 га сельскохозяйственных земель, погибло 40 тыс. голов скота [19, 31]. Подобных разрушений Англия не видела со времен Второй мировой войны. Материальный ущерб составил 40–50 млн фунтов стерлингов, что эквивалентно 1 млрд фунтов стерлингов в ценах 2003 г. Кроме того, пострадали побережья Нидерландов (затоплено ~1335 км² земель, число погибших достигло 1783 чел. [19]), а в Западной Фландрии (Бельгия) погибло 28 чел. [14].

Меры по защите от нагонов и наводнений

Еще в 1790 г. появился план построить плотину и шлюзы у Лондонского моста, поскольку старый Лондонский мост по сути уже был барражем из-за низких и узких пролетов, которые сильно ограничивали течение воды. В 1828 г. у г. Ричмонд на устьевом участке Темзы был построен Ричмондский противонагонный барьер, состоящий из трех подвижных падающих ворот шириной 20.1 м каждое и судоходного шлюза [8]. В 1879 г. государством был принят Акт по наводнениям на Темзе, предписывающий прибрежным землевладельцам увеличивать высоту противонагонных стенок и дамб вдоль фасадов их домов. После катастрофического наводнения 1881 г., нанесшего колоссальный ущерб о. Канви, Парламентом Великобритании был принят специальный закон по защите о. Канви [28]: на Темзе были построены новые защитные дамбы [30]. После наводнения 1928 г. дамбы были подняты до высоты 5.5 м ODN.

Катастрофическое нагонное наводнение в 1953 г. показало недостаточность ранее прини-

мавшихся защитных мер. Учитывая вероятность еще большей катастрофы, связанной с риском затопления жилых районов столицы и лондонского метро, повреждения электрических сетей, телекоммуникаций и т.п., Парламент Великобритании в 1972 г. принял Закон о сооружении Барьера Темза для защиты от наводнений [28]. Идея перекрытия Темзы вместе с обвалованием берегов ниже по течению возникла еще в 1966 г. вместо возможного наращивания защитных дамб вдоль Темзы в пределах Центрального и Западного Лондона.

Значительное повышение дамб могло бы в корне изменить внешний вид города и, кроме того, оно было менее выгодно экономически. Решению о сооружении Барьера Темза предшествовали обширные исследования. При выборе места строительства и типа защитного сооружения пришлось решить многие технические и навигационные вопросы. Были рассмотрены три типа сооружения и 12 возможных мест его размещения. С учетом интересов судоходства, возможного загрязнения воды и отложения наносов, а также стоимости работ и других соображений для строительства было выбрано место в 14.8 км ниже Лондонского моста в районе Вулиджа между Сильвертауном на северном берегу и Чарльстоном на южном [30]. Строительство Барьера началось в 1974 г., продолжалось 8 лет и завершилось в октябре 1982 г. Впервые он был закрыт для защиты Лондона от наводнения 1 февраля 1983 г. (что случайно совпало с 30-летней годовщиной наводнения 1953 г.) [20], а официальное открытие Барьера состоялось 8 мая 1984 г. в присутствии Королевы Елизаветы II. Стоимость проекта составила более 535 млн фунтов стерлингов (~1.4 млрд фунтов стерлингов в ценах 2007 г.) [16].

Барьер представляет собой девять бетонных устоев [30]. Между устоями находятся четыре больших пролета шириной по 61.0 м (два — для судоходства вниз по течению, два — вверх) и два меньших — шириной по 31.5 м для малых судов. Пролеты перекрываются воротами с поднимающимися сегментами. Обычное положение этих сегментов — горизонтальное на донном бетонном пороге. Во время нагона сегменты поворачиваются и перекрывают пролеты. Масса ворот в больших пролетах — по 3300, в малых — по 900 т. Кроме того, с северной стороны Барьера сооружено еще три пролета на двух устоях, с южной — один небольшой пролет. Пролеты у северного и южного берегов шириной по 31.0 м снабжены падающими воротами радиального типа [30]. Ширина Барьера между береговыми устоями составляет 520 м [18], высота больших ворот — 20 м [30]. Глубина Темзы у Барьера в среднем составляет 7 м при МВ и 15 м при ПВ прилива [16]. Решение о закрытии ворот принимается дежурным диспетчером на основе данных Метеобюро и компью-

терной модели Барьера и эстуария. Ворота закрываются за 4–5 ч до ПВ.

По данным [16], с 1983 г. по 16 апреля 2010 г. Барьер закрывали 412 раз, из которых 119 — для защиты Лондона от наводнений (76 раз — для защиты от штормовых нагонов и 43 раза — для предотвращения стоковых наводнений), один раз (в августе 1989 г.) — для спасательных работ при крушении прогулочного судна “Маркиза” и один раз (в октябре 1997 г.) — для ремонтных работ после того, как землечерпатель “Сэнд Кайт” в тумане натолкнулся на устой Барьера [16]. В остальных случаях закрытие Барьера было связано с регулярными ежемесячными профилактическими работами [18].

Во время крупного наводнения в январе 2003 г. Барьер с 1 по 8 января закрывали в течение 14 последовательных приливных циклов [16].

Помимо Барьера, ниже по течению на притоках к эстуарию и заливах были построены восемь других государственных противонагонных барьеров (рис. 1), управляемых Агентством окружающей среды, в частности барьеры Баркинг, Дартфорд, Фоббинг-Хорс, Истхевен и Бенфлит, а также 36 основных шлюзовых ворот, 400 меньших подвижных конструкций, находящихся в частной собственности, и 337 км противонагонных дамб и насыпей. Отметки защитных дамб ниже Барьера Темза рассчитаны на повторяемость экстремальных штормовых нагонов 1 раз в 1000 лет (табл. 6). Эти дамбы в районе Лондона приобрели отметку гребня ≥ 5.8 м ODN [5, 29]. Отметки гребней защитных дамб по проекту 1930–1935 гг. (рис. 8) были всего 5.28 м ODN, т.е. ниже, чем отметки максимальных уровней в районе Лондона во время нагона в 1953 г. [5].

Все эти сооружения защищают 1.25 млн чел., живущих в пределах приливной поймы и находящихся в зоне риска наводнений, связанных с приливами и нагонами [20].

В настоящее время Лондон продолжает расширяться, особенно в восточном направлении [20]. После строительства Барьера когда-то заброшенные территории доков были застроены домами и предприятиями. Это, в частности, новый финансовый и деловой район Канарские верфи (Кэнэри-Уорф), построенный на месте Вест-Индских доков на Собачьем острове. В течение будущих 15–30 лет планируется дальнейшее развитие приливных территорий вдоль Лондона, Кента и Эссекса [9].

На оставшейся естественной приливной пойме планируется обширное строительство. Продолжают увеличиваться и средние приливные уровни в эстуарии Темзы; прогнозируется их дальнейший рост, а также дальнейшее тектоническое опускание юго-восточной части Англии.

Как уже отмечено, Барьер и связанная с ним защитная система рассчитаны на повторяемость нагонов 1 раз в 1000 лет (расчет до 2030 г.). В настоящее время стала разрабатываться стратегия предотвращения наводнений до 2100 г. Предполагается увеличить высоту защитных дамб на ~1 м (стоимость этих мероприятий достигнет ~4 млрд фунтов стерлингов) [9].

Агентством окружающей среды Великобритании разработан проект “Эстуарий Темзы 2100” (TE2100) [17], определяющий дальнейшие меры по защите Лондона и эстуария Темзы от нагонных наводнений. По проекту TE2100 площадь защиты включает эстуарий и устьевой участок Темзы, прилегающие к эстуарию поймы, притоки к эстуарию, подверженные воздействию приливов и нагонов. На этом пространстве находятся более 500 тыс. жилых домов, 40 тыс. нежилых объектов, включающих важные государственные и финансовые учреждения. Проектом TE2100 предусматриваются следующие меры: модернизация существующих защитных сооружений (ремонт, наращивание высоты); аккумуляция вод в маршах во время больших нагонов, помогающее уменьшить нагрузку на Барьер Темза; строительство барьеров и шлюзов у Тилбери и Лонг-Рич, а также — дополнительного барьера со шлюзами у Барьера Темза, который будет действовать, когда число закрытий Барьера будет приближаться к 50 в год.

ВЫВОДЫ

Эстуарий Темзы представляет собой типичный макроприливный эстуарий воронкообразной формы, в котором взаимодействуют речной сток, приливы и штормовые нагоны. В статье подробно рассмотрена динамика вод и наносов в эстуарии Темзы во время приливов и штормовых нагонов и отмечено следующее:

преобладающее воздействие приливов на динамику вод в эстуарии в сравнении с влиянием стока реки;

отсутствие в эстуарии Темзы заметной двухслойной циркуляции вод, как во многих других эстуариях, и формирование в нем хорошо перемешанных по вертикали водных масс;

закономерные изменения уровня воды, скорости течения, солёности и мутности воды во время приливного цикла;

закономерное увеличение величин приливов и нагонов вдоль эстуария на протяжении ~70 км;

сложные процессы взаимодействия приливов и нагонов, выражающиеся в несовпадении моментов ПВ при приливе и наибольшей относительной высоты нагона, а также и в нелинейном характере соотношения высот прилива и нагона;

существенные многолетние изменения характеристик приливов и нагонов (в частности, уве-

личение отметок максимальных уровней и скорости распространения приливных и нагонных волн вдоль эстуария), вызванные ростом среднего у.м., углублением и выправлением эстуария, а также (для нагонов) активизацией циклонической деятельности в последние десятилетия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
2. Михайлова М.В. Взаимодействие приливов и нагонов в устье р. Эльбы // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 283–296.
3. Михайлова М.В. Многолетние изменения речных и морских факторов, определяющих гидрологический режим и морфологическое строение устьевой области р. Темзы // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 407–421.
4. Amin M. On perturbations of harmonic constants in the Thames Estuary // Geophys. J.R. Astron. Soc. 1983. V. 73. № 3. P. 587–603.
5. Astbury C.P. Thames tidal flooding. Chairman’s Address // Gas Eng. Manag. 1979. P. 167–176.
6. Baxter P.J., Moller I., Spencer T. et al. Flooding and climate change // <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/DHHealth/cap4-6.pdf>
7. Bowen A.J. The tidal regime of the River Thames; long-term trends and their possible causes // Phil. Trans. Royal Soc. A. 1972. № 272. P. 187–199.
8. Bowen A.J., Pinless S.J. The response of an estuary to the closure of a mobile barrier: Richmond Barrier on the Upper Thames Estuary // Estuarine and Coast. Mar. Sci. 1977. № 5. P. 197–208.
9. Dawson R.J., Hall J.W., Bates P.D., Nicholls R.J. Quantified analysis of the probability of flooding in the Thames Estuary under imaginable worst-case sea level rise scenarios // Wat. Res. Development. 2005. V. 21. № 4. P. 577–591.
10. Flather R.A., Smith J.A., Richards J.D. et al. Direct estimates of extreme storm surge elevations from a 40-year numerical model simulations and from observations // Glob. Atm. Ocean Syst. 1998. № 6. P. 165–176.
11. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers. Studies and Reports in Hydrology. Paris: UNESCO, 1991. № 50. 138 p.
12. Inglis C.C., Allen F.H. The regime of the Thames estuary as affected by currents, salinities and river flow // Proc. Inst. Civ. Eng. 1957. V. 7. P. 827–878.
13. http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_Margate#Storm_of_1949
14. http://en.wikipedia.org/wiki/North_Sea_flood_of_1953
15. <http://www.environment-agency.gov.uk/homeandleisure/floods/117047.aspx>
16. http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Leisure/Thames_Barrier_2010_project_pack.pdf
17. http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/TE2100_Environment_Summary_LR.pdf
18. <http://www.floodlondon.com>

19. http://www.rms.com/Publications/1953_Floods_Retrospective.pdf
20. *Lavery S., Donovan B.* Flood risk management in the Thames Estuary looking ahead 100 years // *Phil. Trans. Royal Soc. A.* 2005. № 363. P. 1455–1474.
21. *McDowell D.M., O'Connor B.A.* Hydraulic behavior of estuaries. London: Macmillan Press, 1977. 292 p.
22. *Officer C.B.* Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). N.Y.; London; Sydney; Toronto: Wiley Int. Publ., 1976. 465 p.
23. *Prandle D.* Storm surges in the southern North Sea and River Thames // *Proc. Royal Soc. A.* 1975. № 344. P. 509–539.
24. *Prentice J.E.* Sedimentation in the Inner Estuary of the Thames, and its relation to the regional subsidence // *Phil. Trans. Royal Soc. A.* 1972. № 272. P. 115–119.
25. *Rossington K., Spearman J.* Past and future evolution in the Thames Estuary // *Ocean Dynamics.* 2009. № 59. P. 709–718.
26. *Siefert W., Murty T.S.* Storm surges, river flow and combined effects. State of the Art Report. Koblenz, 1991. 151 p.
27. Thames flood protection // *Port London.* 1982. V. 57. № 620. P. 11–13.
28. Thames tidal defence scheme now completed // *Water Serv.* 1983. V. 87. № 1045. P. 107–109.
29. *Trafford B.D.* The background to the flood defence of London and the Thames Estuary // *J. Inst. Water Eng. Sci.* 1981. V. 35. № 5. P. 383–394.
30. *Van IJken J.* A flood Barrier in the Thames // *De ingénieur* 1977. V. 89. № 48. P. 915–927.
31. *Wood R.M., Drayton M., Berger A. et al.* Catastrophic loss modelling of storm-surge flood risk in eastern England // *Phil. Trans. Royal Soc. A.* 2005. № 363. P. 1407–1422.