ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 551.428.6 DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.8

ОСОБЕННОСТИ ТИПИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В УСТЬЯХ РЕК НА ПРИМЕРЕ РОНЫ И ЭБРО

М.В. Исупова, М.В. Михайлова
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
misupova@yandex.ru

Аннотация. Устья рек сильно уязвимы к повышению уровня моря, связанному с глобальными изменениями климата, усилению штормовых нагонов, морского волнения, сопровождающихся абразией морских берегов и затоплением обширных дельтовых территорий. Поэтому опыт исследований опасных гидрологических событий речного и морского происхождения в устьях рек необходим и полезен для разработки критериев оценки опасности таких событий и их комплексной типизации. На примере крупных дельт Средиземноморского региона (Роны и Эбро) показано, что несмотря на довольно хорошую изученность подобных событий в этих устьях, нет их общей принятой типизации, а для одного и того же объекта приведены разные классификации. Опасные гидрологические события в устьях Роны и Эбро разными исследователями подразделяются как по генетическому признаку (происхождению осадков), так и по величине расходов воды, повторяемости и продолжительности наводнений, оценке воздействия на окружающую среду и жизнь человека. Опасные гидрологические события в исследуемых устьях также рассмотрены с точки зрения типизации, разрабатываемой авторами. Отмечается, что для

PECULIARITIES OF TYPICATION OF DANGEROUS HYDROLOGICAL EVENTS AT RIVER MOUTHS, THE RHONE AND EBRO AS EXAMPLES

Maria V. Isupova, Maria V. Mikhailova
Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia
misupova@yandex.ru

Abstract. River mouths are highly vulnerable to sea level rise associated with global climate change, strengthening storm surges, and wave action, accompanied by abrasion of seacoasts and flooding of vast deltaic areas. Therefore, experience in studying dangerous hydrological events of river and sea origin at river mouths is necessary and useful for developing criteria for assessing the danger of such events and their comprehensive typification. Using the example of large deltas of the Mediterranean region (Rhone and Ebro), it is shown that despite a rather good study of such events at these river mouths, there is no generally accepted typification, and different classifications are given for the same object. Dangerous hydrological events at the mouths of the Rhone and Ebro rivers are subdivided by different researchers both according to genetic characteristics (the origin of precipitation) and water discharge values, frequency and duration of flood, assessment of the impact on the environment and human life. Dangerous hydrological events at the studied mouths are considered from the point of view of the typification, developted by the authors. It is noted that among the dangerous hydrological events in the Rhone and Ebro deltas the most typical are fluvial, storm surge, fluvial-storm surge, fluvial-pluvial floods, as well as dangerous droughts.

Isupova M. V., Mikhailova M. V. Peculiarities of typication of dangerous hydrological events at river mouths, the Rhone and Ebro as examples. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 8–21. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.8.

дельт Роны и Эбро среди опасных гидрологических событий наиболее характерны стоковые, нагонные, стоково-нагонные, стоково-дождевые наводнения, а также опасные маловодья.

Ключевые слова: река; море; устьевая область; дельта; Рона; Эбро; наводнение; опасное гидрологическое событие; типизация.

Keywords: river; sea; mouth area; delta; Rhone; Ebro; flood; hazardous hydrological event; typification.

Введение

Начиная с середины XX в. потепление климата планеты существенно повлияло на процессы в атмосфере и гидросфере: усилилось таяние ледников и многолетнемерзлых пород, ускорилось повышение уровня Мирового океана, активизировалась циклоническая деятельность, более частыми стали сильные затопления речного и морского происхождения. Среди географических объектов, наиболее уязвимых к воздействию указанных выше процессов, оказались устьевые области рек. Этому способствуют особенности их строения и режима: низменные берега, разветвленная гидрографическая сеть, подверженность одновременно и речному, и морскому влиянию. Проблемы изучения и оценки опасного воздействия водного фактора на природную среду и социально-экономический комплекс устьев рек, приобрели в настоящее время особую актуальность.

Прогнозируемое повышение уровня моря на 0,16–0,28 м к 2050 г. и 0,34–1,05 м к 2100 г. [IPCC. Climate Change, 2021] приведет к усилению затопления низменных районов речных дельт. На гидролого-морфологические процессы в дельтах будут оказывать влияние относительное повышение уровня моря, складывающееся из эвстатического повышения уровня и просадки дельтовых отложений, а также усиление штормовой деятельности. Так, например, в Средиземноморском регионе в последнее время участились интенсивные ураганы – медиканы, вызывающие сильные штормовые нагоны и оказывающие существенное влияние на гидролого-морфологические процессы в устьевых областях Роны и Эбро [Sanuy et al., 2020].

Цель настоящей статьи – проанализировать опасные гидрологические события (ОГС) в некоторых устьях рек Средиземноморского региона, выявить особенности и сравнить типизации ОГС, имеющиеся в российской и зарубежной научной литературе.

Этот научный обзор сделан в рамках исследования экстремальных гидрологических явлений в устьях рек в Институте водных проблем РАН. Опасные гидрологические процессы в устьях рек мира изучены недостаточно: мало первичных сведений о них, крупных работ по их систематизации, анализу и обобщениям; слабо разработана классификация этих процессов. К числу немногих опубликованных работ, рассматривающих опасные устьевые гидрологические процессы, можно отнести [Магрицкий, 2016; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018].

Крупнейшие дельты рек Средиземноморья – Роны (Франция), Эбро (Испания), По (Италия) и Нила (Египет) – объекты пристальных исследований, поскольку оказываются очень уязвимы к повышению уровня моря и усилению штормовых нагонов, морского волнения, сопровождающихся абразией морских берегов и затоплением обширных дельтовых территорий [Lorente et al., 2021]. Несмотря на то, что ландшафты этих дельт сильно изменены деятельностью человека, здесь расположены самые большие прибрежные естественные водно-болотные угодья на Средиземноморском побережье [Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021].

Для устранения негативных последствий наводнений, особенно в густонаселенных районах Средиземноморья, созданы государственные учреждения для регистрации опасных событий и причиненного ими ущерба,

организации возмещения потерь, получения помощи жертвам и определения финансовых ресурсов для решения чрезвычайных ситуаций (введение новых или усиление существующих налогов). Исторические архивы Испании, Франции, Италии содержат различную информацию о наводнениях, как достаточно надежную (административные источники), так и частную (хроники, дневники) менее надежную, но предоставляющие полезную дополнительную информацию [Barriendos, Rodrigo, 2006; Pichard et al., 2017].

Объекты, методы и материалы исследований

Краткие сведения об объектах исследований

Согласно гидролого-морфологической типизации устьевых областей рек [Михайлов, Горин, 2012], устьевая область Роны относится к дельтово-эстуарной, устьевая область Эбро – к дельтовой. Каждая из исследуемых устьевых областей имеет в своем составе устьевой участок реки, дельту выдвижения и устьевое взморье; устьевая области Роны имеет также водоемы эстуарного типа – лагуны.

Дельта Роны. Дельта Роны площадью 1740 км^2 расположена на французском побережье Средиземного моря, приблизительно в 40 км к западу от Марселя (рисунок 1). В вершине дельты (ВД) чуть выше г. Арль, в районе нас. пункта Фурке (в 47,5 км от моря) река делится на два рукава: левый и главный – Большая Рона (Б. Рона) и правый – Малая Рона (М. Рона). Длина Б. Роны ~50 км, М. Роны − ~60 км, морского края дельты (МКД) – 90 км [Михайлова, Исупова, 2006; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022]. Бóльшую часть дельты Роны занимает древняя и современная пойма (72 % площади дельты), на лагуны и пруды приходится 23 %, на прибрежные участки – 5 % [Arnaud-Fassetta, Quisserne, Antonelli, 2003]. Б. и М. Рона делят дельту на три части: Малый Камарг (западную), Большой Камарг (центральную) и Гран-План-дю-Бург (восточную). Большой Камарг в свою очередь делится на Северный Камарг (система осохших водотоков и осолоненных маршей) и Южный Камарг, отличительная черта которого – наличие

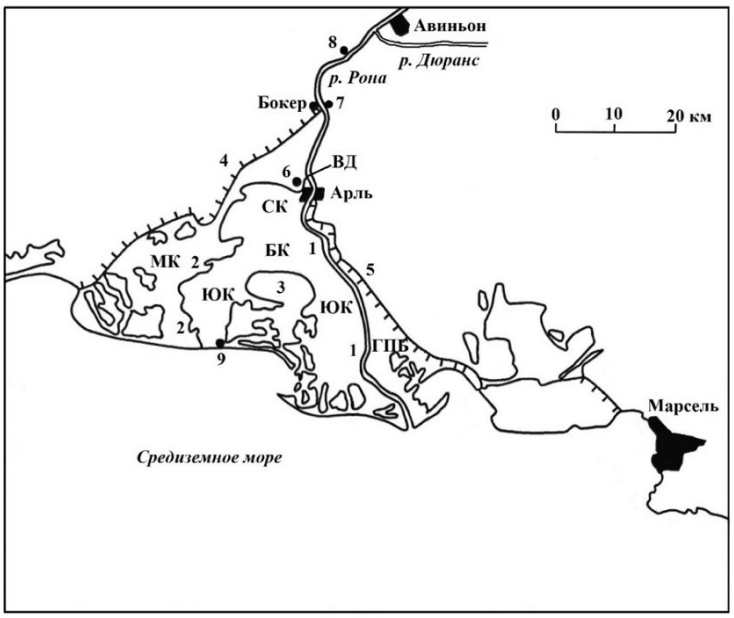

Рисунок 1. Схема устьевой области р. Рона. Рукава: 1 – Б. Рона, 2 − М. Рона; 3 – лагуна Ваккарес; навигационные каналы: 4 – Рона-Сет, 5 – Арль-Бук; части дельты: МК – Малый Камарг, БК – Большой Камарг, ГПБ − Гран-План-дю-Бург, СК – Северный Камарг, ЮК – Южный Камарг; города: 6 – Фурке, 7 – Тараскон, 8 – Арамон, 9 – Сент-Мари-де-ля-Мер

Figure 1. Scheme of the Rhone River mouth. Branches: 1 – G. Rhone, 2 – P. Rhone; 3 – Vaccares Lagoon; navigation canals: 4 – Rhone-Sète, 5 – Arles-Buc; parts of the delta: МК – Petite Camargue, БК – Grande Camargue, ГПБ - Grand Plane du Bourg, СК – Northern Camargue, ЮК – Southern Camargue; cities: 6 – Fourquet, 7 – Tarascon, 8 – Aramon, 9 – Sainte-Marie-de-la-Mer

бывших береговых валов, кос и солоноватых лагун, самая крупная из которых – Ваккарес (Этан-де-Ваккарес) площадью 64 км^2 [Pont, Day, Ibáñez, 2017].

Среднемноголетний расход воды Роны у г. Бокер (~12 км выше по течению от ВД и в 60,5 км от МКД) составляет 1700 м^3/с (годовой объем стока 53,7 км^3) [Arnaud-Fassetta, 2003a; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022; Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Максимальный годовой расход изменяется от 4200 до 11640 м^3/с, минимальный – до 320 м^3/с [Arnaud-Fassetta, 2003a]. Сток воды между рукавами распределяется следующим образом: 86 % (85−90 %) поступает в Б. Рону, 14 % (10−15 %) – в М. Рону [Arnaud-Fassetta, 2003a; Pichard et al., 2017]. Сведения о стоке наносов противоречивы, разными авторами оцениваются от 6,7 до 30,0 млн т/год [Arnaud-Fassetta, Quisserne, Antonelli, 2003; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022], большую часть которого составляет сток взвешенных наносов.

Устьевое взморье Роны приглубое. Приливы полусуточные, максимальная величина ~0,4–0,5 м. Юго-западный ветер (марэн) способствует возникновению нагонов высотой до 1,0 м. При меженных расходах воды в ВД меньше 1000 м^3/с возможно проникновение в дельту осолоненных морских вод, дальность распространения которых составляет до 15 км в М. Роне и 35 км в Б. Роне [Arnaud-Fassetta, 2003a; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022]

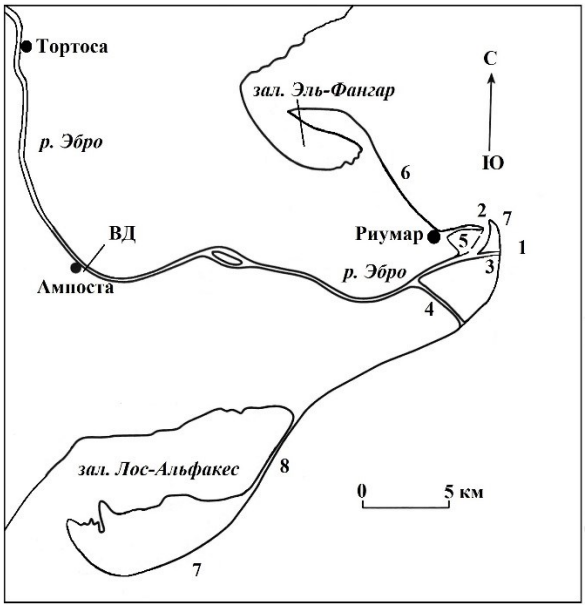

Рисунок 2. Схема устьевой области р. Эбро. 1 – мыс Тортоса; рукава: 2 – Эбро, 3 – Буда, 4 – Мигхорн; 5 – лагуна Эль-Гарсаль; устьевые косы: 6 – Фангар, 7 – Ла-Банья, 8 – Трабукадор

Figure 2. Scheme of the Ebro River mouth area. 1 – Cape Tortosa; branches: 2 – Ebro, 3 – Buda, 4 – Migjorn; 5 – El Garxal lagoon; mouth spits: 6 – Fangar, 7 – La Banya, 8 – Trabucador

История развития и освоения дельты Роны изложена в [Михайлова, Исупова, 2006]. Современная дельта Роны развивается под влиянием трех основных факторов: значительного антропогенного сокращения стока наносов в результате зарегулирования реки и обвалования русел, усиления воздействия интенсивных речных паводков и эвстатического повышения уровня моря.

Дельта Эбро. Дельта Эбро расположена на испанском побережье Средиземного моря, примерно в 170 км к югу-западу от Барселоны. Дельта площадью 320 км^2 имеет классическую клювовидную форму и оканчивается мысом Тортоса (рисунок 2). ВД Эбро находится в районе г. Ампоста в ~27 км от моря, длина МКД ~50 км. Выход в море главного и единственного рукава находится в районе нас. пункта Риумар. Слева и справа от дельты отходят большие устьевые косы Фангар и Ла-Банья, отделяющие от моря соответственно два залива-лагуны – Эль-Фангар (на севере) и Лос-Альфакес (на юге). Лагуны мелководные (средняя глубина от менее 0,5 до 1,0 м), имеют слабое сообщение с морем и получают пресную воду из главного рукава дельты и системы дренажных каналов. Самая

«молодая», частично заросшая, лагуна – Эль-Гарсаль – образовалась в 1937 г. после прорыва главного рукава дельты в северном направлении [Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021]. Больше половины площади дельты (56 %) используется сельским хозяйством (главным образом под посевы риса), 15 % занято болотной растительностью, 20 % – песчаные пляжи, каналы, дороги, 9 % – лагуны и пресноводные марши.

Величина среднемноголетнего расхода воды Эбро у г. Тортоса (в замыкающем створе, в 47,8 км от МКД) за 1912−2018 гг. составляет 431 $м^3/с$ (3,8 $км^3$/год) [Tena, Vericat, Batalla, 2021], при этом до зарегулирования реки (1914–1935 гг.) расход был равен 592 $м^3/с$ (18,7 $км^3$/год), а после зарегулирования (1960–1990 гг.) уменьшился до 426 $м^3/с$ (13,4 $км^3$/год) [Михайлова, 2003] и ~300 $м^3/с$ (~9,47 $км^3$/год) в 2000–2020 гг. [Tena, Vericat, Batalla, 2021]. Наибольший расход воды реки оценивается в ~12000 $м^3/с$ (1907 г.) [Tena, Vericat, Batalla, 2021]. В конце XIX в. сток взвешенных наносов в устье составлял ~30 млн т/год. После зарегулирования реки и ее притоков 133 водохранилищами сток взвешенных наносов к 1910–1930 гг. сократился до 17–20 млн т/год, а после строительства в 1940–1950-х гг. крупных водохранилищ Эбро и Эса – до ~2,2 млн т/год. Введение в эксплуатацию водохранилищ Мекиненса, Рибарроха и Флиш еще сильнее сократило сток взвешенных наносов реки – до 0,15 млн т/год [Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022; Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021].

Устьевое взморье Эбро приглубое. Приливы смешанные, причем преобладают полусуточные. Максимальная величина прилива ~0,25 м. Средняя высота нагонов 0,6 м. Дальность распространения приливов в дельту составляет 45 км, морских осолоненных вод – до 32 км [Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022; Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021]. По приблизительным оценкам просадка дельтовых отложений в районе дельты Эбро составляет от 1 до 4 мм/год [Михайлова, 2003; Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021], а относительное повышение уровня моря – 2–5 мм/год. Ветры восточных румбов вызывают сильный фронтальный подход волн к морскому краю, его последующий размыв и вдольбереговой перенос наносов к северу и югу.

Эволюция дельты Эбро подробно изложена в [Михайлова, 2003]. Современная дельта развивается под влиянием трех основных факторов: значительного антропогенного сокращения стока наносов реки, повышения уровня моря, активного волнового воздействия на морской край. Происходит деградация дельты, размыв ее МКД, наиболее интенсивный в районе мыса Тортоса и бара (пересыпи) Трабукадор [Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021] (рисунок 2).

Методы и материалы исследований

Авторы статьи придерживаются определения, сформулированного в [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]: «опасными гидрологическими процессами, событиями и явлениями надо считать те из них, которые оказывают или могут оказать негативное воздействие на население, населенные пункты, социальные и промышленные объекты, сельскохозяйственные угодья и фермы, инфраструктуру и другие хозяйственные объекты, а также окружающую природную среду и приводят или могут привести к социальному, материальному и экологическому ущербу».

Детальная типизация опасных гидрологических процессов и событий в устьях рек, принятая как в России, так и за рубежом, пока отсутствует. Причина – в большой сложности строения и гидрологического режима устьев рек. Кроме того, в условиях взаимодействия речных и морских факторов подходы к типизации опасных гидрологических процессов и событий, принятые для обычных рек и морей, к устьям рек, как правило, неприменимы.

При работе над статьей авторы придерживались научных подходов, изложенных в работах, касающихся опасных гидрологических процессов и событий в устьях рек [Магрицкий, 2016; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]. В них предпринята попытка классифицировать опасные гидрологические события (явления, процессы) применительно к устьям. Так, например, к катастрофическим гидрологическим событиям (явлениям, процессам) в устьях рек отнесены те события, которые сопровождаются

человеческими жертвами, а к экстремальным – с наибольшими или наименьшими за весь период наблюдений значениями (исторический максимум или минимум), или за некоторый репрезентативный многолетний период. Отдельно выделены аномальные события – сильно отличающиеся от среднеарифметических или медианных величин (но не экстремальные). Типизация ОГС (явлений, процессов) должна, в свою очередь, учитывать определяющие факторы и характер воздействия на природный и социально-экономический комплекс устьев рек.

Одно из самых распространенных ОГС – это наводнение различной величины и генезиса. По [Магрицкий, 2016; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018], наводнения в устьях рек (и в дельтах, в частности) можно разделить на несколько типов: стоковые, заторные и зажорные, стоково-заторные и стоково-зажорные, морфодинамические, стоково-морфодинамические и стоково-заторно-морфодинамические, нагонные, стоково-нагонные, трансгрессивные, дождевые, наводнения при интенсивном снеготаянии, стоково-дождевые и др. По длительности воздействия выделяются наводнения очень длительные (крупномасштабные морские трансгрессии, сотни и тысячи лет), длительные (годы, десятилетия), сезонные и кратковременные, а по происхождению − речные, морские и вызванные местными атмосферными осадками. В иностранной литературе представлены классификации, применимые, как правило, к конкретным объектам. Для выявления особенностей типизации ОГС и, в частности, наводнений в устьях рек, авторы при подготовке статьи использовали различные базы данных и публикации, посвященные исследованию ОГС в дельтах Роны и Эбро.

Результаты

Опыт исследований и типизации опасных гидрологических событий в устьях Роны и Эбро

Согласно [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017], наводнения в низовье (участок реки от места впадения притока Изер до ВД) и дельте Роны различают по происхождению и делят на четыре основных типа: севенский (наводнения, вызванные сильными дождями на западных склонах Севенн), средиземноморский (сильные дожди на восточных склонах Южных Альп), океанический (продолжительные осадки в северной части водосбора Роны) и смешанный (к дождям добавляется таяние снега в горных районах водосбора). Наводнения первых двух типов продолжаются от нескольких часов до нескольких дней, третьего и четвертого – от нескольких дней до недель.

В [Arnaud-Fassetta, 2003a; Arnaud-Fassetta, Quisserne, Antonelli, 2003; Maillet et al., 2006] представлена классификация наводнений в низовье и дельте Роны в зависимости от повторяемости и критического значения расхода воды на г/п Бокер (1920–2000 гг.): 4200 м^3/с – ежегодное, 6000 – раз в два года, 8400 – раз в 10 лет, 9400 – раз в 30 лет (ноябрь 1994 г.), 9800 – раз в 50 лет (октябрь 1993 г.), 11000 – раз 80 лет (январь 1994 г.), 11300 – раз в 100 лет (май 1856 г.), 13300 – раз в 500 лет, 14200 м^3/с – раз в 1000 лет.

В исследованиях [Pichard et al., 2017] и базе данных HISTRHONE[1] Европейского центра исследований и развития наук об окружающей среде (Экс-ан-Прованс, Франция) приводится градация наводнений в низовье и дельте Роны от самых низких до самых высоких, начиная с паводков (без затопления пойменных и дельтовых территорий) и заканчивая «экстремальными» наводнениями. При этом учитывается морфологическое строение долины в низовье Роны (широкое пойменное расширение, особенно в дельте) и особенности разливов реки (сужение относительно устойчивого русла Роны в пределах городов и максимальное расширение разливов на пойменных участках Роны и в дельте). В целом же в базе содержатся исторические и современные данные об 1500 ОГС в низовье и дельте Роны (высоком или низком уровне воды, наводнениях, ледовых явлениях (ледоход, ледяные заторы), сильных дождях и засухах, нашествиях саранчи) и их негативном воздействии на хозяйство (ущербе городским и сельским районам и

[1] HISTRHONE, base de données historiques des crues et des inondations dans le bas Rhône. URL: https://histrhone.cerege.fr.

инфраструктуре), индексированные по времени, местоположению и нанесенному ущербу, которые охватывают период с 1226 по 2000 г. (включая Малый ледниковый период 1300–1850 гг.). Представленные в базе ОГС разделены на несколько разделов (модулей) – паводки и наводнения, ледовые явления, засухи, сильные дожди − и подразделяются на несколько типов [Pichard et al., 2017] (таблица 1). Согласно типизации [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018], для дельты Роны наиболее характерны стоковые, стоково-дождевые и стоково-нагонные наводнения и опасные обмеления.

При исследовании зафиксированных за 1300–2000 гг. 517 наводнений в низовье и дельте Роны отмечается увеличение частоты стоковых и стоково-дождевых наводнений типов C_2, C_3 и C_4 за последние три с половиной столетия, в основном за счет экстремальных наводнений C_4 в XIX–XX вв. (девять наводнений C_4 с 1300 по 1650 г. и 27 – с 1651 по 2000 г.) [Pichard et al., 2017].

В целом можно выделить периоды усиления ОГС в низовье и дельте Роны: 1350-х гг., 1450–1480-х гг., 1674–1711 гг., 1840–1841 гг., 1850-е гг., первая половина XX вв. На рубеже XX–XXI вв. в низовье и дельте Роны произошли шесть крупных наводнений – в октябре 1993 г. (9800 $м^3/с$ на г/п Бокер), в январе (10980 $м^3/с$) и ноябре 1994 г. (9750 $м^3/с$), ноябре 1996 г. (8990 $м^3/с$), сентябре (10500 $м^3/с$) и ноябре 2002 г. (10200 $м^3/с$) и декабре 2003 г. (11000±5 % $м^3/с$).

В испанской научной литературе среди ОГС рассматриваются, как правило, наводнения. Поскольку основные причины наводнений на средиземноморском побережье Испании, особенно в его северной части, – это проливные кратковременные конвективные или продолжительные обложные дожди (характерные для осеннего периода), типизация таких событий основана на трех видах прохождения дождевых осадков [Llasat et al., 2005]: (1) очень кратковременные (менее 6 ч), но высоко интенсивные дожди с небольшим общим количеством меньше 200 мм), (2) кратковременные (от 6 до 72 часов) интенсивные дожди с большим общим количеством (200–500 мм), с которыми связаны наиболее частые и катастрофические наводнения в регионе), (3) продолжительные (примерно 1 неделя) слабо интенсивные дожди (с возможными пиками) с общим количеством осадков от 200 мм (обычно происходят осенью или зимой). С точки зрения серьезности воздействия на окружающую среду и жизнь человека в [Barriendos, Rodrigo, 2006] наводнения делятся на катастрофические (со значительным ущербом или разрушением инфраструктуры) и чрезвычайные (с некоторым ущербом), а пространственного распространения – на крупные катастрофические (охватывающие два–три речных бассейна) и очень крупные катастрофические (охватывающие четыре и более речных бассейна) [Barriendos, Rodrigo, 2006]. В [Lorente et al., 2021] ОГС в устье реки классифицируется как экстремальное, когда один или несколько взаимосвязанных факторов (ветер, волны, морские течения, уровень моря) постоянно превышают определенные пороговые значения.

Согласно принятой авторами настоящей статьи типизации ОГС, для дельты Эбро наиболее характерны стоково-дождевые, стоковые, нагонные и стоково-нагонные наводнения, а также опасные маловодья. Среди наводнений на северо-востоке Испании (Каталония) в бассейнах 17 рек за период с 1355 г. по конец XX в. зарегистрировано 1422 наводнения (589 катастрофических и 833 чрезвычайных) [Barriendos, Rodrigo, 2006]. В низовье Эбро (г. Тортоса) и ее дельте – 17 катастрофических и 23 чрезвычайных наводнений (за 1355–1982 гг.). В последние годы среди ОГС выделяются нагонные и стоково-нагонные наводнения, вызванные осенними штормами в 2019 г. (сентябрь, октябрь), штормами Глория в январе 2020 г. и Филомена в январе 2021 г., которые нанесли дельте Эбро существенный ущерб [Rodríguez-Santalla, Navarro, 2021].

Примеры опасных гидрологических событий в устьях Роны и Эбро

В качестве наиболее показательных примеров ОГС в дельтах Роны и Эбро, отражающих их отнесение к какому-либо типу, ниже представлены наиболее значительные наводнения в низовьях и устьях этих рек.

Таблица 1. Опасные гидрологические события в низовье и дельте Роны, типизация по [Pichard et al., 2017] и ее сравнение с типизацией по [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]
Table 1. Dangerous hydrological events in the Rhone lower reach and delta, typification according to [Pichard et al., 2017] and its comparison with typification according to [Mikhailov, Mikhailova, Magritsky, 2018]

Вид ОГС	Типизация ОГС по [Pichard et al., 2017]		Характеристика ОГС	Кол-во случаев	Типизация ОГС по [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]
	событие	обозначение у авторов			
Засухи	маловодье	C_0	низкий уровень воды; до XIX в. в документальных источниках упоминался только экстремальный низкий уровень воды	235	стоковые маловодья
Наводнения	высокий уровень воды («Огромная Рона» («Gros Rhône»)	C_1	без затопления поймы, но при котором необходимо постоянное наблюдение за дамбами (документ. источники до XVIII в. за исключением 1783–1788 гг.)	445	стоковые наводнения; неблагоприятные
	высокий уровень воды с затоплением поймы	C_2	незначительное затопление поймы	263	стоковые, стоково-дождевые наводнения; выдающиеся
	наводнения	C_3	разрушительные наводнения средней степени (между C_2 и C_4); оцениваются в зависимости от ущерба	145	стоковые, стоково-дождевые наводнения; разрушительные
	экстремальные, катастрофические наводнения	C_4	обширные затопления, в том числе городов, разрушение дамб, мостов, дорог, повреждение сельскохозяйственных земель, гибель скота, жертвы среди населения	36	стоковые, стоково-дождевые наводнения; катастрофические
	слабые наводнения	Cd	неразрушительные наводнения (затопление поймы зафиксировано)	72	стоковые наводнения; малоопасные
	наводнения неопределенной силы	Ci	неразрушительные наводнения (затопление поймы не зафиксировано)	58	стоковые наводнения; малоопасные
ОГС, вызванные ледовыми явлениями	ледяной затор	GA	блокирование русла льдом	101	стоково-заторные наводнения
	ледоход	GF	движущийся лед	61	–
	скопления льда	Gi	отдельное скопление льдин	12	–
ОГС, вызванные сильными дождями и штормами	дождевое наводнение	IP	быстроразвивающийся дождевой паводок с затоплением поймы	48	дождевые, стоково-дождевые наводнения
	штормовой нагон	SM	проникновение морских вод	8	нагонные, стоково-нагонные наводнения

Стоково-дождевое наводнение в дельте Роны в 1993 г. Кратковременные и обильные осадки, выпавшие на водосборах притоков Роны – Ардеша и Дюранса в начале октября 1993 г., усугубившиеся последующими затяжными дождями в северной части бассейна Роны и короткими, но сильными грозами в Средиземноморском регионе, вызвали быстрый рост расходов воды в верховье Роны (2718 м^3/с 9 октября) и большинства ее притоков – Соны,

Изера, Ардеша и Дюранса. Совместное действие этих паводков привели к быстрому росту расходов воды в ВД Роны (до 9450 м^3/с 9 октября) и резкому повышению уровня воды [Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Наводнение стоково-дождевого подтипа (или смешанного типа согласно [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017]) вызвало прорывы в защитной дамбе на М. Роне и разрушение берегов, при этом максимальный расход через прорывы оценивался в 614 м^3/с (почти половина расхода воды в самом рукаве на тот момент) (рисунок 3). Общий объем воды, поступившей в дельту в результате прорыва дамбы, составил 0,131 км^3, а площадь затопления – 125 км^2. Речные воды сначала затопили северную часть дельты, ограниченную М. Роной и заброшенным рук. Альбарон, потом распространились в южную часть, достигнув лагуны Ваккарес и прилегающих к ней лагун. Значительная часть этих вод была откачана непосредственно обратно в Рону, остальная отведена в лагуну Ваккарес.

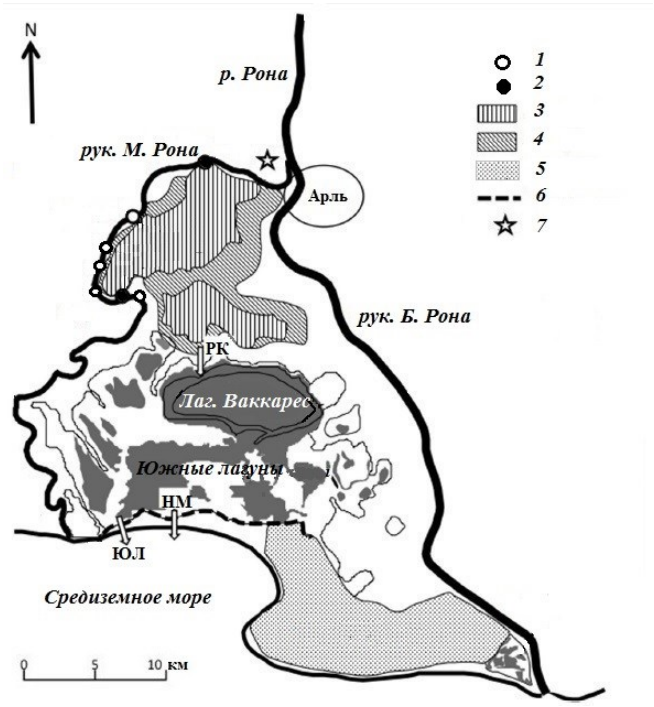

Рисунок 3. Карта-схема районов затопления Северного Камарга в дельте Роны 1993 и 1994 гг. на основе [Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Места прорыва дамб: *1* – в октябре 1993 г., *2* – в январе 1994 г.; зоны затопления: *3* – в октябре 1993 г., *4* – в январе 1994 г.; *5* – пруды для выпаривания соли, *6* – вдольбереговая дамба Диг-а-ля-Мер, *7* – г/п; РК – направление потока по каналу Русти из Северного Камарга в Ваккарес, ЮЛ – соединение Южных лагун с морем, НМ – откачка воды в море на насосной станции

Figure 3. Schematic map of the flooded areas of the Northern Camargue in the Rhone delta in 1993 and 1994 at [Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Locations of levees breaks: 1 – October 1993, 2 – January 1994; flood zones: 3 – October 1993, 4 – January 1994; 5 – salt evaporation ponds, 6 – alongshore dam Digue-à-la-Mer, 7 – gauge station; РК – direction of flow along the Canal Rousty from Northern Camargue to the Vaccares lagoon, ЮЛ – connection of the Southern lagoons with the sea, NM – pumping water into the sea at a pumping station

Стоковое наводнение в дельте Роны в январе 1994 г. (или океанического типа согласно [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017]) развивалось аналогичным образом, начавшись с постепенного увеличения расходов воды в верховье Роны, притоков Соны и Изера. Сильные грозы на юге, прошедшие 6 января 1994 г., вызвали рост расходов воды в Ардеше и Дюрансе. Стремительный рост расходов воды Роны в ВД (с 4464 м^3/с 6 января до 10572 м^3/с 8 января) способствовали развитию наводнения в дельте до середины января (общая продолжительность восемь дней). Наводнение также вызвало прорывы дамбы на М. Роне (причем на том же

участке, что и в наводнение 1993 г.). Картина затопления дельты была также схожа с событием 1993 г.

Стоково-нагонное наводнение в дельте Роны в декабре 2003 г. (или средиземноморского типа по [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017]), было вызвано исключительными гидрометеорологическими условиями – относительно высокими для зимы температурами воздуха, большим количеством осадков, насыщенностью влагой почв, сильным юго-восточным ветром с моря (скоростью свыше 16 м/с), вызвавшим штормовой нагон и сильное волнение (высота и период волн ~5 м и 5 с соответственно) [Arnaud-Fassetta, 2003; Maillet et al., 2006]. Наводнение затронуло 24 департамента на юго-востоке Франции (долина Роны ниже по течению г. Лион). С 30 ноября по 2 декабря на водосборе Роны выпало ~500 мм осадков (393 мм в Севеннах и 100 мм в долине Роны), что привело к росту расходов воды реки и ее притоков. Максимальный пиковый расход Роны в ВД составил 11500 (±5 %) $м^3/с$ (3 декабря 2003 г.; 21:00), что соответствовало, согласно [Arnaud-Fassetta, 2003; Maillet et al., 2006], наводнению, происходящему один раз в 100 лет. Рона в низовье и дельте вышла из берегов, затопила аллювиальную равнину площадью $429,1 \pm 21,5$ км^2 и разрушила несколько дамб обвалования. Наиболее пострадали районы между Бокером – Тарасконом и Арлем (объем воды, прошедший через три туннеля, пересекающих дамбы обвалования, составил 16–18 млн м^3), а также на правом берегу рук. М. Рона, где произошел прорыв двух крупных защитных дамб в районе фермерских хозяйств «Petit Argence» и «Claire Farine». Наводнение способствовало отложению $810,43 \pm 40,52$ тыс. м^3 наносов на поверхности дельты. При этом вдоль МКД Роны по обе стороны от г. Сент-Мари-де-ла-Мер из-за сильного шторма, совпавшего с наводнением, было потеряно до $544,33 \pm 27,22$ м^3 песка [Arnaud-Fassetta, 2003]. Согласно [Maillet et al., 2006], рук. Б. Рона за время этого наводнения в море было вынесено до 7,81 млн м^3 наносов, а устье самого рукава углубилось (поскольку темпы эрозии русла превышают темпы накопления наносов). Ущерб от декабрьского наводнения 2003 г. был довольно серьезным, особенно на участке Роны ниже по течению Авиньона и в дельте. В зоне затопления оказались г. Арамон, несколько деревень и ферм. Были эвакуированы 2000 человек в Арамоне, почти 6000 человек, проживающих в северной части Арля, ~2600 жителей деревни Фурке и ~3000 человек, проживающих в районе Малый Камарг (западная часть дельты) после прорыва дамбы на М. Роне. В Арле потребовалось десять дней для откачки воды, чтобы осушить затопленные кварталы. Общая величина ущерба от наводнения была оценена Министерством экологии, устойчивого развития, транспорта и жилищного строительства Франции в 1,130 млрд евро (из них от 150 до 200 млн евро – в Арле) [Arnaud-Fassetta, 2003].

Стоково-дождевое наводнение в низовье и дельте Эбро в 1617 г. Согласно архивным источникам (книгам решений городских советов, планам общественных работ и другим рукописным материалам), представленным в [Thorndycraft et al., 2006], сильные дожди, прошедшие в Каталонии 2–6 ноября 1617 г., вызвали катастрофическое наводнение, которое нанесло серьезный ущерб всему региону. Было разрушено свыше 380 домов, 22 моста и 17 водяных мельниц, повреждены городские стены и ирригационные каналы. Расходы воды рек Тер, Сегре (приток р. Эбро) и Льобрегат превышали исторические максимумы за всю историю наблюдений. Стоково-дождевое наводнение в низовье Эбро привело к тому, что в г. Тортоса были разрушены городские стены, 152 здания, ирригационные каналы, две водяных мельницы, а в дельте Эбро образовалась обширная лагуна. Помимо прямого ущерба от наводнения (разрушение городской и сельской инфраструктуры) негативную роль сыграли косвенные последствия. Разрушение водяных мельниц привело к потере основного источника производства муки, что вызвало голод в крупных каталонских городах. Кроме того, паводковые воды образовали ряд медленно осыхающих прибрежных лагун, что привело к увеличению численности комаров и, соответственно, росту заболеваемости малярией среди прибрежного населения.

Стоково-дождевое наводнение в бассейне Эбро в октябре 1907 г. было вызвано проливными

дождями, затронувшими прибрежные и внутренние бассейны Каталонии, в том числе бассейн Эбро. Расход воды р. Сегре в районе г. Лерида достигал 4500 м^3/с (22 октября), а уровень воды превышал нормальный на 8–10 м [Barriendos, Rodrigo, 2006]. На самой Эбро вблизи дельты (г. Тортоса) пик одного из сильнейших наводнений, известных за период инструментальных наблюдений, пришелся на 23 октября. Максимальный мгновенный расход воды у Тортосы составил 23484 м^3/с. В районе Лериды и Тортосы были затоплены тысячи гектаров окружающих земель, частично разрушены защитные дамбы и жилые дома. При этом благодаря превентивным мерам и телеграфной связи между городами удалось избежать человеческих жертв и катастрофического ущерба.

Стоково-нагонное наводнение в дельте Эбро в январе 2020 г. было вызвано штормом «Глория», обрушившемся 19–24 января 2020 г. на северо-западную часть Средиземного моря, и затронувшим испанские провинции Каталония, Валенсия, Мурсия, Балеарские острова, и, в том числе, район дельты Эбро, который сопровождался сильными восточными ветрами (свыше 20 м/с) и очень высокими волнами (3,0–7,6 м). Катастрофическое наводнение в дельте Эбро, вызванное одновременно речными паводковыми и устремившимися вглубь дельты морскими водами, привело к затоплению рисовых полей в дельте (рисунок 4), размыву пляжей, частичному размыву песчаной косы Трабукадор, разрушению береговой инфраструктуры в прибрежных регионах и гибели 13 человек [Lorente et al., 2021; Rodríguez-Santalla, Navarro, 2021; Sanuy et al., 2020]. Ущерб от наводнения в дельте был оценен в 68,4 млн евро, а в целом по региону Каталония – в 545,2 млн евро.

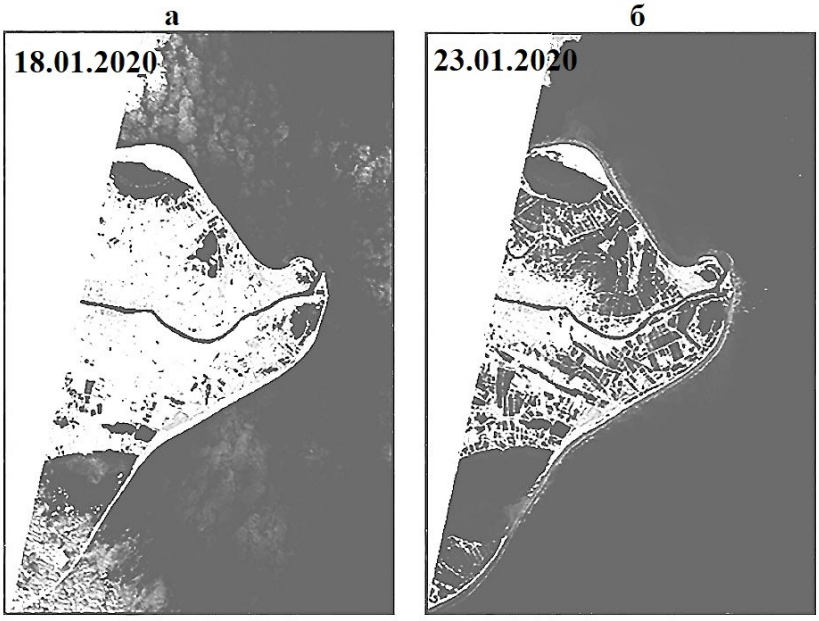

Рисунок 4. Карта затопления дельты Эбро во время наводнения в январе 2020 г.: состояние дельты перед (а) и после (б) прохождения шторма «Глория» по [Lorente et al., 2021]

Figure 4. Map of the Ebro Delta inundation during the flood in January 2020: state of the delta before (a) and after (b) the passage of Storm Gloria according to [Lorente et al., 2021]

Заключение

В обзоре зарубежной литературы, предпринятом авторами, рассмотрены подходы к типизации и понятийному определению опасных гидрологических процессов в устьевых областях рек Роны и Эбро.

ОГС в устье Роны различными учеными подразделяются как по генетическому признаку (т.е. по происхождению осадков, вызвавших наводнения: севенский, средиземноморский, океанический и смешанный), так и по величине расходов воды в дельте − от самых низких (маловодья) до самых высоких (экстремальные наводнения), а также в зависимости от

повторяемости и критического значения расхода воды реки на г/п Бокер.

Типизации ОГС в устье Эбро также основаны на определении интенсивности дождевых осадков (от проливных кратковременных конвективных до продолжительных обложных дождей) и оценке степени воздействия на окружающую среду и жизнь человека (на катастрофические, чрезвычайные крупные катастрофические, очень крупные катастрофические (охватывающие четыре и более речных бассейна).

Надо отметить, что ни во французской, ни в испанской научной литературе нет принятой типизации ОГС (в частности, наводнений) в устьях рек. Однако полученные результаты могут быть использованы в работах по дальнейшему изучению, идентификации, количественной оценке и ранжированию опасных гидрологических процессов, районированию подверженных их воздействию территорий и акваторий, а настоящая статья служить приглашением специалистов к дискуссии и дальнейшей разработке типизации и определений опасных гидрологических процессов в устьях рек.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001; № государственной регистрации: 122041100222-7).

Acknowledgments

This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0001.

Литература

Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). 2016. № 2. С. 35–61.

Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243−257.

Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. М.: Триумф, 2018. 313 с.

Михайлова М.В. Переформирование дельты р. Эбро под влиянием значительного антропогенного сокращения стока наносов // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 4. С. 409−417.

Михайлова М.В., Исупова М.В. Гидрологический режим дельты р. Роны и динамика ее морского края // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 643−654.

Arnaud-Fassetta G. Dyke Breaching and Crevasse-Splay Sedimentary Sequences of the Rhône Delta, France, Caused by Extreme River-Flood of December 2003 // Geogr. Fis. Dinam. Quat. 2013. № 36. P. 7–26. DOI: 10.4461/GFDQ.2013.36.1.

Arnaud-Fassetta G. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic

References

Magritsky D.V. Opasnye hydrologicheskiye yavleniya y protsessy v ust’yah rek: voprosy terminologuii y classifikatsii [Dangerous hydrological phenomena and processes at river mouths: terminology and classification issues]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologiya (polytekhnicheskiy vestnik) [Science. Technics. Technology (Polytechnic Bulletin)]*, 2016, No. 2, pp. 35−61. (In Russian).

Mikhailov V.N., Gorin S.L. New Definitions, Regionalization, and Typification of River Mouth Areas and Estuaries as their parts. *Water Resources*, 2012, vol. 39, No. 3, pp. 247−260. DOI: 10.1134/S0097807812030050.

Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritsky D.V. Osnovy hydrologii ust'ev rek [Fundamentals of river mouth hydrology]. Moscow: *Triumf*, 2018, 313 p. (In Russian).

Mikhailova M.V. Transformation of the Ebro River Delta under the Impact of Intense Human-Induced Reduction of Sediment Runoff. *Water Resources*, 2003, vol. 30, No. 4, pp. 370−378. DOI: 10.1023/A:1024963911893.

Mikhailova M.V., Isupova M.V. Hydrological Regime of the Rhône Delta and Dynamics of its Coastline. *Water Resources*, 2006, vol. 33, No. 6, pp. 595−607. DOI: 10.1134/S0097807806060017.

Arnaud-Fassetta G. Dyke Breaching and Crevasse-Splay Sedimentary Sequences of the Rhône Delta, France, Caused by Extreme River-Flood of December

change and natural resource management // Catena. 2003. № 51. P. 141–172.

Arnaud-Fassetta G., Quisserne D., Antonelli C. Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: the Rhône River in its delta area (France) // Géomorphologie: relief, processus, environnement. 2003. V. 9. № 1. P. 33−50. DOI: 10.3406/morfo.2003.1164.

Barriendos M., Rodrigo F.S. Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data // Hydrological Sciences Journal. 2006. № 51 (5). Special issue: Historical Hydrology. P. 765–783.

Boudet L., Sabatier F., Radakovitch O. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2017. № 198. P. 568−582. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.10.004.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2391 p. DOI 10.1017/ 9781009157896.

Isupova M.V., Mikhailova M.V., Dolgopolova E.N. Geographic-Hydrological Register of Deltas of Main World Rivers // Water Resources. 2022. V. 49. № 5. P. 927–940. DOI: 10.1134/S0097807822050062.

Llasat M.-C., Barriendos M., Barrera A., Rigo T. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records // J. of Hydrology. 2005. № 313. P. 32–47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.004.

Lorente P., Lin-Ye J., García-León M., Reyes E., Fernandes M., Garcia Sotillo M., Espino M., Ruiz M.I., Gracia V., Perez S., Aznar R., Alonso-Martirena A., Álvarez-Fanjul E. On the Performance of High Frequency Radar in the Western Mediterranean during the Record-Breaking Storm Gloria // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8, Artc. 645762. DOI: 10.3389/fmars.2021.645762.

Maillet G.M, Vella C., Berné S., Friendd P.L., Amosd C.L., Fleurya T.J., Normandc A. Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France) // Marine Geology. 2006. V. 234. Issues 1−4. P. 159−177. DOI: 10.1016/j.margeo.2006.09.025.

2003. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 2013, No. 36, pp. 7–26. DOI: 10.4461/GFDQ.2013.36.1.

Arnaud-Fassetta G. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 2003, No. 51, pp. 141–172.

Arnaud-Fassetta G., Quisserne D., Antonelli C. Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: the Rhône River in its delta area (France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2003, vol. 9, No. 1, pp. 33−50. DOI: 10.3406/morfo.2003.1164.

Barriendos M., Rodrigo F.S. Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences Journal*, 2006, No. 51 (5). Special issue: Historical Hydrology, pp. 765–783.

Boudet L., Sabatier F., Radakovitch O. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, No. 198, pp. 568−582. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.10.004.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*: UK, Cambridge, 2021.

Isupova M.V., Mikhailova M.V., Dolgopolova E.N. Geographic-Hydrological Register of Deltas of Main World Rivers. *Water Resources*, 2022, vol. 49, No. 5, pp. 927–940. DOI: 10.1134/S0097807822050062.

Llasat M.-C., Barriendos M., Barrera A., Rigo T. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *J. of Hydrology*, 2005, No. 313, pp. 32–47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.004.

Lorente P., Lin-Ye J., García-León M., Reyes E., Fernandes M., Garcia Sotillo M., Espino M., Ruiz M.I., Gracia V., Perez S., Aznar R., Alonso-Martirena A., Álvarez-Fanjul E. On the Performance of High Frequency Radar in the Western Mediterranean during the Record-Breaking Storm Gloria. *Frontiers in Marine Science*, 2021, vol. 8, artc. 645762. DOI: 10.3389/fmars.2021.645762.

Maillet G.M, Vella C., Berné S., Friendd P.L., Amosd C.L., Fleurya T.J., Normandc A. Morphological changes and sedimentary processes induced by the

Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E. Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources // Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques. 2017. V. 62. № 11. P. 1772–1795. DOI: 10.1080/02626667.2017.1349314.

Pont D., Day J.W., Ibáñez C. The impact of two large floods (1993–1994) on sediment deposition in the Rhône delta: Implications for sustainable management // Science of the Total Environment. 2017. № 609. P. 251–262. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.155.

Rodríguez-Santalla I., Navarro N. Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case // J. of Marine Science and Engineering. 2021. № 9. Artc. 1190. DOI: 10.3390/jmse9111190.

Sanuy M., Rigo T., Jiménez J.A., Llasat M.C. Classifying compound coastal storm and heavy rainfall events in the north-western Spanish Mediterranean // Hydrology and Earth Systems Sciences. 2020. DOI: 10.5194/hess-2020-560.

Tena Á., Vericat D., Batalla R.J. Balance Sedimentario del Embalse de Ribarroja // Cuadernos de Investigación Geográfica // Geographical Research Letters. 2021. № 47 (2). P. 415−433. DOI: 10.18172/cig.4894.

Thorndycraft V.R., Barriendos M., Benito G., Rico M., Casas A. The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context // Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques. 2006. № 51 (5). Special issue: Historical Hydrology. P. 899–912. DOI: 10.1623/hysj.51.5.899.

December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France). *Marine Geology*, 2006, vol. 234, Issues 1−4, pp. 159−177. DOI: 10.1016/j.margeo.2006.09.025.

Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E. Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 2017, vol. 62, No. 11, pp. 1772–1795. DOI: 10.1080/02626667.2017.1349314.

Pont D., Day J.W., Ibáñez C. The impact of two large floods (1993–1994) on sediment deposition in the Rhône delta: Implications for sustainable management. *Science of the Total Environment*, 2017, No. 609, pp. 251–262. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.155.

Rodríguez-Santalla I., Navarro N. Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case. *J. of Marine Science and Engineering*, 2021, No. 9, artc. 1190. DOI: 10.3390/jmse9111190.

Sanuy M., Rigo T., Jiménez J.A., Llasat M.C. Classifying compound coastal storm and heavy rainfall events in the north-western Spanish Mediterranean. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2020. DOI: 10.5194/hess-2020-560.

Tena Á., Vericat D., Batalla R.J. Balance Sedimentario del Embalse de Ribarroja. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. *Geographical Research Letters*, 2021, No. 47 (2), p. 415−433. DOI: 10.18172/cig.4894.

Thorndycraft V.R., Barriendos M., Benito G., Rico M., Casas A. The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 2006, No. 51 (5). Special issue: Historical Hydrology, pp. 899–912. DOI: 10.1623/hysj.51.5.899.